



Munich School of Engineering
Technische Universität München

Technische Universität München

Munich School of Engineering

Untersuchungen zur Eignung von Pferdemist als Biomassebrennstoff

Cornelius Uhl

Vollständiger Abdruck der von der promotionsführenden Einrichtung Munich School of Engineering der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor- Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer
2. Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner

Die Dissertation wurde am 11. Mai 2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die promotionsführende Einrichtung Munich School of Engineering am 04. Mai 2018 angenommen.

Danksagung

Für mich war die Zeit während meiner Promotion etwas Besonderes. Das Thema war etwas Besonderes. Zu den wenigen zu gehören, die kooperativ an einer Hochschule promovieren, war etwas Besonderes. Bei den ersten des TUM Applied Technology Forums dabei zu sein war ebenso etwas Besonderes. Um diese besondere Zeit erleben zu dürfen, waren besonderes persönliches Engagement und auch besonderes Glück, zur rechten Zeit am rechten Ort gewesen zu sein, eine wichtige Voraussetzung. Entscheidender jedoch war das Kennenlernen ganz besonderer Menschen vor und während dieser Zeit. Diese Menschen motivierten, kritisierten, trösteten und vor allem unterstützten sie mich in besonderem Maße. Einigen von diesen Weggefährten möchte ich im Folgenden auch einen besonderen Dank aussprechen.

Als erstes möchte ich mich bei meinen Prüfern, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer und Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückler bedanken. Ich danke Ihnen für die vertrauensvolle Betreuung und hilfreiche Unterstützung. Dies ermöglichte mir eine große Freiheit beim Bearbeiten meiner Aufgabenstellung. Ihr kompetenter Rat und Ihre fachlichen Anmerkungen förderten mich dabei in meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung.

Hervorheben möchte ich dabei das Vertrauen und die Unterstützung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückler, welches ich bereits im Vorfeld der Promotion genießen durfte. Ohne mich näher zu kennen, stellte er neben einem Arbeitsplatz eine ganze Halle für das auf mich maßgeschneiderte Forschungsvorhaben „Biomassepellets aus Pferdemist“ zur Verfügung. Somit ermöglichte er mir den Einstieg in meine wissenschaftliche Laufbahn. Durchaus etwas Besonderes.

Umgeben war ich von einzigartigen Kollegen. Die Atmosphäre war geprägt von schonungsloser Ehrlichkeit, hoher Einsatzbereitschaft, aber vor allem von einem beispiellosen Zusammenhalt. Danke deshalb an Constanze Müller, Johannes-Daniel Schlecht, Georg Polz, Fabian Bergrath, alle studentischen Hilfskräfte, Projekt- und

Abschlussarbeiten- Schreiber und alle Kollegen in der Verwaltung, Empfang und den Sekretariaten. Es war wirklich etwas Besonderes mit euch zu arbeiten.

Ich möchte die Gelegenheit nutzen und mich an dieser Stelle speziell bei den Mitarbeitern des technischen Betriebes der Hochschule Rosenheim unter der Leitung von Dipl.-Ing. (FH) Joachim Müller zu bedanken. Ohne ihre immer wieder schnelle und unbürokratische Hilfe wäre ein erfolgreicher Betrieb der Forschungsanlage nicht möglich gewesen. Das war besonders unkompliziert.

Dank auch den beteiligten Firmen der Stela Laxhuber GmbH, vertreten durch Thomas Laxhuber und Rainer Hettwer, Rohrdorfer Zementwerke Gebr. Wiesböck GmbH, vertreten durch Mike Edelmann und der Schneider Electric GmbH vertreten durch Hans Lermer. Auch durch sie habe ich eine große Unterstützung erfahren. Dies gilt an erster Stelle für die Stela Laxhuber GmbH. Diese Unterstützung war besonders großzügig.

Beispiellos waren auch der Zuspruch und das Verständnis meines privaten Umfelds. Hier danke ich meinen Eltern, meinen Geschwistern und meinem Taufpaten mit Familie und meinen Freunden und Bekannten. Hier konnte ich Kraft tanken, jammern, schimpfen, mich freuen und zuweilen auch überheblich sein. Besonnen und immer voller Wohlwollen fanden sie immer einen Weg, mich wieder in die Realität und somit auf den Boden der Tatsachen zurückzuholen. Danke sage ich auch den Korrekturlesern Julia Uhl, Yves-Marc Schade und Johannes-Daniel Schlecht für die gefühlt eine Million Anmerkungen und Anregungen, diese haben mir sehr geholfen. Das war besonders herzlich.

Dem legendärsten aller Freunde Johann „Hansi“ Müller möchte ich einen besonderen Dank aussprechen. Du weißt warum! Danke my good old friend!

Ein liebevolles Dankeschön richte ich an meine Verlobte Daniela Müller und unsere Tochter Shania. Ihr habt alle Hoch- und Tiefphasen direkt miterlebt, mich aufgebaut, wenn ich frustriert und mutlos war, ohne euch ein einziges Mal zu beschweren. Eure Liebe ist etwas Besonderes und mein größtes Glück.

Danke euch allen, ihr habt es rückblickend zu einer besonders schönen Zeit gemacht!

Inhalt

Inhalt	I
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
2.1 Definition Pferdemist	5
2.2 Ausgangslage und Aufkommen von Pferdemist	5
2.3 Aktuelle Entsorgungs- und Verwertungswege	7
2.4 Ansätze zur energetischen Verwertung	9
2.4.1 Vergärung in Biogasanlagen	9
2.4.2 Einsatz von Pferdemist in Biomassefeuerungsanlagen.....	12
2.5 Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften.....	14
2.5.1 Auswirkungen der charakteristischen Brennstoffeigenschaften	15
2.5.2 Auswirkungen der physikalisch-mechanischen Eigenschaften	20
2.5.3 Einfluss der Elementarzusammensetzung.....	21
2.6 Verbesserung der Brennstoffeigenschaften anspruchsvoller Biomasse durch Aufbereitung	25
2.6.1 Forschungsvorhaben der Hochschule Rosenheim	25
2.6.2 Florafuel Verfahren	26
2.6.3 Das Scheffler Konzept.....	27
2.6.4 Verfahren zur Nassmechanischen Trennung von Biomasse und Inertstoffen.....	28
2.6.5 Grundlagen und Anforderungen bei der Pelletherstellung	29
2.6.6 Energiebedarf bei der Brennstoffaufbereitung.....	34

2.6.7	Einsatz von mineralischen Zuschlagstoffen zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften	46
2.7	Theoretische Grundlagen der Verbrennung	47
2.7.1	Ablauf der thermo-chemische Umwandlung	48
2.7.2	Emissionsbildung	52
2.7.3	Asche	64
2.7.4	Gesetzliche Rahmenbedingungen für die Verwertung von Pferdemist	69
3	Methodik.....	73
3.1	Gesamtverfahren.....	73
3.2	Entfernen von Verunreinigungen	76
3.3	Vorzerkleinerung	77
3.4	Mechanische Entwässerung	79
3.5	Trocknung	80
3.6	Nachzerkleinerung.....	82
3.7	Pelletierung und Kühlung	83
3.8	Analyse der Brennstoffeigenschaften	84
3.9	Feuerungsversuchsstand	86
3.10	Rauchgasanalyse.....	87
3.11	Staubmessung.....	91
3.12	Elementaranalyse	92
3.13	Ascheerweichung und Aschegehalt.....	93
3.14	Sensorik.....	94
3.15	Datenaufzeichnung und -auswertung	96
4	Ergebnisse	97
4.1	Mechanische Aufbereitung	97
4.1.1	Mechanische Vorentwässerung	98

4.1.2	Vorzerkleinerung und Trocknung	98
4.1.3	Homogenisieren und Pressen.....	100
4.1.4	Gesamtenergiebedarf für die Pelletierung von Pferdemist	102
4.2	Analyseergebnisse der einzelnen Brennstoffchargen	103
4.2.1	Brennstoffanalysen.....	104
4.2.2	Rauchgasanalyse.....	130
4.2.3	Staubmessung	139
5	Ergebnisdiskussion.....	141
5.1	Mechanische Aufbereitung	141
5.1.1	Wirkung der mechanischen Vorentwässerung	141
5.1.2	Thermische Energie	146
5.1.3	Elektrische Energie	147
5.1.4	Gesamtenergiebedarf.....	149
5.2	Brennstoffeigenschaften	151
5.2.1	Elementarzusammensetzung	152
5.2.2	Wassergehalt	163
5.2.3	Heizwert.....	164
5.2.4	Aschegehalt und Ascheerweichungstemperatur	167
5.3	Emissionen.....	169
6	Fazit und Ausblick	177
7	Zusammenfassung	181
8	Abbildungsverzeichnis	185
9	Tabellenverzeichnis	193
10	Literaturverzeichnis	195

1 Einleitung

Aufgrund der Endlichkeit fossiler Energieträger, allen voran Erdöl [1], und einem steigendem ökologischen Bewusstsein der Gesellschaft, haben die regenerativen Energieträger in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Einhergehend mit dem verstärkten Bedarf an erneuerbaren Energien ist auch der Einsatz von Biomasse als Energieträger stark angestiegen. Biogene Brennstoffe bieten den Vorteil der einfachen Lagerung nach entsprechender Aufbereitung durch Trocknen oder Silieren. Die Lager stellen dabei technisch einfache Energiespeicher dar. Die in der Biomasse enthaltene chemische Energie kann jederzeit bei Bedarf in thermische und elektrische Energie umgewandelt werden. Diese Eigenschaft erklärt den hohen Anteil von Biomasse (56,5 %) am regenerativen Primärenergieverbrauch [2].

Unter den festen Biomasseenergieträgern stellt Holz den wichtigsten dar [1]. Dieses kann in etablierten und bewährten Anlagenkonzepten in den für den Menschen nutzbare Energieformen überführt werden. Holz besitzt jedoch weitere einzigartige Eigenschaften. So ist es unter anderem ein gefragter Baustoff. Dadurch gibt es zwei Zweige der Holznutzung. Zum einen die stoffliche Verwertung und zum anderen die energetische Verwertung. Dadurch besteht eine Konkurrenzsituation bei der Versorgung mit Holz. Beide Verwertungswege haben in den letzten Jahren einen deutlichen Zuwachs erfahren. Dies wiederum führte zu einem Preisanstieg der auf Holz basierten Energieträger, wie Pellets und Hackschnitzel. Laut [3] betrug der Preisanstieg für Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 20 % (WG 20) zwischen 2008 und 2015 30,6 %. Der wirtschaftliche Einsatz von Holz als Energieträger ist somit begrenzt. Hält diese Entwicklung weiter an entsteht in Deutschland bis 2020 eine Versorgungslücke von 30 Mio. m³. Diese Menge stellt rund ein Drittel der momentanen Holzernte dar. Global stellt sich die Situation ähnlich dar [4]. Aus diesem Grund besteht die dringende Notwendigkeit, neue Biomasseenergieträger zu erschließen und bisher ungenutzte Potenziale zu nutzen.

Der intensive Einsatz von Pferdemist als Primärenergieträger in Biomassekraftwerken stellt eine interessante Option zur Entspannung des Marktes und der Sicherung der Versorgung mit Biomasse - Energieträgern dar. Das

Aufkommen ist mit 6 – 15 Mio. Tonnen [5] jährlich beachtlich. Darüber hinaus beklagen die Besitzer großer Reiterhöfe ein Entsorgungsproblem. Der Pferdemist kann nicht ohne weiteres auf die Felder ausgebracht werden. Das Ausbringen auf die Felder kann unter anderem einen erhöhten Parasitendruck und eine erhöhte Staubbelastung des geernteten Heus zur Folge haben [6]. Diese Sachlage fördert den Gedanken an eine energetische Nutzung von Pferdemist.

Die aktuell verfügbare Datengrundlage lässt keine belastbare Einschätzung der Eignung von Pferdemist als primärer Einsatzstoff in Biomasseheizkraftwerken zu.

Um hier verlässliche Aussagen treffen zu können muss als erstes die grundsätzliche Eignung von Pferdemist als Brennstoff nachgewiesen werden. Hierzu liegen bereits einige Literaturwerte vor. Diese sind jedoch nur von geringem Umfang und bedürfen einer Erweiterung. Es sind weitere Untersuchungen zu Brennwert, Ascherweichungsverhalten, Ascheanteil und Emissionsverhalten durchzuführen. Dem Emissionsverhalten muss hierbei eine besondere Rolle beigemessen werden. Die Emissionen sind gesetzlich limitiert. Entstehen bei der Verbrennung zu viele umweltschädliche Emissionen, muss dem Verbrennungsprozess eine aufwendige und kostenintensive Rauchgasreinigung nachgeschaltet werden. Dies könnte einen wirtschaftlichen Einsatz von Pferdemist in Biomassefeuerungen unmöglich machen. Um dies zu verhindern könnte eine Absenkung der Störstoffgehalte vor der Verbrennung zielführend sein.

Dies führt zu folgenden Thesen:

1. Pferdemist ist als leicht verfügbare Biomasse ein interessanter Brennstoff.
2. Hohe Störstoffgehalte erschweren einen technisch sinnvollen Einsatz von Pferdemist als Biomassebrennstoff.
3. Eine Verbesserung der Brennstoffeigenschaften und Absenkung der Störstoffgehalte kann durch einfache mechanische Aufbereitung erreicht werden.
4. Nach der Aufbereitung ist Pferdemist als Ersatzbrennstoff in Biomasseheizkraftwerken geeignet.
5. Die mechanische Aufbereitung mindert schädliche Emissionen erheblich.

6. Pferdemit birgt ein erhebliches Potenzial als Ersatzbrennstoff für holzartige Brennstoffe.
7. Kleinf Feuerungen sind für den Einsatz von Pferdemit nicht geeignet.

Diese Thesen werden in der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht und durch die daraus resultierenden Ergebnissen entweder bestätigt oder widerlegt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Definition Pferdemist

Als Pferdemist wird die Mischung aus Pferdekot, Pferdeurin, Einstreu und Verunreinigungen wie Haaren und Futterresten bezeichnet. Der Pferdemist ist in der Regel ein Festmist. Durch seine feste Struktur verbleibt er nach dem Ausbringen auf das Feld an der Oberfläche und kann nicht direkt vom Boden aufgenommen werden wie etwa Rindergülle.

Als Einstreu werden hauptsächlich Holz- und Sägespäne, Stroh und in einigen Fällen Schilfspäne verwendet. Die Menge der Einstreu variiert sehr stark. Im privaten Bereich, in Selbstversorger-Ställen und im Sportpferdebereich wird eine große Menge an Einstreu eingesetzt. Die überwiegende Anzahl an Pferdeställen sind Pensionspferdeställe, in denen die Versorgung und das Ausmisten der Boxen und Paddocks durch die Stallbesitzer durchgeführt werden. Hier ist der Einstreuanteil im Mist aufgrund hoher Kosten für die Einstreu sehr gering.

Der Anteil der Einstreu hat großen Einfluss auf die Verwertungsmöglichkeiten des Pferdemists. Auf die Auswirkungen der verschiedenen Einstreuarten wird im Verlauf der Arbeit weiter eingegangen.

2.2 Ausgangslage und Aufkommen von Pferdemist

Das Aufkommen von Pferdemist in Deutschland kann nur geschätzt werden, da keine genauen Zahlen über den Pferdebestand in Deutschland vorliegen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass der Pferdebestand auf gewerbliche und landwirtschaftliche Betriebe aufgeteilt ist. So ist eine Erfassung aller Pferde durch das statistische Bundesamt nicht möglich, da hier laut statistischem Bundesamt nur landwirtschaftliche Betriebe berücksichtigt werden [7]. Ein Großteil der Pferde steht jedoch in Gewerbebetrieben oder wird privat gehalten. Verlässlichere Daten liefern die Tierseuchenkassen. Pferdehalter sind verpflichtet Beiträge an die

Tierseuchenkassen zu bezahlen [8]. Diese Pflicht gilt für jeden Pferdehalter unabhängig von der Einstufung als landwirtschaftliche, gewerbliche oder private Haltung und beruht auf dem Tiergesundheitsgesetz [9]. Hier besteht jedoch das Problem in der mangelnden Möglichkeit zur Überwachung der Einhaltung der Beitragspflicht. Viele Pferdebesitzer melden daher Ihre Tiere bewusst oder aus Unwissenheit über die Meldepflicht nicht. Daher bleibt auch hier ein wesentlicher Anteil des Pferdebestands unerfasst. Die dritte Möglichkeit um eine Einschätzung des Pferdebestands vornehmen zu können, sind die intern von den Reit- und Fahrvereinen geführten Schätzungen. Diese werden jedoch aufgrund der geringen Belastbarkeit der Daten nicht herangezogen. Somit stellen die Daten der Tierseuchenkassen die aussagekräftigsten Bestandszahlen dar. Für die Weitere Betrachtung des Pferdemistaufkommens werden die bei den Tierseuchenkassen gemeldeten Pferde als Grundlage herangezogen. Die Dunkelziffer des Pferdebestands dürfte wesentlich höher liegen, wird aber auf Grund fehlender Nachweisbarkeit nicht berücksichtigt. In Tabelle 1 sind die Pferdebestandszahlen auf Grundlage der Meldungen bei den Tierseuchenkassen aufgeführt.

Tabelle 1: Pferdebestandszahlen in den Bundesländern und in Deutschland nach telefonischer Auskunft der Tierseuchenkassen, Stand 2015.

Bundesland	Pferdebestand
Baden-Württemberg	111.250
Bayern	134.334
Berlin/Brandenburg	34.436
Hamburg	2.877
Hessen	64.500
Mecklenburg-Vorpommern	21.732
Niedersachsen/Bremen	203.705
Nordrhein-Westfalen	78.546
Reinland-Pfalz	42.000
Saarland	9.800
Sachsen	29.873
Sachsen-Anhalt	28.393
Schleswig-Holstein	43.400
Thüringen	22.725
Gesamt	827.571

Die Tierseuchenkassen rechnen nach Kaiser [10] von der Tierseuchenkasse Bayern mit einer jährlichen Zunahme des Pferdebestands um 20 %. Für die Abschätzung der in Deutschland jährlich anfallenden Pferdemistmenge wird neben den Bestandszahlen der Mistanfall pro Pferd benötigt. Das Kompetenzzentrum Pferd Baden-Württemberg gibt einen Mistanfall von 11 Tonnen pro Jahr und Pferd an [11]. Daraus ergibt sich anhand des deutschlandweiten Pferdebestands von 827.571 Pferden ein Pferdemistaufkommen von 9.103.281 Tonnen pro Jahr.

Eine im Rahmen einer Studienarbeit [12] durchgeführte Marktanalyse hat ergeben, dass rund 90 Prozent der befragten Pferdebetriebe ein Entsorgungsproblem haben. Somit steht grundsätzlich auch der Großteil des anfallenden Pferdemists für eine thermische Verwertung zur Verfügung.

2.3 Aktuelle Entsorgungs- und Verwertungswege

Die bei der Pferdehaltung anfallenden beachtlichen Mengen an Pferdemist stellen für viele Pferdehöfe ein großes Problem bezüglich der Entsorgung dar. Es gibt vier Möglichkeiten zur Entsorgung oder Verwertung von Pferdemist:

- Ausbringen auf die eigenen Flächen
- Abholung und Einsatz als Wirtschaftsdünger durch anliegende Bauern
- Export zur Pilz- und Blumenzucht
- Kompostierung
- Illegale Erddeponien

Der Einsatz als Dünger sowohl auf den eigenen Flächen der Pferdehöfe als auch als Wirtschaftsdünger im Ackerbau ist die verbreitetste Verwertungsvariante. Diese Variante kann nach Raupp [11] einen wichtigen Beitrag zur Nährstoffversorgung von Kulturpflanzen leisten. Bei der Betrachtung der Nährstoffgehalte scheint dies plausibel. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der Nährstoffgehalte verschiedener organischer Dünger. Angegeben werden der Stickstoffgehalt (N), der Phosphorgehalt in Form von Diphosphorpentoxid (P_2O_5), Kalium in Form von Kaliumoxid (K_2O) und Magnesium in Form von Magnesiumoxid (MgO). Darüber

hinaus wird noch der Stickstoffgehalt von Pferdemist ohne Stroh angegeben. Dies ist von großer Bedeutung, da es regional große Unterschiede bei der Art der verwendeten Einstreu gibt. So ist in Gebieten ohne große Ackerbauflächen Stroh als Einstreumaterial nur selten zu finden. Stroh erhöht jedoch den N-Anteil im Mist. Dies erhöht seine Eignung als Dünger.

Tabelle 2: Auszug Nährstoffgehalte organischer Dünger zum Zeitpunkt der Ausbringung [13]

organischer Dünger	N	N ohne Stroh	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Rindermist	5,2	4,2	2,7	10,0	2,2
Schweinemist	6,0	4,9	6,5	6,5	3,0
Hühnermist	17,5	16,5	15,0	15,5	5,5
Rindergülle	3,8	-	1,8	4,2	1,0
Schweinegülle	3,8	-	2,5	2,5	1,8
Rinderjauche	3,2	-	0,0	7,9	0,2
Pferdemist	4,6	3,5	3,6	10,9	1,4

Pferdemist hat also durchaus interessante Nährstoffgehalte. Es gibt jedoch auch einige Probleme beim Einsatz von Pferdemist als Dünger. So bedarf es einer geeigneten Aufbereitung des Pferdemists um eine optimale Düngewirkung zu erzielen [11]. Die Aufbereitung sollte dabei in Form einer Kompostierung umgesetzt werden. Jedoch ist Pferdemist nicht das ideale Substrat, er muss in der Regel befeuchtet werden, um gute Ergebnisse zu erzielen. Ist die Kompostierung abgeschlossen, ist der Mist hygienisiert und die Düngeeigenschaften sind verbessert. Erfolgt keine Kompostierung ist die biologische Umsetzung des Mists sehr langwierig. Dies hat eine geringere Stickstoff-Wirksamkeit für den Boden zur Folge. Ist der Mist nicht hygienisiert, erhöht dies den Parasitendruck. Dies bedeutet, dass Parasiten im Kreislauf erhalten bleiben und den Tieren wieder zugeführt werden. Boll [6] führt auf, dass für die Lagerung des Pferdemists bis zum Ausbringen eine Mistplatte benötigt wird. Darüber hinaus sind Auffangvorrichtungen für Niederschlag und Jauche erforderlich. Dies hat Kosten für die Errichtung und Instandhaltung der Anlagen zur Folge. Wird eine größere Anzahl von Pferden gehalten, ist der Platzbedarf für die Lagerung nicht zu unterschätzen. Weiter erwähnt Boll Probleme durch den feinen Geruchssinn der Pferde. Riechen die

Pferde ihren eigenen Kot, können Sie die Nahrungsaufnahme verweigern. Weiter wird beschrieben, dass die Zusammensetzung und Nährstoffgehalt stark variieren können. Dies erschwert eine gezielte Düngung erheblich.

Aus diesen Gründen ist die Verwertung von Pferdemist für Höfe mit wenig eigenen Flächen ein großes Problem. Dies bestätigte auch die Marktanalyse von Uhl [12].

Die Verwendung von Pferdemist als Dünger und Substrat abseits der Landwirtschaft ist eher gering und beschränkt sich hauptsächlich auf den Export in die Niederlande. Laut Döpke [14] betrug die Menge in diesem Verwertungsweg im Jahr 2008 220.000 Tonnen. Bezogen auf die Gesamtmenge ist das ein geringer Teil.

Die Entsorgung auf einer Mülldeponie ist die wirtschaftlich und ökologisch ungünstigste Variante, den Mist zu beseitigen. Hier bleibt er völlig ungenutzt. Für viele Pferdehöfe ist dies jedoch die einzige Möglichkeit, den Pferdemist zu entsorgen. Dies trifft besonders auf urbane Gebiete mit wenig landwirtschaftlichen Flächen zu.

2.4 Ansätze zur energetischen Verwertung

Aus Reststoffen wie Mist Energie zu erzeugen ist kein grundlegend neuer Gedanke. Mist wird schon seit Jahrtausenden von Nomadenvölkern in kargen Gebieten als Brennstoff eingesetzt. In Deutschland wird ein kleiner Teil des anfallenden Mists aus der Tierhaltung für die Energiegewinnung genutzt. Dies geschieht hauptsächlich mit Hilfe von Biogasanlagen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verbrennung, diese spielt bei der Verwertung von Mist jedoch noch eine untergeordnete Rolle.

2.4.1 Vergärung in Biogasanlagen

In den Biogasanlagen wird hauptsächlich Gülle, Jauche und Festmist aus der Rinder und Schweinehaltung eingesetzt. Der Anteil an Wirtschaftsdünger im Substrat liegt bei 40 - 50 %.

Abbildung 1 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung des Gärsubstrats im Jahr 2012. Festmist spielt dabei eine untergeordnete Rolle [15]. Pferdemist wurde gar nicht erhoben, da sein Anteil zu gering ist.

Massebezogener Substrateinsatz in Biogasanlagen 2012

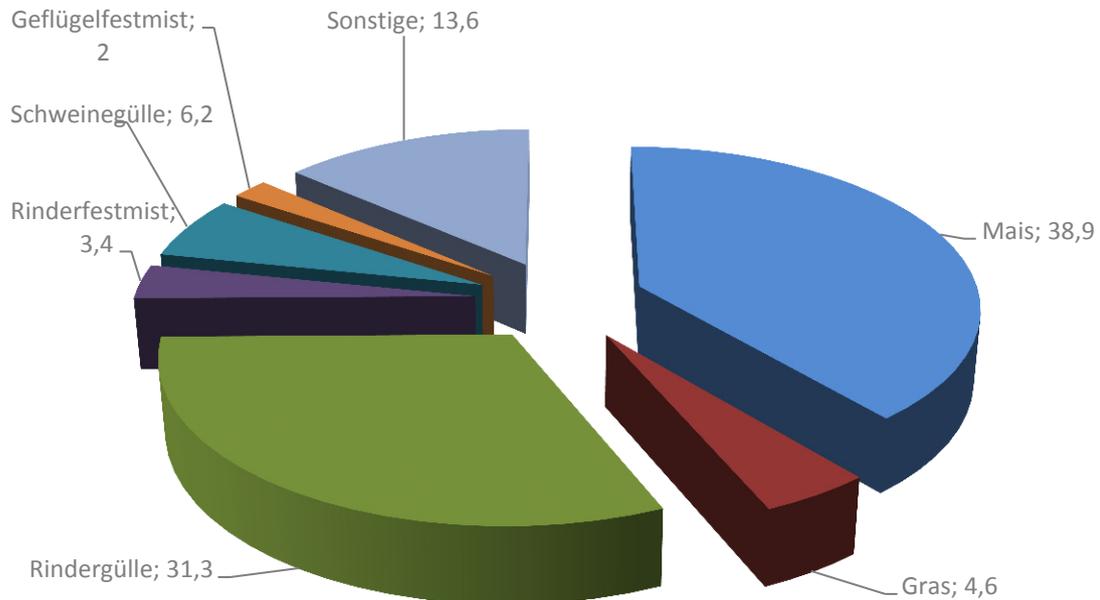


Abbildung 1: Durchschnittliche Substratzusammensetzung 2012 für Biogasanlagen [15]

Aufgrund der hohen und meist kostenneutralen Verfügbarkeit stellt Pferdemist jedoch grundsätzlich einen interessanten Einsatzstoff für die biologische Vergärung dar. Dem entgegen stehen jedoch ein erhöhter Anlagenaufwand und ein geringer Methanertrag pro Gewichtseinheit. Es werden immer wieder neue Ansätze zur Vergärung von Pferdemist in Biogasanlagen verfolgt und untersucht. So hat die Universität Hohenheim ein Verfahren entwickelt, bei dem der Pferdemist vor dem Einbringen in den Fermenter mechanisch aufgeschlossen wird [16]. Einen anderen Weg geht die Firma Snow Leopard Projekts. Sie setzt ein Verfahren ein, welches die Zellulose biologisch aufschließt. Bei diesem System wird der eigentlichen Vergärung eine weitere Prozessstufe vorgeschaltet. Dadurch können durch Hydrolyse- und Versäuerungs-bakterien die Molekülstrukturen von Mist und Stroh aufgebrochen werden. Dies ermöglicht eine anschließende Vergärung mit der herkömmlichen Anlagentechnik [16]. Vereinzelt wurden Anlagen mit diesen Verfahrensansätzen

gebaut und müssen derzeit wohl eher noch als Pilot- und Forschungsanlagen bezeichnet werden. Eine Bewertung dieser Ansätze ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich, da zu wenige Daten über diese Anlagen bekannt sind oder die Anlagen noch keinen regulären Betrieb erreicht haben.

Abbildung 2 zeigt die Methanerträge verschiedener Biogassubstrate im Vergleich, bezogen auf die Masse organische Trockensubstanz (oTS).

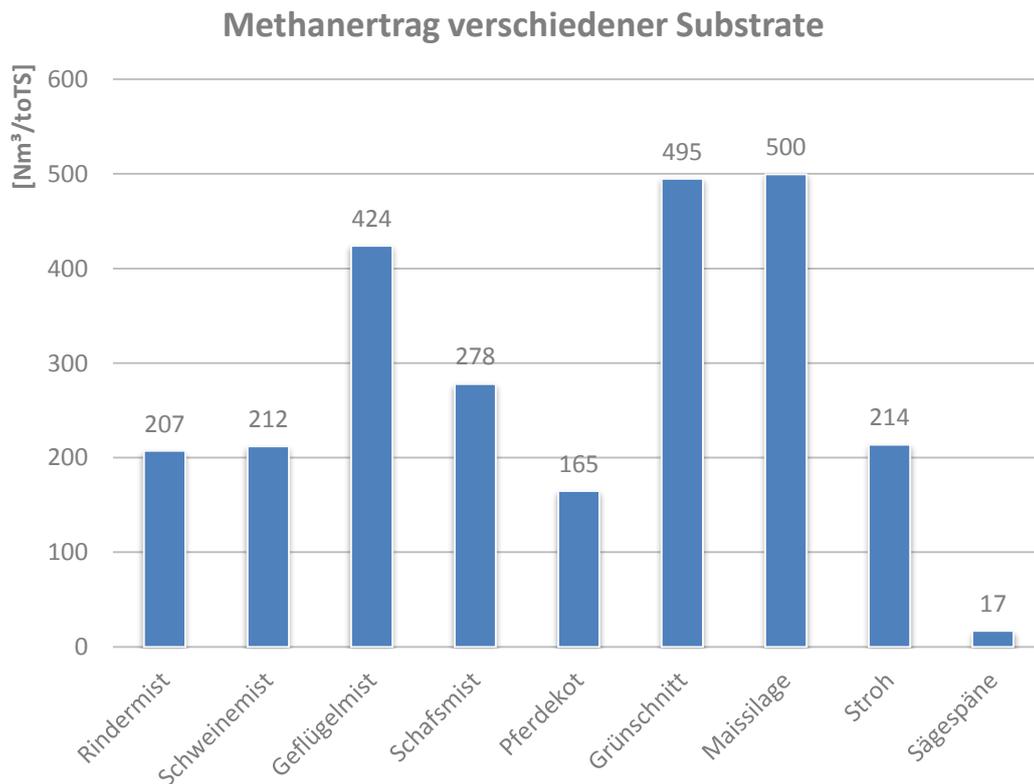


Abbildung 2: Methanerträge verschiedener Substrate, in Nm³/t oTS [17], [18], [19].

Die Abbildung zeigt einen mit Rinder- und Schweinemist vergleichbaren Methanertrag von Pferdemist. Diese Werte können sich jedoch durch die Art des Einstreumaterials deutlich verschlechtern. Es ist zu sehen, dass Sägespäne den Methanertrag erheblich verringern, wohingegen Stroh eine Erhöhung dessen zur Folge hat. In Vorarbeiten zum vorliegenden Thema von [12] wurde der überwiegende Einsatz von Sägespänen als Einstreu bei der Pferdehaltung nachgewiesen. Es konnten jedoch keine genauen Einstreuanteile im Pferdemist ermittelt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese Anteile sehr stark schwanken und somit keine gleichbleibende Substratqualität sichergestellt werden kann.

2.4.2 Einsatz von Pferdemist in Biomassefeuerungsanlagen

Die Verbrennung des anfallenden Pferdemists stellt eine weitere Verwertungsmöglichkeit dar. Ist der Mist getrocknet, lässt er sich auch ohne weiteres entzünden und verbrennen. Die dabei auftretende hohe Schadstoff-Entwicklung stellt sich jedoch als problematisch dar. Wird der Pferdemist ohne Aufbereitung einer Feuerung zugeführt, entstehen beträchtliche Mengen an umweltschädlichen Emissionen. Dies macht es unmöglich, die für Deutschland geltenden gesetzlichen Emissionsgrenzwerte bei der Verbrennung einzuhalten, siehe auch Kapitel 2.7.4. Die den Grenzwerten zu Grunde liegenden rechtlichen Rahmenbedingungen werden in einem späteren Kapitel ausführlich behandelt. Darüber hinaus hat frischer Pferdemist einen hohen Wassergehalt von bis zu 75 %. Damit ist er nur sehr schwer zu entzünden und eine effiziente Verbrennung so gut wie ausgeschlossen.

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten zur Verbrennung von Pferdemist:

- Der Pferdemist wird ohne Aufbereitung verbrannt, wie es bei den Anlagen der Firma Bioflamme GmbH in Heppenheim [20] praktiziert wird.
- Der Rohstoff wird vor dem Verbrennen getrocknet, wie es bei dem Verfahren der österreichischen Firma RTS Trocknungstechnik GmbH [21] betrieben wird.
- Der Pferdemist wird vor dem Verbrennen mechanisch Aufbereitet und getrocknet, hier ist allerdings kein kommerzieller Anbieter bekannt.

Die Systeme der Bioflamme GmbH und der RTS Trocknungstechnik GmbH werden jedoch nicht in Deutschland betrieben. Denn diese Systeme zielen auf einen dezentralen Einsatz ab und damit bewegen sie sich im unteren Leistungsbereich. In diesen Größenordnungen ist es nicht üblich, eine aufwendige Rauchgasaufbereitung zu installieren. Die Investitionskosten würden hier in keinem Verhältnis zum Nutzen der Anlage stehen. Für die zugelassenen Regelbrennstoffe ist eine Aufbereitung der Rauchgase nicht notwendig. Aufgrund der hohen Gehalte von Störstoffen wie

Stickstoff und Chlor im Pferdemit ist es nicht möglich, die Grenzwerte mit Kleinfeuerungsanlagen einzuhalten.

Im Bereich der Großfeuerungen ist in Deutschland keine Anlage bekannt, welche Pferdemit als Primärbrennstoff einsetzt. Somit sind auch in diesem Bereich nur ungenügende Daten vorhanden.

Bisher durchgeführte wissenschaftliche Untersuchungen beschränken sich auf das Bestimmen der Brennstoffeigenschaften wie Wassergehalt, Brennwert, Emissionen und Ascheerweichungspunkt. Die Untersuchungen wurden meistens im Vergleich mit anderer halmgutartiger oder allgemein anspruchsvoller Biomasse mit hohen Störstoffgehalten durchgeführt. So wurde in der Schweiz im Auftrag des Bundesamts für Energie eine Untersuchung verschiedener anspruchsvoller Biomassebrennstoffe in einem Forschungsprogramm durchgeführt [22]. In dieser Versuchsreihe wurden die grundlegenden Brennstoffeigenschaften und eventuelle Einsatzmöglichkeiten von Pferdemit, Getreideabgang und Pilzkompost in Kombination mit Holz-Hackschnitzeln untersucht.

Die Untersuchung, „Verfahren zur Herstellung von Sekundär-Brennstoffen aus getrockneter und gepresster Biomasse und Verwendung der Selben“ des Technologie- und Förderzentrums in Straubing (TFZ) [23] untersuchte den Einfluss des florafuel-Verfahrens zur Aufbereitung von anspruchsvoller Biomasse. Darunter befanden sich auch Pferdemitproben. Das Verfahren wird in Kapitel 2.6.2 genauer erläutert.

Der Vortrag „Pferdemistpellets in einer Kleinfeuerung, ein Brennstoffvergleich“ [24] von Dr. Hans Hartmann des TFZ gibt einen Überblick über die Brennstoffeigenschaften in einer Feuerung mit maximal 40 kW Feuerungswärmeleistung.

In Österreich wurde in einem sogenannten Branchenprojekt des Österreichischen Forschungsinstituts ofi eine systematische Untersuchung der Voraussetzungen zur Nutzung von Pferdemit als Brennstoff durchgeführt [25], die in der Entwicklung einer ÖNORM für Stalleinstreu [26] und einem Merkblatt des Österreichischen Kuratoriums für Landtechnik zur Nutzung von Pferdemit als Brennstoff in Biomassefeuerungen [27] mündete. Die Herstellung von Brennstoffpellets aus

landwirtschaftlicher Biomasse wurde von der sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft untersucht [28].

Tabelle 3 zeigt die ermittelten Brennstoffeigenschaften der einzelnen Untersuchungen im Vergleich zu den Werten von Holzpellets. Dabei wurden bei den Untersuchungen von Turowski et al. [23] Pferdemistproben mit Stroh und mit Sägespänen als Einstreu untersucht. Die Tabellen zeigen einen guten Heizwert von Pferdemist, aber auch einen hohen Ascheanteil sowie hohe Emissionswerte umweltschädlicher Rauchgasbestandteile.

Tabelle 3: Brennstoffeigenschaften von Pferdemist

Parameter	Heizwert H_i [MJ/kg] wf	Wasser- gehalt [%]	Aschegehalt [%] wf	Schüttdichte feucht [kg/m ³]	Brennstoff- form
[25] / [27]	17,3	59,3	4 – 9	260	frisch
[22]	19,0	69,0	8,3	250 – 350	frisch
[23] Stroh	15,6	9,2	15,6	700	Pellets
[23] Späne	15,5	9,9	17,6	700	Pellets
[29] Holz	18,6	8	1 – 1,5	650	Pellets

Die in den vorliegenden Arbeiten ermittelten Emissionswerte bei der Verbrennung von Pferdemist sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Emissionswerte bei der Pferdemistverbrennung.

Schadstoff- emission	CO [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges. C [mg/Nm ³]	SO _x [mg/Nm ³]	Staub [mg/Nm ³]
[23]Stroh	24	534	180	0,8	154	216
[23]Späne	26	558	190	1,1	110	222
[22]	57-114	176-250	22-33	-	68-181	167-248

2.5 Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften

Die Zusammensetzung und die daraus resultierenden Brennstoffeigenschaften haben einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsatzes eines Energieträgers für die thermo-chemische Umwandlung. Die Zusammensetzung unterliegt bei den biogenen Brennstoffen starken

Schwankungen. Diese Schwankungen sind nicht nur zwischen den verschiedenen Arten wie Holz- oder halmgutartiger Biomasse zu finden, sondern selbst innerhalb einer Materialcharge. Holz kann hierbei als weitestgehend homogen mit guten Brennstoffeigenschaften betrachtet werden. Durch die hohe Brennstoffqualität ist die Verbrennung als problemlos einzustufen, da keine großen Leistungsschwankungen oder Betriebsstörungen auftreten. Die Brennstoffeigenschaften von Reststoffen wie Pferdemist hingegen stellen sich, aufgrund starker Inhomogenität und starker Störstoffbelastung, oft als nicht durchweg günstig dar. Deshalb ist es von großer Bedeutung, fundierte Kenntnisse über die Zusammensetzung der Biomasse zu haben. Dies ermöglicht eine Einschätzung über die Brennstoffeigenschaften sowie der Möglichkeiten und Notwendigkeiten zur Aufbereitung der Biomasse.

2.5.1 Auswirkungen der charakteristischen Brennstoffeigenschaften

Unter Brennstoffeigenschaften werden hier die Kenngrößen, welche die Nutzung eines Stoffes als Energieträger mittels thermo-chemischer Umwandlung beeinflussen oder sogar verhindern verstanden [29]. Dazu gehören Heizwert, Wassergehalt, Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten, die flüchtigen Bestandteile und die Emissionsbildung. Die Brennstoffeigenschaften und ihre Auswirkungen sind in Tabelle 5 dargestellt und im Folgenden kurz erläutert:

Tabelle 5: Brennstofftechnische Eigenschaften und ihre Auswirkungen [29].

Brennstofftechnische Eigenschaften	Auswirkungen
Heizwert	Energieinhalt des Brennstoffs, Anlagenauslegung
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit (Verlust durch biologischen Abbau, Selbstentzündung), Brennstoffmasse, Verbrennungs-temperatur
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheerweichungsverhalten	Schlackebildung und -ablagerung, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf
flüchtige Bestandteile	Anlagenauslegung, Brennkammergeometrie
Emissionsbildung	Auslegung Rauchgasreinigung

Der **Heizwert** H_i beschreibt die Wärmemenge, welche durch eine vollständige Oxidation eines Brennstoffes freigesetzt wird. Die im Rauchgas befindliche Kondensationswärme des Wasserdampfes wird beim Heizwert nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu wird beim Brennwert H_s die Verdampfungsenthalpie mit einbezogen [30]. [31] gibt an, dass bei technischen Feuerungen das Wasser in den überwiegenden Fällen in Form von Dampf an die Umgebung abgegeben wird. Dies bedeutet, es ist lediglich die durch den Heizwert definierte Energiemenge nutzbar. Deshalb wird in dieser Arbeit der Heizwert als Grundlage der Bewertung der nutzbaren Energiemenge von Pferdemit herangezogen. Der Heizwert für den wasserfreien Brennstoff kann nach [29] wie in Gleichung (2-1) dargestellt aus den Massenanteilen der Elemente Kohlenstoff (c), Wasserstoff (h), Schwefel (s), Stickstoff (n) und Sauerstoff (o) abgeschätzt werden.

$$H_{i(wf)} = 34,8c + 93,9h + 10,5s + 6,3n - 10,8o \quad (2-1)$$

Die Gleichung (2-2) berücksichtigt den Wassergehalt (w) des eingesetzten Brennstoffs.

$$H_i = \frac{H_{i(wf)}(100 - w) - 2,443w}{100} \quad (2-2)$$

Die Konstante 2,443 stellt dabei die Verdampfungswärme des Wassers bei 25 °C in MJ/kg dar, welche benötigt wird, um Wasser vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand zu überführen. Diese kann der Wasserdampfzähler entnommen werden.

Der **Wassergehalt** w gibt an, welcher Anteil Wasser im Brennstoff sich unter definierten Umständen entfernen lässt, bezogen auf die Gesamtmasse (Summe aus trockener Masse des Brennstoffes m_B und enthaltener Wassermenge m_w), wie in Gleichung (2-3) angegeben [29].

$$w = \frac{m_w}{m_B + m_w} \quad (2-3)$$

In der Praxis wird häufig auch von Brennstofffeuchte u gesprochen. Wird von Brennstoff-Feuchte gesprochen, bezieht sich diese auf die Trockenmasse des Brennstoffs. Die Berechnung der Feuchte ist mithilfe von Gleichung (2-4) möglich.

$$u = \frac{m_w}{m_B} = \frac{w}{1-w} \quad (2-4)$$

Im weiteren Teil der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich der Wassergehalt Verwendung finden. Aus Gleichung (2-2) wird der erhebliche Einfluss des Wassergehaltes auf den Heizwert ersichtlich. Bei einem Wassergehalt von 88 % ist der Heizwert von Holz gleich Null. In diesem Fall wird die gesamte im Holz gespeicherte chemische Energie zur Verdampfung des Wassers benötigt. Abbildung 3 zeigt den Einfluss des steigenden Wassergehalts auf den Heizwert. Für die Berechnung wurde der Heizwert aus der Literatur auf wasserfreier Basis herangezogen [29]. Darüber hinaus entscheidet der Wassergehalt über Lagerfähigkeit eines Brennstoffes. Liegt der Wassergehalt über 16 Prozent, finden biologische Abbauprozesse statt. Diese haben neben einem Energieverlust auch eine Wärmeentwicklung zur Folge, welche zur Selbstentzündung des Brennstoffes führen kann [29].

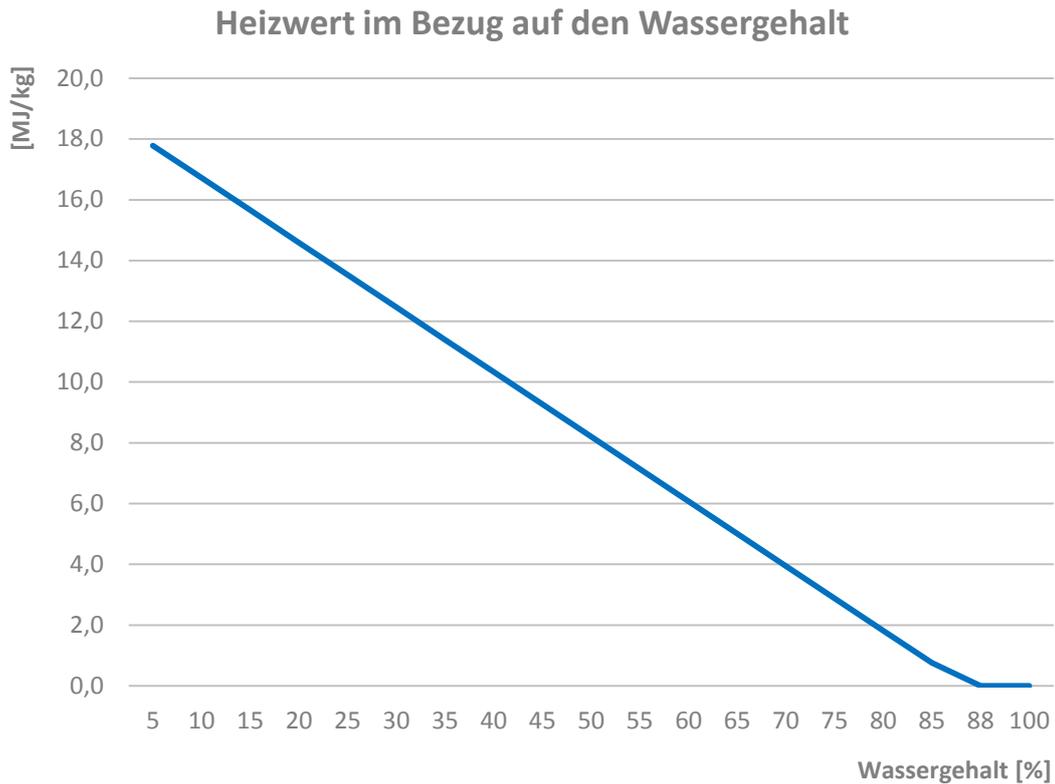


Abbildung 3: Heizwert von Holz in MJ/kg in Bezug auf den Wassergehalt in %.

Als **flüchtige Bestandteile** werden die Anteile eines biogenen Festbrennstoffes bezeichnet, welche bei der Erhitzung unter festgelegten Bedingungen als Gas entweichen. Diese Gase sind meistens leicht entzündlich und können deshalb zur Bewertung der Zündfähigkeit herangezogen werden. Bei der Auslegung der Feuerung ist darauf zu achten, dass eine ausreichende Verweildauer in der Brennkammer und eine ausreichende Sauerstoffzufuhr gewährleistet sind. Nur so ist eine vollständige Oxidation der Gase garantiert [29] [30].

Der **Aschegehalt** beschreibt die anorganischen Rückstände einer vollständigen Verbrennung. Der Aschegehalt kann durch mineralische Verunreinigungen im Brennstoff wie Steine, Sand oder Erde erhöht werden. Im Bereich der Biomassen gibt es sehr große Schwankungen den Aschegehalt betreffend. So hat Fichtenholz aufgrund seiner geringen Anteile an mineralischen Bestandteilen einen sehr geringen Aschegehalt von < 1 Prozent. Dagegen beträgt der Anteil der Asche bei Sonnenblumenstroh 12,2 Prozent [29]. Der Aschegehalt ist somit besonders zu berücksichtigen, was die Auslegung der Aschefördereinrichtungen und der Möglichkeiten und Kosten für die Entsorgung der Asche betrifft. Ein hoher

Aschegehalt wirkt sich darüber hinaus negativ auf die Staubemissionen aus. Dies erhöht die Aufwendungen im Bereich der Entstaubungsanlagen sowie der Reinigung der Wärmetauscherflächen und des Feuerungssystems [29]. Die Zusammensetzung der Asche gibt den Rahmen für die möglichen Verwertungsmöglichkeiten vor. Besitzt die Asche einen hohen Phosphor-Gehalt, kann sie zur Phosphor Rückgewinnung eingesetzt werden und so einen sinnvollen Beitrag zur Ressourcenschonung beitragen. Sind jedoch hohe Schwermetallbelastungen nachzuweisen muss sie fachgerecht entsorgt werden. Dies kann zu hohen Kosten führen.

Das **Ascheerweichungsverhalten** hat einen großen Einfluss auf die Auswahl eines geeigneten Feuerungssystems und dessen Auslegung. Liegt das Temperaturniveau in einem Kessel über dem Ascheerweichungspunkt des eingesetzten Brennstoffs kann dies zum Versintern oder gar zum völligen Schmelzen der Asche führen. Dies wiederum kann Ablagerungen im Feuerungssystem zur Folge haben, welche einen Leistungsabfall bis hin zu einem Ausfall der Anlage verursachen können. Die Einflüsse und Auswirkungen des Ascheerweichungsverhaltens sind in Kapitel 2.7.3 näher erläutert.

Die **Emissionsbildung** ist essentiell für die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Schadstoffgrenzwerte. Die bei einer Oxidation entstehenden Emissionen hängen ebenfalls von der Elementarzusammensetzung ab. Die Prozesse der Emissionsbildung zählen zu den Grundlagen der Verbrennung und werden in Kapitel 2.7 näher beschrieben.

2.5.2 Auswirkungen der physikalisch-mechanischen Eigenschaften

Über die brennstofftechnischen Eigenschaften hinaus stellen die physikalisch-mechanischen Eigenschaften weitere Qualitätsmerkmale eines Brennstoffes dar. Sie geben unter anderem Aufschluss darüber wie umfangreich eine mechanische Aufbereitung des Brennstoffes ausfallen muss. So kann es von Vorteil sein, den Brennstoff vor der Zuförderung in den Kessel zu zerkleinern. Dies soll ein Verhaken der groben Materialpartikel, auch Brückenbildung genannt verhindern, da dies den Materialfluss in der Zuförderung zum Erliegen bringen würde. Aus Gründen einer effizienten Logistik kann das Erhöhen der volumetrischen Energiedichte von Vorteil sein. Verbesserungen dieser Eigenschaften gehen mit dem Einsatz elektrischer und thermischer Energie einher. In Tabelle 6 sind die wesentlichen physikalischen und mechanischen Eigenschaften mit ihren Auswirkungen auf die Qualität eines Brennstoffes aufgeführt.

Tabelle 6: Physikalisch - mechanische Eigenschaften [29].

Physikalisch – mechanische Eigenschaften	Auswirkungen	Zugrundeliegende DIN-Norm
Stückigkeit (Abmessung, Geometrie)	Zuordnung zu mechanischen Systemen und Feuerungsanlagentypen, Aufbereitungsbedarf, Zündfähigkeit, Trocknungsvermögen	17225-6 [32], 17829 [33]
Größenverteilung/ Feinanteil	Störungen in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung, Explosionsgefahr	18846 [34]
Brückenbildungsneigung	Fließfähigkeit, Störungen bei Umschlagsprozessen und Lagerentnahme	18846 [34], 15149 [35], 15103 [36]
Schütt- bzw. Lagerdichte	Lager- Transportaufwendungen, Leistung der Förderelemente, Vorratsbehältergröße usw.	15103 [36]
Rohdichte (Teilchendichte)	Schütt- Lagerdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Brenneigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit usw.)	--
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubentwicklung, Entmischung)	17831 [37]

Für die Bestimmung dieser Eigenschaften, gibt es nicht in allen Fällen eine direkt zugrundeliegende Norm. Eine qualitative Einordnung ist in vielen Fällen durch eine Kombination genormter Messverfahren möglich. Dies ermöglicht einen Vergleich der unterschiedlichen Biomasseenergieträger. Dadurch ist eine Einschätzung der Eignung von Pferdemist als Brennstoff im Vergleich mit konventionellen Energieträgern wie Holz möglich. Dies ermöglicht eine Abschätzung des benötigten Anlagenaufwands sowie der benötigten Aufbereitung. In Kapitel 2.6.5 werden die zugrundeliegenden Normen näher erläutert.

2.5.3 Einfluss der Elementarzusammensetzung

Die Eigenschaften und damit die Eignung von Biomasse als Brennstoff wird im Wesentlichen durch seine Elementarzusammensetzung bestimmt. Dabei gilt es, zwischen den Hauptelementen und den Spurenelementen zu unterscheiden. Die Hauptelemente bezeichnen den größten Anteil an der Biomasse. Dazu gehören Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Phosphor (P), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S). Aufgrund ihres hohen Anteils an der Pflanzenmasse haben sie großen Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften. Neben den Hauptelementen sind Spurenelemente in der Biomasse enthalten. Diese gehören hauptsächlich der Gruppe der Schwermetalle an, die wichtigsten sind hierbei Cadmium (Cd), Blei (Pb), Zink (Zi). Diese sind nur in geringen Mengen enthalten, haben aber großen Einfluss auf die Verwertungsmöglichkeiten der Asche [29].

In Tabelle 7 sind die wichtigsten Elemente und Ihr Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften dargestellt.

Tabelle 7: Die wichtigsten Brennstoffelemente und deren Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften [29].

Element	Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften
Kohlenstoff (C)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf, Partikelemission
Wasserstoff (H)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Stickstoff (N)	NO _x -, N ₂ O-Emissionen
Kalium (K)	Ascherweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemission
Magnesium (Mg)	Ascherweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemission
Calcium (K)	Ascherweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemission
Schwefel (S)	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosionen, Partikelemissionen
Chlor (Cl)	Emission von HCl und halogenorganischen Verbindungen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemission
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission, z.T. katalytische Wirkung (z.B. bei PCDD/F-Bindung), Partikelemissionen

Kohlenstoff, **Wasserstoff** und **Sauerstoff** stellen die Hauptbestandteile von fester Biomasse dar. Der Kohlenstoffanteil bestimmt dabei maßgeblich die durch Verbrennung zur Verfügung stehende Energie. Wasserstoff liefert einen geringen und Sauerstoff gar keine Energie bei der Verbrennung [29]. Findet keine vollständige Verbrennung statt, bilden die Kohlenstoffrückstände Ruß. Dieser wird dann mit dem Rauchgas als Partikelbeladung mitgeführt. Ist keine Entstaubung vorhanden wird er an die Umgebung abgegeben. Dies kann zu einer erheblichen Luftverschmutzung führen [29].

Stickstoff geht bei der Verbrennung nahezu komplett in die Gasphase über. Das dabei entstehende Stickstoffoxid (NO_x) ist ein Schadstoff, dessen Ausstoß gesetzlich limitiert ist. Die Stickstoffkonzentration hängt hauptsächlich von der Art der Biomasse, dem Wachstumsstandort und der Düngung ab. Pflanzen benötigen Stickstoff zur Bildung von Eiweißproteinen. Dies führt zu einer intensiven Stickstoffdüngung bei eiweißhaltigen Futtermitteln, was hohe Stickstoffgehalte im Pflanzenmaterial zur Folge hat. Bei Gras, welches frisch oder als Heu den Hauptanteil in der Pferdefütterung ausmacht, wird hingegen nur wenig gedüngt. Aufgrund der Pflanzenstruktur ist jedoch ein deutlich höherer Wert als bei Holz zu erwarten [29].

Kalium wird bei der Verbrennung in die Gasphase überführt. Im Gaszustand können sich Alkalichloride bilden. Kondensieren diese an den Wärmetauscherflächen oder im Rauchgassystem aus, reagieren diese mit Schwefeldioxid (SO_2) zu Alkalisulfaten und elementarem Chlor (Cl_2). Das Chlor wiederum reagiert dann mit dem Eisen der Anlagenbauteile zu Eisenchlorid (FeCl_2). Die vorherrschenden Bedingungen in der Feuerung begünstigen ein Wegdiffundieren der gasförmigen Eisenchlorid-Verbindung. Kommt diese nun mit Sauerstoff in Kontakt, oxidiert das Eisen. Das Chlor ist nun wieder für die Bildung von Korrosionsprodukten frei und der Kreislauf beginnt von neuem [29].

Neben der Begünstigung der Hochtemperatur-Chlorkorrosion hat Kalium eine signifikante Auswirkung auf die Ascheerweichungstemperatur. Ein hoher Kaliumgehalt führt zu einer deutlichen Absenkung der Ascheerweichungstemperatur [29]. Dieser Zusammenhang wird durch die Gleichungen (2-74) und (2-75) beschrieben.

Bei der Verbrennung wird ein Teil des Kaliums in der Asche gebunden. Ein jedoch nicht unerheblicher Teil verflüchtigt sich und kondensiert beim Abkühlen der Rauchgase in Form von Feinpartikeln aus. Durch dieses Verhalten bei der Verbrennung hat Kalium einen negativen Einfluss auf die Partikelemissionen [29].

Calcium, Magnesium, Phosphor sind mitverantwortlich für den Düngewert einer Asche. Sind ihre Anteile hoch und die Asche nicht mit Schadstoffen belastet, eignet sich diese als Dünger [29].

Die Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium binden bei der Verbrennung erhebliche Anteile des Schwefels, welcher dadurch in der Asche verbleibt. Dies hat positive Auswirkungen auf die Schwefeldioxid (SO_2) Emissionen, da diese dadurch verringert werden [29].

Calcium erhöht zudem den Ascheerweichungspunkt. Deshalb wird es als Zuschlagstoff in Form von Kalk o.ä. eingesetzt, um den Ascheerweichungspunkt von schwierigen Brennstoffen zu erhöhen [29].

Aufgrund der hohen Anteile im Vergleich mit Magnesium und Phosphor hat Calcium hier die größte Relevanz.

Schwefel geht bei der Verbrennung ebenfalls in die gasförmige Phase über. Dabei entstehen die Verbindungen SO_2 , SO_3 und Alkalisulfate. Durch Kondensation beim

Abkühlen der Rauchgase und anschließendem Niederschlagen auf Feinstaubpartikel kann ein Großteil der Schwefelprodukte durch entsprechende Filtertechnik abgeschieden und in die Asche eingebunden werden [29].

Schwefeloxid-Emissionen sind als schädlich eingestuft und ebenfalls gesetzlich limitiert. Die Konzentration von Schwefel in der Biomasse hängt hauptsächlich von der Düngung ab. Schwefel ist ein Bestandteil von modernen Düngemitteln. Dies hat zur Folge, dass Pflanzen von gedüngten Standorten einen hohen Schwefelgehalt aufweisen. Allgemein ist der Schwefelgehalt im Vergleich zu fossilen Energieträgern bei Biomasse aber eher gering [29].

Chlor ist ebenfalls ein Bestandteil von modernen Düngemitteln und wird ebenfalls in hohem Maße von Kulturpflanzen aufgenommen. Es können jedoch auch ohne Düngung sehr hohe Konzentrationen auftreten. Weidegras weist von Natur aus einen hohen Chlorgehalt auf. Es kann jedoch auch durch Niederschläge ausgewaschen werden. So sind die Chlorkonzentrationen bei ausgewaschenem Stroh um 60 – 80 % geringer als bei frischem Stroh [29].

Durch den bei der Verbrennung entstehenden Chlorwasserstoff (HCl), sowie die Beteiligung an der Entstehung von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) muss Chlor eine angemessene Bedeutung zugeschrieben werden. Aufgrund dieser Emissionen können zusätzliche Stufen in der Rauchgasreinigung erforderlich sein. Dies gilt auch für die Feinstaubemission, da Chlor zu den aerosolbildenden Elementen zählt und somit einen Anstieg der Partikelemission bewirken kann. Chlor kann wie oben beschrieben in Verbindung mit Erdalkalimetallen und Schwefeldioxid stark korrosiv wirken.

Schwermetalle bilden den größten Teil der verbleibenden, noch nicht beschriebenen Elementen der Biomasse. Die Schwermetalle wie Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu) sind zum Teil ebenfalls Aerosolbildner, welche den Partikelaustritt erhöhen können. Einen Haupteinfluss haben sie jedoch auf die Verwertungsmöglichkeiten der Verbrennungsrückstände in Form von Asche. Zu hohe Konzentrationen verhindern den Einsatz der Asche als Dünger, da Schwermetalle als umweltschädlich gelten.

Tabelle 8: Typische Elementgehalte von Biomasse-Brennstoffen im Vergleich zu Steinkohle [29]. Angaben in % der Trockenmasse.

Brennstoff	C	H	O	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl
Steinkohle	72,5	5,6	11,1	1,3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,94	<0,13
Fichte (Waldrestholz)	49,3	6,1	41,8	0,38	0,18	0,34	0,05	0,03	0,03	0,02
Rinde (Nadelholz)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	1,27	0,14	0,05	0,085	0,019
Roggenstroh	46,6	6,0	42,1	0,55	1,68	0,36	0,06	0,15	0,085	0,40
Weizenstroh	45,6	5,8	42,4	0,48	1,01	0,31	0,10	0,10	0,082	0,19
Miscanthus	47,5	6,2	41,7	0,73	0,72	0,16	0,06	0,07	0,15	0,22
Straßengrasschnitt	37,1	5,1	33,2	1,49	1,30	2,38	0,63	0,19	0,19	0,88
Pferdemist	41,3	5,62	36,3	1,1	1,05	1,49	0,47	0,23	0,21	0,79

2.6 Verbesserung der Brennstoffeigenschaften anspruchsvoller Biomasse durch Aufbereitung

Eine Aufbereitung von Biomasse mit dem Ziel der Verbesserung der Brennstoffeigenschaften kann Probleme wie die Bildung schädlicher Emissionen verringern. So können wie oben beschrieben Störstoffgehalte vor der Verbrennung abgesenkt werden. Eine wirkungsvolle Aufbereitung verringert den Anlagenaufwand für Feuerungstechnik und Rauchgasaufbereitung, da das Entstehen von Schadstoffverbindungen von vorneherein verringert wird. Dies führt im Idealfall zu einem geringeren Anlagenaufwand. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren vorgestellt.

2.6.1 Forschungsvorhaben der Hochschule Rosenheim

Im Forschungsvorhaben „Biomassepellets aus Pferdemist“ (FKZ: 03FH011I2) wurden die Möglichkeiten zur kommerziellen Nutzung von Pferdemist als Primärenergieträger in Biomassekraftwerken untersucht. Ein Teilprojekt befasste sich mit der mechanischen Aufbereitung von Pferdemist. Vorgabe war die Entwicklung und Erprobung eines effizienten und kostengünstigen Verfahrens zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften von Pferdemist. Im Laufe des

Forschungsvorhabens wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit erste Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt. Da diese Untersuchungen durchweg positiv ausfielen, wurden sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und untersucht, ob sie für eine industrielle Anwendung ebenfalls geeignet sind. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in 4 Kapitel dargestellt.

2.6.2 Florafuel Verfahren

Das florafuel-Verfahren wurde zur Herstellung von Pellets und Briketts aus feuchter Biomasse entwickelt. Dabei werden unter anderem Gras, Laub und Silage in mehreren Schritten aufbereitet. Die Aufbereitung dient der Verbesserung der Brennstoffeigenschaften.

Das Material wird bei diesem Verfahren vorher sortiert, zerkleinert und mechanisch entwässert [38]. Der durch das Entwässern erhaltene Presssaft kann als Dünger oder als Gärsubstrat verwendet werden. Laut [38] können so die für die Verbrennung bedenklichen Stoffe erheblich abgesenkt werden. Tabelle 9 zeigt die von [38] angegebenen Werte bezüglich der Absenkung dieser Stoffe.

Dabei entsprechen die angegebenen Werte einer Senkung um den jeweiligen Prozentsatz.

Tabelle 9: Absenkung der Störstoffgehalte durch den Einsatz des florafuel - Verfahrens [38].

Biomasse	Chlor	Kalium	Stickstoff
Gras	89,80 %	57,20 %	40,00 %
Straßenbegleitgrün	96,80 %	84,50 %	27,80 %
Laub	62,40 %	24,90 %	0,00 %

Die benötigte Energie für die gesamte Aufbereitung der Biomasse liegt bei rund 28 % der aus den Pellets thermisch nutzbaren Energie. Da für die Verbrennung auch die Ascheerweichungstemperatur liegt laut [38] bei 1000 – 1400 °C.

In Abbildung 4 ist das florafuel-Verfahren dargestellt.

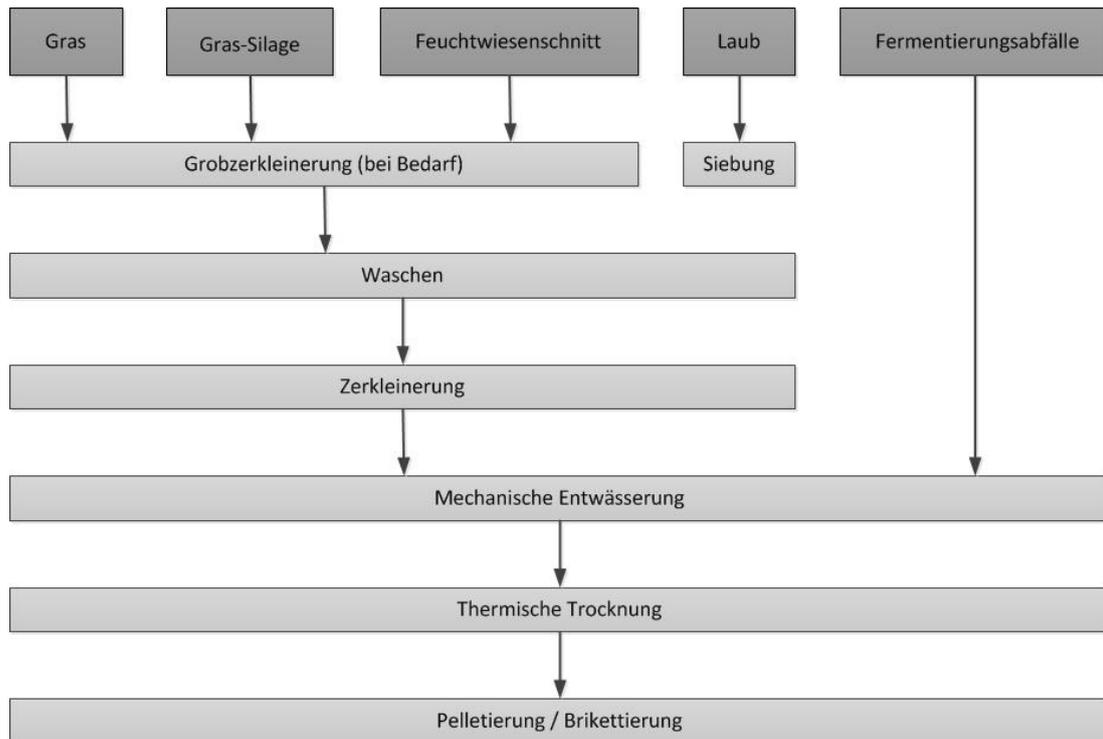


Abbildung 4: Schematische Darstellung des florafuel - Verfahrens. [39]

2.6.3 Das Scheffler Konzept

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen wurde das Scheffler – Konzept entwickelt. Das Konzept wurde speziell für Biogasanlagen entwickelt, deren Standort für den Anschluss an ein Wärmenetz ungeeignet sind. Es zielt darauf ab, die entstehende Abwärme des Verstromungsprozesses zur Herstellung eines Festbrennstoffes zu nutzen. In diesem Verfahren wird die silierte Energiepflanze mechanisch entwässert und der Presssaft in der Biogasanlage vergoren. Der Presskuchen wird getrocknet und zu Briketts oder Pellets verpresst. Diese können nun in Biomassefeuerungen verbrannt werden. Genaue Angaben zu Störstoffbelastungen vor und nach dem mechanischen Entwässern werden nicht gemacht. Ein Reinigen der Biomasse von Sand und Steinen ist nicht vorgesehen [40].

Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau des Verfahrens.

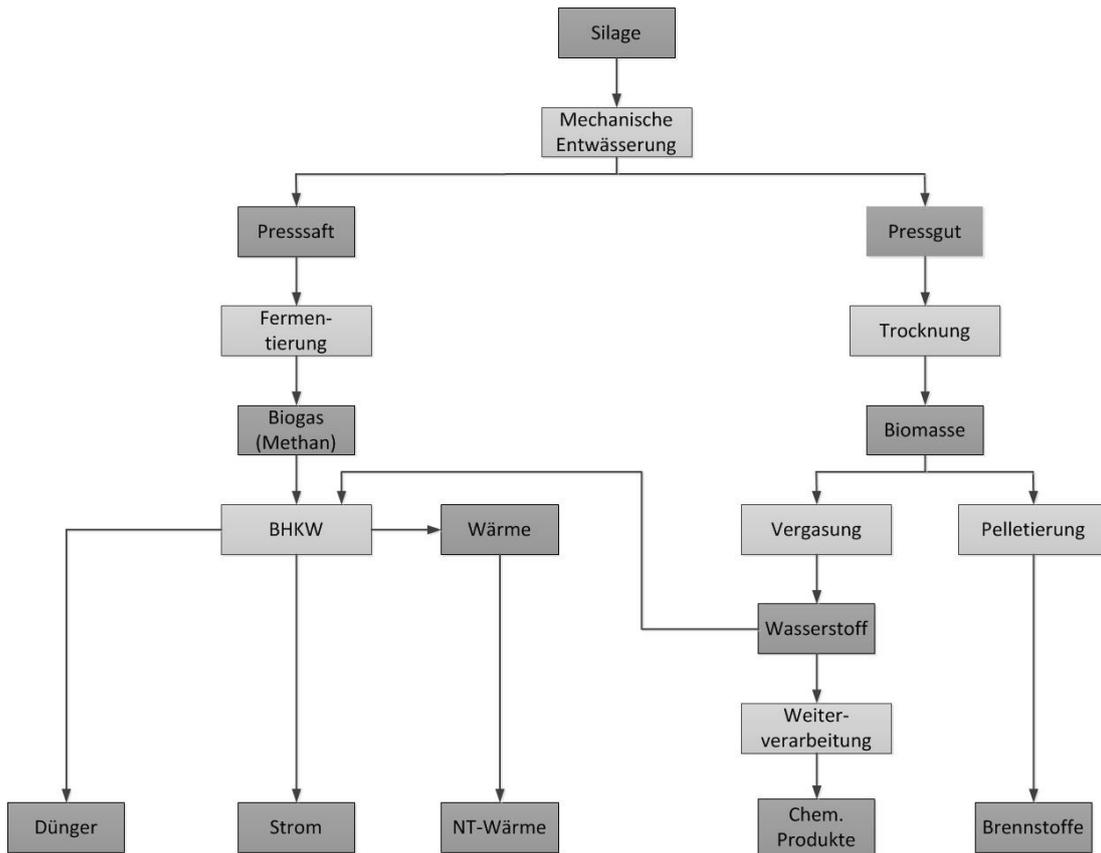


Abbildung 5: Ablaufdiagramm Scheffler - Verfahren [40].

2.6.4 Verfahren zur Nassmechanischen Trennung von Biomasse und Inertstoffen

Dieses Verfahren wurde von der Firma EcoEnergy entwickelt. Es kommt bei der Aufbereitung von Abfällen zum Einsatz. Ziel ist es, verschiedene, individuell verwertbare Reststoffgruppen zu erzeugen. So sollen zum einen Kies, Sand und Steine zur stofflichen Nutzung abgetrennt werden. Zum anderen sollen biogene Reststoffe und Kunststoffe zur stofflichen oder energetischen Verwertung abgetrennt werden. Die Aufbereitung erfolgt in vier Stufen. Dabei wird der Abfall mit Kreislaufwasser versetzt und dann in den ersten drei Stufen die Organik und Kunststofffragmente ausgesiebt und wieder entwässert. In der vierten Stufe erfolgt eine anaerobe Abwasserreinigung. Am Ende entstehen die Fraktionen Kunststoffe, BioFluff (native Organik), Abwasser, Kies, Steine und Sand. BioFluff stellt dabei die Fraktion dar, welche danach als Substrat in Biogasanlagen oder als Festbrennstoff verwendet werden kann [41].

Abbildung 6 zeigt das Verfahrensschema mit den einzelnen Aufbereitungsstufen.

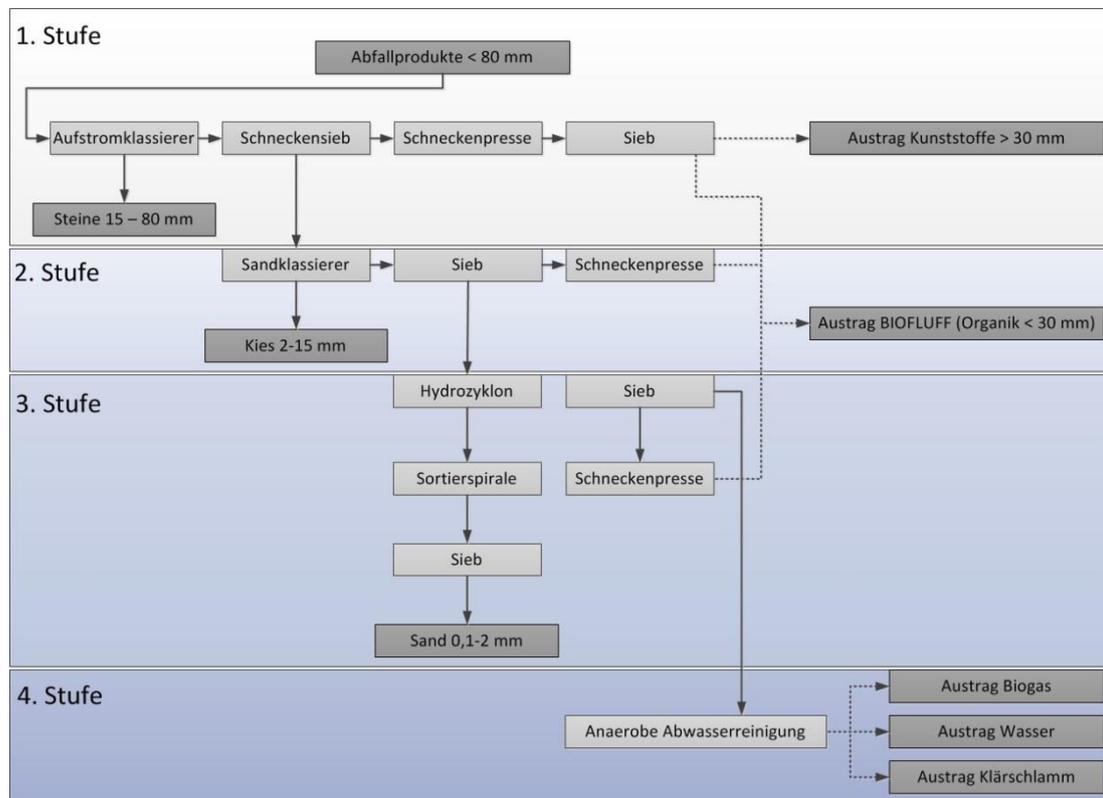


Abbildung 6: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild NMT - Verfahren [41].

2.6.5 Grundlagen und Anforderungen bei der Pelletherstellung

Für die Produktion von Brennstoffpellets gelten in den Normen DIN EN ISO 17225-1, 2, 6 [42], [43], [32] festgelegte Anforderungen. Neben Stabilität und mechanischer Abriebsfestigkeit spielen auch Wassergehalt, Emissionsverhalten, Heizwert und Ascheanteil eine entscheidende Rolle. Die in der Praxis hauptsächlich eingesetzten Brennstoffpellets sind Holzpellets aus naturbelassenem Sägerestholz. Die Produktionslinien bestehen üblicherweise aus folgenden Anlagenkomponenten: Die **Annahmeeinrichtung** in Form eines Schubbodens oder ähnlichem dient zur Übergabe des Rohmaterials in die Pelletierlinie. Werden Späne aus einem Sägewerk oder anderen Holzver- oder bearbeitenden Betrieben in den Prozess eingeführt, kann diese Einrichtung entfallen. Stattdessen werden die Späne in Silos zwischengelagert.

Ein **Abscheidesystem** für Metall und andere Fremdkörper ist unbedingt notwendig, um eine Beschädigung der nachfolgenden Anlagenkomponenten zu verhindern. Das Abscheiden von Fremdkörpern wird in der Praxis von Metall und Schwergutabscheidern übernommen.

Die **Hammermühle** zerkleinert und homogenisiert das Rohmaterial auf eine definierte Größe. Die Hammermühle wird je nach Art und Beschaffenheit des Rohmaterials vor oder nach dem Trockner eingesetzt. Wird die Hammermühle vor dem Trockner eingesetzt, besteht der Vorteil in der Vergrößerung der Oberfläche und damit einhergehend einer Effizienzsteigerung des Trocknungsprozesses. Der Nachteil dieser Anordnung ist der erhöhte Energiebedarf der Hammermühle. Diese Anordnung findet hauptsächlich bei dem Einsatz von grobem Material Anwendung. Liegt bereits feines Material in Form von Sägespänen oder ähnlichem vor wird die Hammermühle hinter dem Trockner platziert. In diesem Fall dient die Zerkleinerung dem Sicherstellen einer gleichbleibenden Qualität der Pellets und der Durchsatzsteigerung der Pelletpresse.

Der **Trockner** stellt den Hauptenergieverbraucher in der Pelletproduktion dar. Dies resultiert aus dem hohen thermischen Energiebedarf bei der Trocknung. Deshalb kommt der Effizienz des Trockners eine große Bedeutung zu. In der Praxis werden hauptsächlich zwei Trocknungssysteme eingesetzt:

Trommeltrockner sind beheizte Zylinder, durch die das Trocknungsgut mithilfe von Leitblechen durchgeführt und ständig durchmischt wird. Die Energiequelle wird durch Abgase aus einem Verbrennungsprozess dargestellt. Dies können Abgase aus einem Kraftwerk oder aus einem speziell für die Trocknung betriebenen Verbrennungsprozess sein. Die Vorteile dieses System liegen im geringen Platzbedarf bei hohen Durchsätzen und der Möglichkeit, heiße Abgase aus Verbrennungsprozessen zu nutzen.

Weit verbreitet sind mittlerweile auch Niedertemperaturbandtrockner. Bei diesem System wird das Trocknungsgut auf ein perforiertes Trocknungsband aufgebracht und mit warmer Luft durchströmt. Dabei findet eine konvektive Trocknung statt. Die Energie wird hier in der Regel durch die Abwärme aus Biomassekraftwerken bereitgestellt. Die Vorteile dieser Technik liegen in der hohen Effizienz und in der Möglichkeit, Niedertemperaturquellen zu nutzen.

Die Aufgabe der Trocknung im Pelletierprozess ist das Bereitstellen eines Produkts mit stabilem Ausgangswassergehalt. Ein untertrocknetes Material lässt sich eben so wenig zu stabilen Pellets pressen wie ein übertrocknetes Material.

Der **Konditionierer** bietet die Möglichkeit zur Zugabe von Wasser, Dampf oder Presshilfsmitteln. Die Zugabe von Wasser und Dampf ist bei zu trockenem Material erforderlich. Presshilfsmittel wie Pflanzenstärke begünstigen die Stabilität der Pellets, da sie als Bindemittel wirken [44]. Dies ist besonders nach der Trocknung mit hohen Temperaturen in Trommeltrocknern erforderlich. Bei den hohen Temperaturen verliert das holzeigene Bindemittel Lignin seine Struktur und Wirkung.

Die **Pelletpresse** ist als Ring- oder Flachmatritzenpresse ausgeführt. Die Funktionsweise basiert dabei unabhängig von der Bauweise auf demselben Prinzip. Das Material wird durch Löcher in der Matrize gepresst und dabei stark verdichtet. Die dabei entstehenden hohen Temperaturen von bis zu 120 °C sorgen für die Aktivierung der Bindewirkung des Lignis oder der Presshilfsmittel. Durch die Bohrungsgeometrien in den Matrizen werden die erforderlichen Eigenschaften der Pellets beeinflusst. Dabei spielt die Stärke der Verdichtung, welche durch das in Gleichung (2-5) dargestellte Verhältnis von Presskanal-Durchmesser und Presskanal-Länge bestimmt wird eine entscheidende Rolle [45].

$$d_{\text{Kanal}} / L_{\text{Kanal}} \quad (2-5)$$

Je kleiner das Verdichtungsverhältnis und damit länger der Presskanal, desto höher die Verdichtung und damit einhergehend die physikalische Pelletqualität. Jedoch steigt damit aber auch der spezifische Energiebedarf und es sinkt der Durchsatz. Dies erfordert eine ideale Abstimmung der Bohrungsgeometrien auf das zu pressende Produkt [45].

Der **Kühler** senkt die Temperatur der Presslinge nach dem Austritt aus der Presse knapp über die Umgebungstemperatur. Dadurch härtet das Bindemittel aus und die Pellets bleiben in Form und sind stabil.

Ein **Sieb**, welches entweder im Kühler integriert oder diesem nachgeschaltet ist, dient zum Abscheiden des nicht verpressten Materials. Dieser Feinanteil wird dem Produktionsprozess erneut zugeführt.

Fördersysteme und **Lagerbehälter** verbinden die einzelnen Anlagenkomponenten miteinander. Die Lagerbehälter dienen dabei als Puffer zwischen den einzelnen Stationen um eine gleichmäßige Auslastung sicherzustellen und Betriebsstörungen und -unterbrechungen zu vermeiden.

Der Produktionsprozess ist in Abbildung 7 beispielhaft dargestellt.

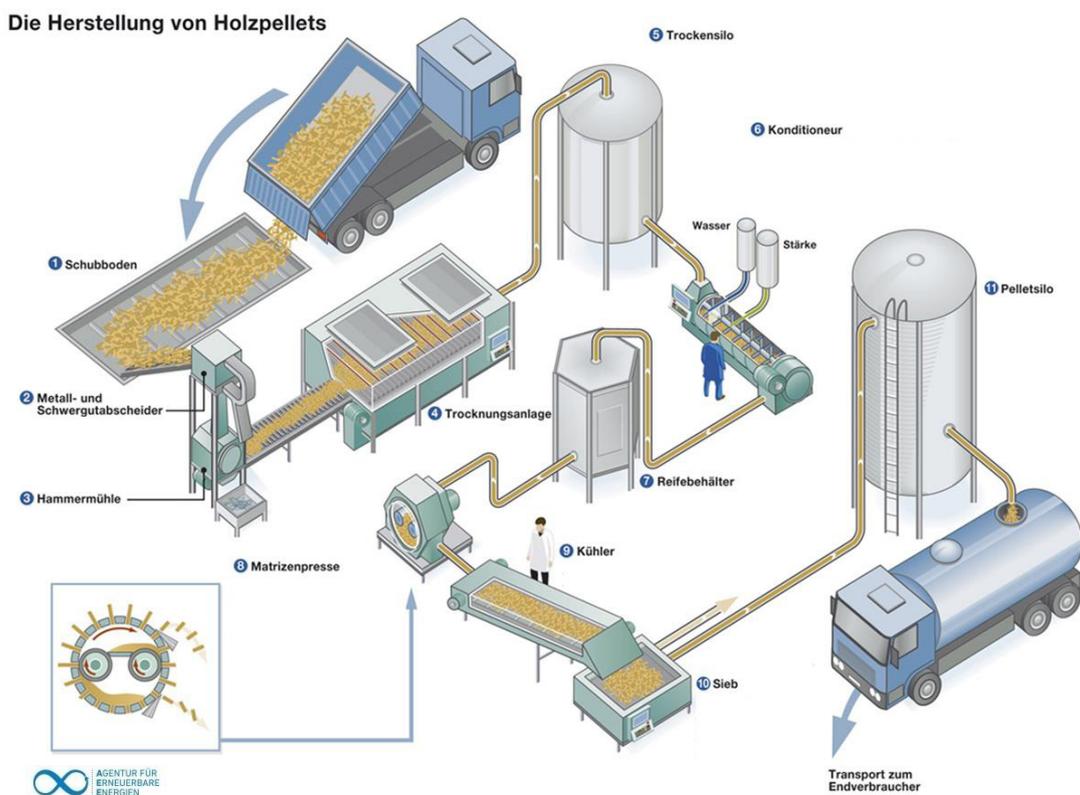


Abbildung 7: Beispiel für den Aufbau einer Pelletierlinie mit einer Ringmatrizenpresse [46].

Für eine abschließende Bewertung der Eignung von Pferdemist als Brennstoff ist ein Vergleich mit den verfügbaren Regelbrennstoffen, speziell Holzpellets erforderlich. Um hier einen belastbaren Vergleich führen zu können, müssen die physikalischen Eigenschaften der erzeugten Pellets möglichst gleich sein. Um dies zu gewährleisten, wurden die Normen DIN EN 17225-2 [43] und DIN EN 17225-6 [32] als Grundlage für die zu erzielenden physikalischen Eigenschaften zugrunde gelegt. Diese Normen legen neben den Dimensionen auch Parameter wie Wassergehalt,

Aschegehalt oder Abriebsfestigkeit fest. In Tabelle 10 sind die in den Normen festgelegten Anforderungen aufgeführt.

Tabelle 10: Physikalische Anforderungen an Brennstoffpellets nach Norm [43], [32].

Anforderung	Einheit	DIN EN ISO 17225-2		DIN EN ISO 17225-6
		gewerblich und häuslicher Bereich	industrielle Verwendung	
Durchmesser, D	mm	D06, 6 ± 1 mm	D06, 6 ± 1 mm	D06 bis D25, D ± 1
Länge, L	mm	3,15 < L ≤ 40	3,15 < L ≤ 40	3,15 < L ≤ 40
Mechanische Festigkeit, DU	m-%	DU97,5 ≥ 97,5	97,5 ≤ DU ≤ 99,0	97,5 ≤ DU ≤ 99,0
Feingutanteil, F	m-%	F1,0 ≤ 1,0	F4,0 ≤ 4,0	F4,0 ≤ 4,0
Schüttdichte, BD	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
Wassergehalt, M	m-%	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M12 ≤ 12
Aschegehalt, A	m-%, wf	A0,7 ≤ 0,7	A1,0 ≤ 1,0	A6,0 ≤ 6
Additive	m-%	≤ 2	> 3	≤ 5
Heizwert, Q	MJ/kg	Q16,5 ≥ 16,5	Q16,5 ≥ 16,5	Q14,5 ≥ 14,5

In den Normen sind außer den physikalischen Eigenschaften, welche neben der Beschaffenheit des Rohmaterials hauptsächlich von dem Produktionsprozess abhängen, auch Grenzen für die enthaltenen Elemente und Spurenelemente angegeben. Diese Grenzwerte sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Grenzwerte für Haupt- und Spurenelemente nach Norm [43], [32].

Anforderung	Einheit	DIN EN ISO 17225-2 gewerblich und häuslicher Bereich	DIN EN ISO 17225-2 industrielle Verwendung	DIN EN ISO 17225-6
Stickstoff, N	m-%, wf	N0.3 ≤ 0,3	N0.3 ≤ 0,3	N1.5 ≤ 1,5
Schwefel, S	m-%, wf	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.20 ≤ 0,20
Chlor, Cl	m-%, wf	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03	Cl0.10 ≤ 0,10
Arsen, As	mg/kg, wf	≤ 1	≤ 2	≤ 1
Cadmium, Cd	mg/kg, wf	≤ 0,5	≤ 1	≤ 0,5
Chrom, Cr	mg/kg, wf	≤ 10	≤ 15	≤ 50
Kupfer, Cu	mg/kg, wf	≤ 10	≤ 20	≤ 20
Blei, Pb	mg/kg, wf	≤ 10	≤ 20	≤ 10
Quecksilber, Hg	mg/kg, wf	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel, Ni	mg/kg, wf	≤ 10	--	≤ 10
Zink, Zn	mg/kg, wf	≤ 100	≤ 200	≤ 100

Die Absenkung der Störstoffgehalte muss wie oben beschrieben vor dem Trocknen und Pressen erfolgen. In den Prozessschritten Trocknen und Pelletieren können ausschließlich die physikalischen Eigenschaften signifikant beeinflusst werden. Wie in Kapitel 2.5.2 dargestellt beeinflussen diese Eigenschaften den effizienten Einsatz des Brennstoffes.

Positiv beeinflussen lassen sich diese Eigenschaften durch das Einhalten eines Wassergehaltes von 11 – 13 % vor dem Pressen [47]. Das Wasser wirkt dabei zum einen unterstützend auf die Wirkung der Bindemittel und darüber hinaus als Gleitmittel in der Matrize. Ein zu hoher Wassergehalt führt jedoch zu instabilen Pellets. Die richtige Auswahl der Bohrungsgeometrie der Presskanäle führt ebenfalls zu einer hohen Pelletsqualität. Die Zugabe von Presshilfsmittel stellt ebenfalls eine Möglichkeit zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften von Pellets dar.

2.6.6 Energiebedarf bei der Brennstoffaufbereitung

Die Aufbereitung von Brennstoffen ist zwangsläufig mit dem Einsatz von Energie verbunden. Dies beginnt bei der Bereitstellung des Rohstoffs und gilt für alle

Produktionsprozesse bis hin zur Logistik. Im Rahmen dieser Arbeit liegt das Augenmerk auf der eigentlichen Aufbereitung des Brennstoffes. Betrachtet werden deshalb ausschließlich die technischen Maßnahmen zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften und die Pelletierung. In diesen Verfahrensschritten wird sowohl thermische wie auch elektrische Energie benötigt.

Thermische Energie muss ausschließlich für die Trocknung aufgewendet werden. Ausschlaggebend für den Energieaufwand sind zum einen der Wassergehalt des Rohmaterials und zum anderen die Effizienz des Trockners. Messungen im Rahmen dieser Arbeit an einem Industriebandtrockner der Stela Laxhuber GmbH ergaben im Mittel einen Energiebedarf von 1 kWh/kg verdampftem Wasser. Ausgehend von diesem Wert zeigt Abbildung 8 den Energiebedarf für die Trocknung in Abhängigkeit des Eingangswassergehaltes. Die Werte beziehen sich auf einen in der Praxis weit verbreiteten Niedertemperaturbandtrockner und einen Ausgangswassergehalt von 12 %, berechnet wurde der Energiebedarf für eine Tonne trockenes Material bei Sommerbetrieb mit 10 °C Umgebungstemperatur.

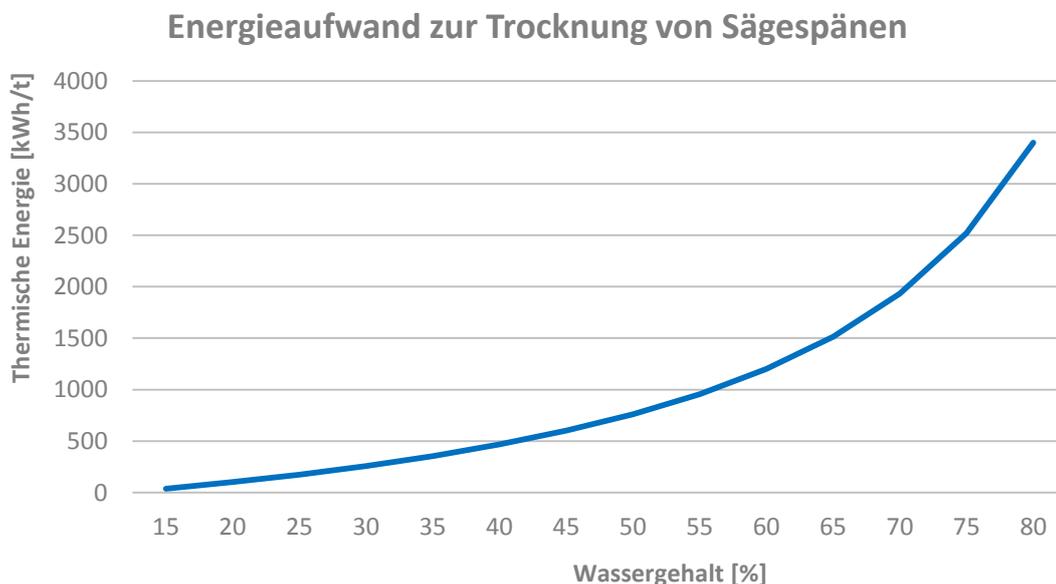


Abbildung 8: Energieaufwand zur Trocknung von einer Tonne Sägespäne in Abhängigkeit des Eingangswassergehaltes und Trocknung auf 12 % Ausgangswassergehalt. Angaben bezogen auf die Produktion einer Tonne trockenen Materials bei Sommerbetrieb und 10 °C Umgebungstemperatur.

Das Diagramm zeigt deutlich den starken Anstieg des Energiebedarfs bei steigendem Eingangswassergehalt. Somit stellt der Wassergehalt einen entscheidenden Faktor bezüglich der Wirtschaftlichkeit für den Einsatz eines

Brennstoffes dar. Die Abbildung zeigt auch, wie wichtig eine hohe Effizienz des Trocknungssystems ist. Theoretisch lässt sich die Effizienz durch eine Vergrößerung der Austauschfläche für die Wärmeenergie zwischen Trocknungsluft und Trocknungsgut steigern. Der Einfluss der Austauschfläche ist in Gleichung (2-6) dargestellt [48] [49].

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_{Lu,tr} - \vartheta_{G,O}) \quad (2-6)$$

mit:

\dot{Q}	übertragener Wärmestrom von Luft auf Gut
α	Wärmeübergangskoeffizient
A	Austauschfläche zwischen Trocknungsluft und -gut
$\vartheta_{Lu,tr}$	Trocknungslufttemperatur
$\vartheta_{G,O}$	Oberflächentemperatur des Guts im Trockenraum

Es ist zu sehen, dass die Einflussgrößen aus dem Temperaturgefälle und der Austauschfläche bestehen. Die Austauschfläche wird im Fall der Trocknung durch die Trocknungsgutoberfläche beschrieben. Die Trocknungslufttemperatur kann nur in einem begrenzten Rahmen beeinflusst werden. Dies gilt insbesondere bei der Nutzung von Abwärme von Kraftwerken oder Industrieprozessen unter Einsatz von Niedertemperaturbandtrocknern. Das Temperaturniveau ist hier durch technische Grenzen, Sicherheitsaspekte und die zur Verfügung stehenden Wärmequelle begrenzt. Eine Vergrößerung der Trocknungsgutoberfläche ist jedoch durch eine Zerkleinerung des Rohmaterials in großem Maße möglich. Allerdings muss der Energieaufwand für die Zerkleinerung der thermischen Energieeinsparung gegenübergestellt werden um ein Optimum bestimmen zu können.

Um den Energiebedarf für die Trocknung ermitteln zu können, ist es notwendig, den Durchsatz zu messen. Das Standardvorgehen wäre hier das Auswiegen des Rohmaterials und/oder des getrockneten Materials. Durch Messen des Ein-

Ausgangswassergehalts sowie der eingesetzten thermischen Energie kann der Energiebedarf ermittelt werden. Dies bedarf jedoch einer entsprechenden Wägetechnik. Darüber hinaus entstehen Ungenauigkeiten durch Effekte wie hängen bleiben von Material an Fördereinrichtungen, Leckagen und Austrag über die Abluft. Damit stellt das Wiegen einen erheblichen finanziellen und personellen Zusatzaufwand dar. Eine Alternative bietet sich durch das Bestimmen der Verdampfungsrate. Wird zusätzlich der Ein- und Ausgangswassergehalt gemessen, können alle benötigten Massenströme berechnet werden. Die Funktionsweise und Genauigkeit dieses Ansatzes wurde durch eine Masterarbeit [50] überprüft. Die Arbeit zeigt eine sehr hohe Genauigkeit dieses Ansatzes. Weiterführende Angaben dazu sind in Kapitel 0 aufgeführt. Die theoretischen Grundlagen bilden folgende Zusammenhänge.

Mit der in Gleichung (2-7) angegebenen Definition der Verdampfungsrate wird ersichtlich, dass die Wassermassenströme in Zu- und Abluft bestimmt werden müssen.

$$\dot{m}_{Lu,W,des} = \dot{m}_{Lu,W,ab} - \dot{m}_{Lu,W,zu} \quad (2-7)$$

mit:

$\dot{m}_{Lu,W,des}$	Verdampfungsrate
$\dot{m}_{Lu,W,ab}$	Masse Wasser in der Abluft
$\dot{m}_{Lu,W,zu}$	Masse Wasser in der Zuluft

Dafür muss zunächst die Wasserbeladung pro Kubikmeter Luft berechnet werden. Diese wird dann mit dem gemessenen Volumenstrom multipliziert. Dies gilt sowohl für die Zu – und Abluft. Die Wasserbeladung berechnet sich aus dem Massenstrom der Zu- und Abluft aus Gleichung (2-8). Da der Differenzdruck gegenüber dem Umgebungsdruck verschwindend gering ist, wird der statische Druck im System näherungsweise durch den Normdruck angegeben.

$$x = \frac{\dot{m}_{Lu,W}}{\dot{m}_{Lu,tr}} = \frac{M_W}{M_{Lu,tr}} \cdot \frac{p_W}{p_N - p_W} \quad (2-8)$$

mit:

x	Wassergehalt der Luft
$\dot{m}_{Lu,W}$	Masse Wasserdampf in der Luft
$\dot{m}_{Lu,tr}$	Masse der trockenen Luft
M_W	molare Masse von Wasser
$M_{Lu,tr}$	molare Masse der trockenen Luft
p_W	Partialdruck des Wasserdampfs
p_N	Normdruck

Die Berechnung des benötigten Partialdrucks von Wasser erfolgt mit Gleichung (2-9).

$$p_W = \varphi_{Lu} \cdot p_s(\vartheta_{Lu}) \quad (2-9)$$

mit:

φ_{Lu}	relative Luftfeuchte
p_s	Dampfdruck von Wasser
ϑ_{Lu}	Temperatur der Luft

Der Dampfdruck von Wasser wird über die IAWPS-IF97 Näherungsgleichung bestimmt [51]. Gleichung (2-10) zeigt die Formel umgestellt nach dem Sättigungsdampfdruck.

$$p_s = \left[\frac{2 \cdot C}{-B + (B^2 - 4 \cdot A \cdot C)^{\frac{1}{2}}} \right]^4 \quad (2-10)$$

Die Koeffizienten A, B, und C werden dabei über die Temperatur mit den Gleichungen (2-11) - (2-13) berechnet:

$$A = \vartheta^2 + n_1 \cdot \vartheta + n_2 \quad (2-11)$$

$$B = n_3 \vartheta^2 + n_4 \cdot \vartheta + n_5 \quad (2-12)$$

$$C = n_6 \vartheta^2 + n_7 \cdot \vartheta + n_8 \quad (2-13)$$

mit:

n_1	$0,116\ 705\ 214\ 527\ 67 \cdot 10^4$
n_2	$-0,724\ 213\ 167\ 032\ 06 \cdot 10^6$
n_3	$-0,170\ 738\ 469\ 400\ 92 \cdot 10^2$
n_4	$0,120\ 208\ 247\ 024\ 70 \cdot 10^5$
n_5	$-0,323\ 255\ 503\ 223\ 33 \cdot 10^7$
n_6	$0,149\ 151\ 086\ 135\ 30 \cdot 10^2$
n_7	$-0,482\ 326\ 573\ 615\ 91 \cdot 10^4$
n_8	$0,405\ 113\ 405\ 420\ 57 \cdot 10^6$

Damit kann mit Gleichung (2-14) das spezifische Volumen berechnet werden. Dessen Kehrwert stellt die Dichte der feuchten Luft dar. Gleichung (2-15) zeigt diesen Zusammenhang.

$$v_{1+x,Lu} = \left(\frac{R}{M_{Lu,tr}} + x_{Lu} \cdot \frac{R}{M_W} \right) \cdot \frac{\vartheta_{Lu}}{p_N} \quad (2-14)$$

mit:

$v_{1+x,Lu}$	spezifisches Volumen der feuchten Luft
R	universelle Gaskonstante
$\rho_{x,Lu}$	Masse Wasser pro Kubikmeter Luft

$$\rho_{1+x,Lu} = \frac{1}{v_{1+x,Lu}} \quad (2-15)$$

mit:

$\rho_{1+x,Lu}$	Dichte der feuchten Luft
-----------------	--------------------------

Mit der Dichte und der Wasserbeladung lässt sich, wie in Gleichung (2-16) dargestellt, die Masse des Wassers pro Kubikmeter Luft bestimmen.

$$\rho_{x,Lu} = x_{Lu} \cdot \rho_{1+x,Lu} \quad (2-16)$$

mit:

$$\rho_{x,Lu} \quad \text{Masse Wasser pro Kubikmeter feuchter Luft}$$

Mit Gleichung (2-17) kann nun mithilfe des Volumenstroms der Massenstrom berechnet werden.

$$\dot{m}_{Lu,W} = \dot{V}_{Lu} \cdot \rho_{x,Lu} \quad (2-17)$$

mit:

$$\dot{V}_{Lu} \quad \text{Luft Volumenstrom}$$

Werden die Gleichungen (2-8) bis (2-17) jeweils für die Zu- und Abluft berechnet und die Werte in Gleichung (2-7) eingesetzt, erhält man die Verdampfungsrate. Mit der Verdampfungsrate und dem Eingangs- und Ausgangswassergehalt lassen sich mit den folgenden Gleichungen der Input sowie der Output berechnen.

Mit den Gleichungen (2-18) und (2-19) lässt sich jeweils der Trockensubstanzanteil bei gegebenem Eingangs- oder Ausgangswassergehalt berechnen.

$$m_{tr} = m_{ein} \cdot (1 - w_{ein}) \quad (2-18)$$

$$m_{tr} = m_{aus} \cdot (1 - w_{aus}) \quad (2-19)$$

mit:

$$m_{tr} \quad \text{Masse Trockensubstanz}$$

$$m_{ein} \quad \text{Masse Materialeingang Trockner}$$

m_{aus}	Masse Materialausgang Trockner
w_{ein}	Eingangswassergehalt
w_{aus}	Ausgangswassergehalt

Sind entweder der Input oder Output und der dazugehörige Wassergehalt bekannt, kann mithilfe der Gleichungen (2-20) und (2-21) über den Zwischenschritt der oben gezeigten Berechnung die fehlende Größe berechnet werden.

$$m_{\text{aus}} = \frac{m_{\text{tr}}}{(1 - w_{\text{aus}})} \quad (2-20)$$

$$m_{\text{ein}} = \frac{m_{\text{tr}}}{(1 - w_{\text{ein}})} \quad (2-21)$$

Die Masse des während der Trocknung ausgetragenen Wassers lässt sich bei gegebenem Input und Output mit Gleichung (2-22) berechnen.

$$m_{\text{Lu,W,des}} = m_{\text{ein}} - m_{\text{aus}} \quad (2-22)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2-20) bis (2-22) und Auflösen nach m_{ein} erhält man die Gleichung (2-23).

$$m_{\text{ein}} = \frac{m_{\text{Lu,W,des}}}{\left(1 - \left(\frac{1 - w_{\text{ein}}}{1 - w_{\text{aus}}}\right)\right)} \quad (2-23)$$

Somit ist es möglich, aus der Verdampfungsrate und dem Ein- und Ausgangswassergehalt den Materialein- und ausgang zu bestimmen. Dies kann über die SPS vollständig automatisiert werden. Wird die Leistung ebenfalls gemessen, kann so jederzeit genau ermittelt werden wie hoch der Energiebedarf für die Trocknung ist.

Alle weiteren benötigten Prozessschritte basieren auf dem Einsatz elektrischer Energie. Hier spielt im Wesentlichen die Effizienz der Anlagenkomponenten selbst

die entscheidende Rolle für den Energiebedarf. Die Materialeigenschaften haben hier nur einen geringen Einfluss auf den Energieverbrauch. Lediglich die Leistungsaufnahme der Hammermühle wird von der Partikelgröße des Rohmaterials beeinflusst. Ansonsten werden die Einstellungen auf das Einhalten der in den Normen, siehe Kapitel 2.6.5, geforderten Werte abgestimmt. Die Möglichkeiten zur Energieeinsparung sind hier begrenzt. Ansätze zur Verringerung der Reibung in der Matrize und ähnliches sind in der Praxis durchaus anzutreffen, aber nicht Gegenstand dieser Arbeit. Aus diesem Grund werden sie an dieser Stelle nicht näher behandelt.

Ist der Anteil der eingesetzten Energie in Bezug auf die im Brennstoff enthaltene Energie sehr hoch, ist eine Aufbereitung nicht mehr ökonomisch sinnvoll. Aus diesem Grund muss bei der Bewertung eines Brennstoffs auch immer ein Augenmerk auf das Verhältnis der benötigten Energie bei der Brennstoffproduktion zum Energieertrag aus dem Brennstoff gelegt werden. Abbildung 9 zeigt den benötigten Energieeinsatz für die Produktion von Holzpellets bei einem Eingangswassergehalt w_{ein} von 55 %. Die Werte für die Trocknung wurden dabei im Rahmen dieser Arbeit vergebenen Masterarbeit [50] an einer Industrieanlage der Stela Laxhuber GmbH ermittelt. Alle weiteren Werte stammen von Obernberger und Thek [52].

Aufteilung des Energiebedarfs für die Erzeugung einer Tonne Pellets

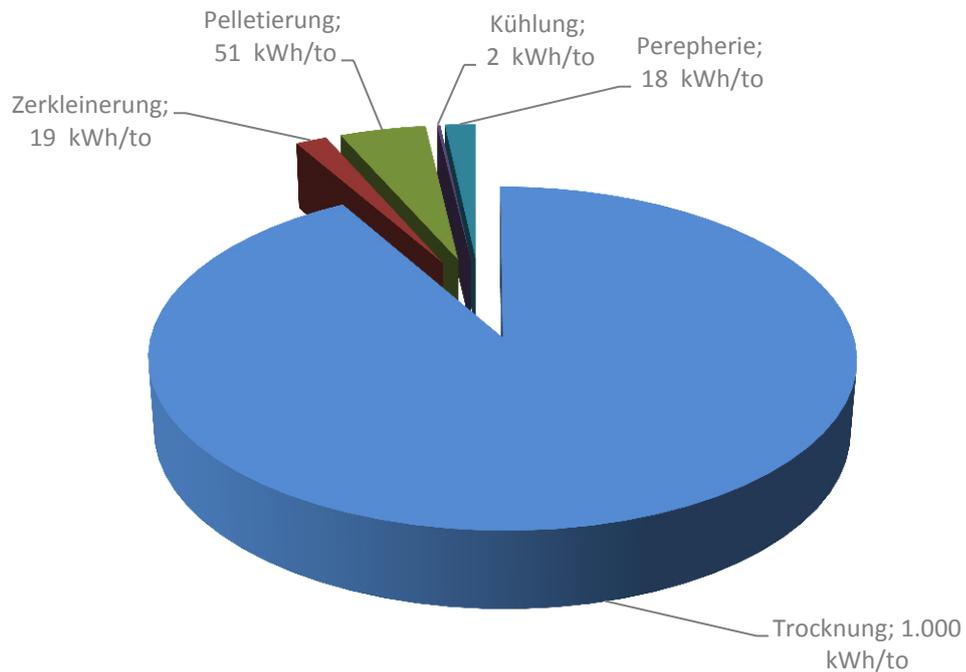


Abbildung 9: Energiebedarf für die Produktion einer Tonne Pellets bei einem Eingangswassergehalt von 55% [50] [52].

Abbildung 10 zeigt die Anteile der für die einzelnen Prozessschritte aufzuwendenden Energie und die verbleibende nutzbare Energie bezogen auf die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie. Dabei wird von einem Eingangswassergehalt von 55 % und von einem Energieinhalt von 4900 kWh/to ausgegangen [52].

Nutzbare Energie pro Tonne Pellets

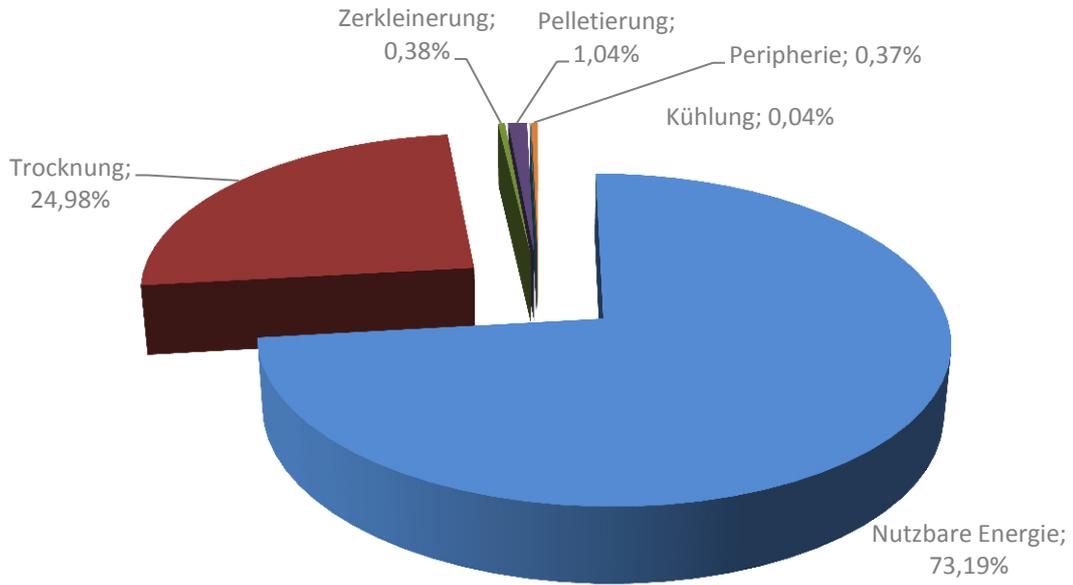


Abbildung 10: Anteile der für die Produktionschritte eingesetzten und der verbleibenden Nutzbaren Energie von Holzpellets bei einem Eingangswassergehalt von 55% [50], [52].

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist der Vergleich des Energiebedarfs und der verbleibenden nutzbaren Energie für einen Eingangswassergehalt der frischen Sägespäne von 55 % und 45 % dargestellt.

Energiebedarf pro Tonne Pellets bei 55 % und 45 % Wassergehalt

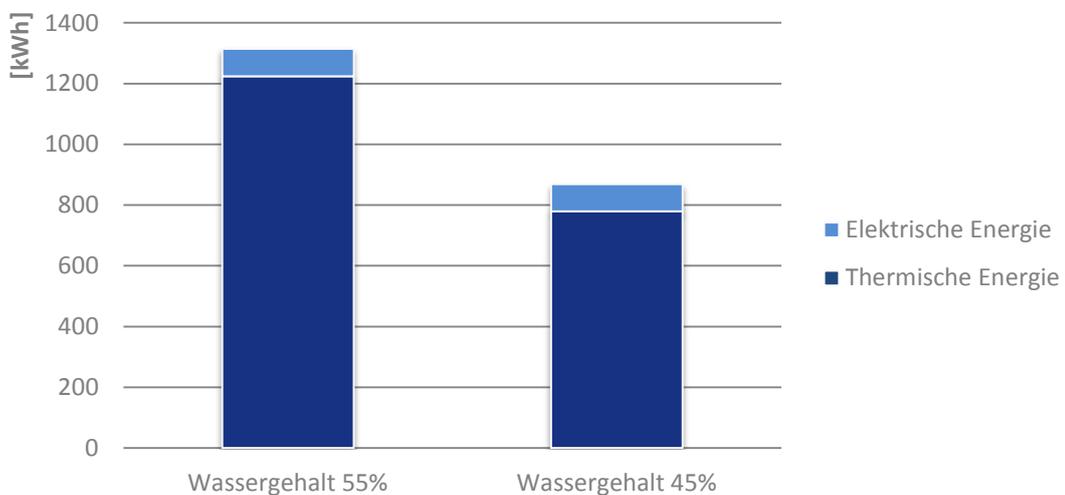


Abbildung 11: Vergleich des Energiebedarfs in kWh für die Produktion von einer Tonne Holzpellets bei 55 % und 45 % Eingangswassergehalt [50], [52].

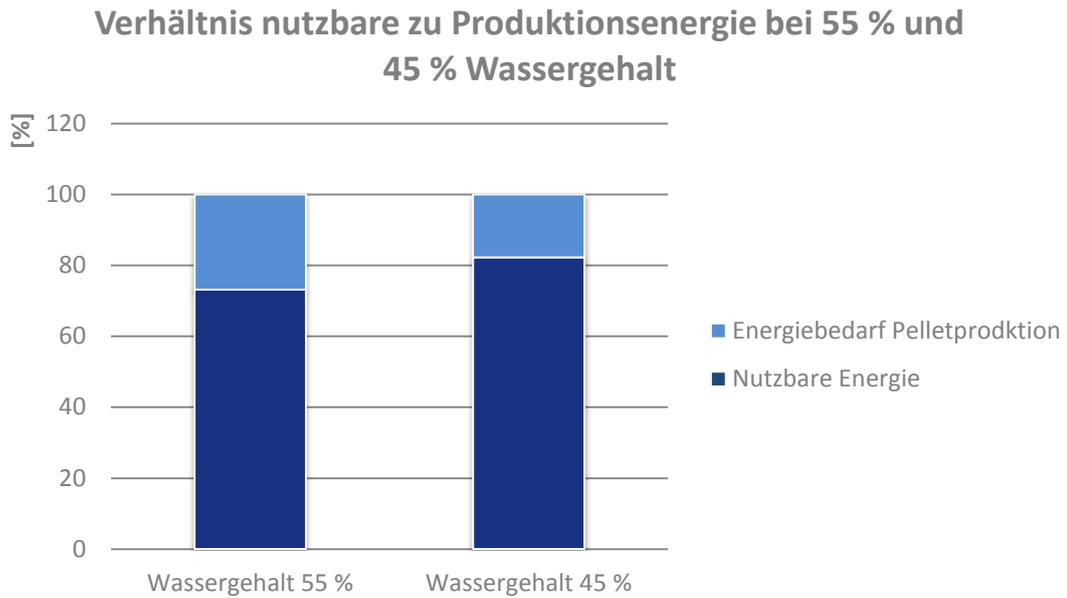


Abbildung 12: Verhältnis der nutzbaren zur für die Produktion benötigten Energie für Holzpellets bei 55 % und 45 % Eingangswassergehalt bei einem Energieinhalt der Pellets von 4900 kWh/to [50], [52].

Die Diagramme zeigen deutlich den großen Einfluss des Eingangswassergehalts auf den Energiebedarf bei der Herstellung von Biomassebrennstoffpellets.

2.6.7 Einsatz von mineralischen Zuschlagstoffen zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften

Wie oben erwähnt kann eine niedrigere Ascherweichungstemperatur einige Probleme mit sich bringen. Calciumhaltige Zuschlagstoffe können den Ascherweichungspunkt positiv beeinflussen. Kalium hingegen senkt ihn. Kalium zählt zu der Gruppe der Alkalimetalle, darum können auch alkali-bindende Zuschlagstoffe wie Kaolin eingesetzt werden. Da diese Stoffe jedoch nicht brennbar sind, erhöhen sie den Aschegehalt. Darüber hinaus kann eine zu hohe Dosierung den Verbrennungsprozess behindern. So kann die Zündfähigkeit herabgesetzt oder die vollständige Verbrennung des Brennstoffs erschwert werden. Übliche Zuschlagsmengen liegen zwischen 0,5 und 2 Gewichtsprozenten [53].

Eine im Rahmen der vorliegenden Arbeit vergebene Abschlussarbeit [54] befasste sich mit den Möglichkeiten der positiven Beeinflussung der Brennstoffeigenschaften von Pferdemist durch die Zugabe von Zuschlagstoffen. Dafür wurden Proben mit verschiedenen Anteilen an Kalk (CaCO_3) erstellt. Diese wurden dann in einem Laborofen auf ihr Ascherweichungsverhalten hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt und zeigen einen deutlichen Anstieg der Ascherweichungstemperatur mit zunehmendem Anteil an Zuschlagstoff. Angegeben sind folgende Temperaturen

- SST: Temperatur am Beginn der Schrumpfung
- DT: Erweichungstemperatur
- HT: Halbkugeltemperatur
- FT: Fließtemperatur

Welche in Kapitel 2.7.3 näher erläutert sind.

Tabelle 12: Ergebnisse der Ascheschmelzversuche von Pferdemist mit unterschiedlichen Anteilen CaCO_3 zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens [54].

% - Anteil Additiv		0	1	3	5	7	10
SST	\emptyset	1195,0	1198,3	1213,3	1228,3	1248,3	1258,3
	min.	1185	1195	1205	1225	1245	1255
	max.	1210	1205	1220	1233	1250	1260
	$\Delta T_{\text{min-max}}$	25	10	15	8	5	5
DT	\emptyset	1195,0	1200,7	1226,7	1248,3	1257,3	1265,0
	min.	1190	1192	1215	1240	1255	1260
	max.	1200	1210	1235	1255	1262	1270
	$\Delta T_{\text{min-max}}$	10	18	20	15	7	10
HT	\emptyset	1221,7	1222,7	1240,0	1260,7	1267,0	1273,3
	min.	1220	1220	1240	1252	1265	1270
	max.	1225	1225	1240	1265	1270	1275
	$\Delta T_{\text{min-max}}$	5	5	0	13	5	5
FT	\emptyset	1228,3	1231,7	1247,7	1266,7	1271,7	1278,3
	min.	1225	1230	1245	1260	1270	1275
	max.	1230	1235	1250	1270	1275	1280
	$\Delta T_{\text{min-max}}$	5	5	5	10	5	5

2.7 Theoretische Grundlagen der Verbrennung

Kenntnisse über die theoretischen Grundlagen der Verbrennung ermöglichen eine Berechnung und Abschätzung der Verbrennungsparameter, Rauchgas- und Aschezusammensetzung. Dadurch kann das Augenmerk bei der experimentellen Versuchsphase direkt auf mögliche Problemfelder gerichtet werden. Probleme mit der Anlagentechnik können so schon im Vorfeld vermieden werden. Darüber hinaus kann die theoretische Grundlage eine Diskussionsgrundlage bei abweichenden Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen bieten. Dies ermöglicht eine Weiterentwicklung der untersuchten Ansätze und fördert das Verständnis für den Prozess. Es ist also sinnvoll eine theoretische Grundlage als Basis für tiefgehende experimentelle Untersuchungen zu bilden. Im Folgenden werden die Werkzeuge für eine theoretische Einschätzung der Brennstoffeignung dargestellt.

2.7.1 Ablauf der thermo-chemische Umwandlung

Die thermo-chemische Umwandlung eines Biomasse-Festbrennstoffs lässt sich durch vier Teilprozesse beschreiben. Diese beginnen in verschiedenen Temperaturbereichen und zeitlich versetzt, überschneiden sich aber teilweise. Die Stufen bestehen aus einer Aufheizungs- und Trocknungsphase, der Pyrolysephase, der Vergasungsphase und der Verbrennungsphase. Damit diese Prozesse ablaufen können, muss ausreichend Sauerstoff vorhanden sein. Der Bedarf an Sauerstoff variiert in den einzelnen Phasen und wird durch die Luftverhältniszahl λ beschrieben. Die Luftverhältniszahl gibt das Verhältnis der dem Verbrennungsprozess zugeführten Luftmenge $m_{\text{Luft,ges}}$ zur für den Verbrennungsprozess minimal benötigten Luftmenge $m_{\text{Luft,min}}$ an. Gleichung (2-24) zeigt wie die Luftverhältniszahl berechnet werden kann. [55] [29].

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft,ges}}}{m_{\text{Luft,min}}} \quad (2-24)$$

Um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, findet die Oxidation meistens unter Luftüberschuss statt. Dies bedeutet, es steht mehr Luft zur Verfügung als für das stöchiometrische Gleichgewicht nötig wäre. Verbrennungsprozesse mit einer Luftverhältniszahl kleiner 1 werden als Vergasung bezeichnet und sind in der Praxis ebenfalls anzutreffen. Da diese Technik im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird, folgt keine weitere Erläuterung dieser Prozesse. Abbildung 13 zeigt den zeitlichen Ablauf der Teilprozesse einer Verbrennung in den jeweiligen Temperaturbereichen. Die anzustrebenden Luftverhältniszahlen sind ebenfalls dargestellt.

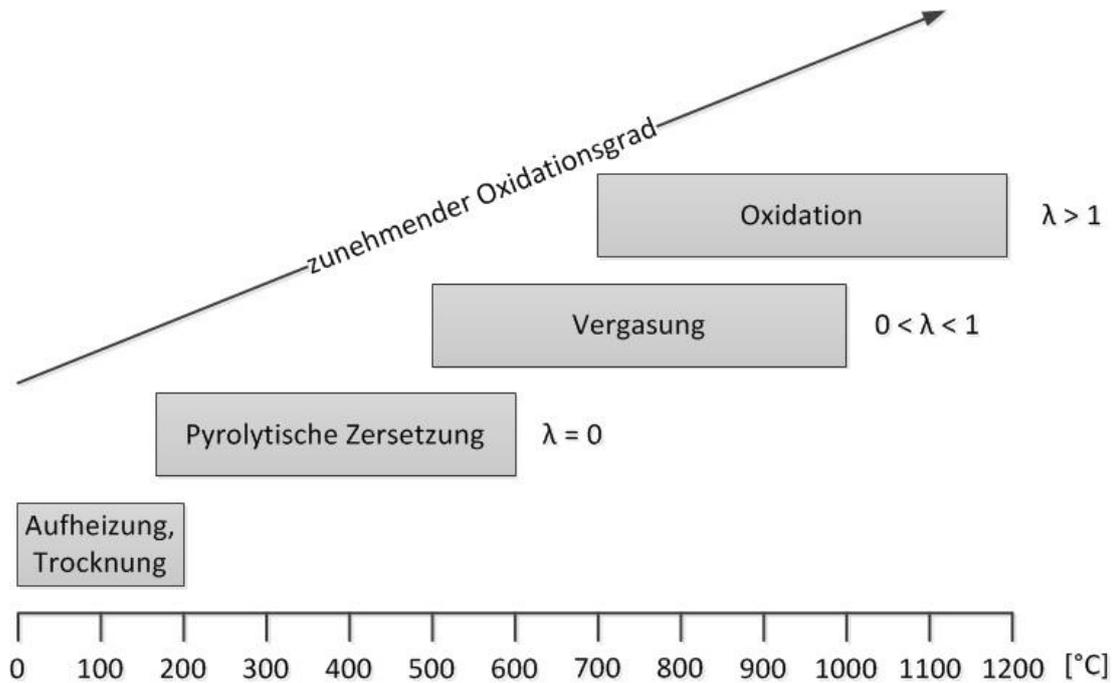


Abbildung 13: Ablauf des Verbrennungsprozesses [29].

Eine zeitliche und räumliche Trennung dieser Teilprozesse bringt eine Verbesserung der Verbrennungsqualität und somit auch der Effizienz der Feuerung mit sich. Dies kann durch eine entsprechende Konstruktion der Feuerung gewährleistet werden. In Industriefeuerungen wie großen Rostfeuerungen stellt diese Trennung keine größeren Probleme dar. In Kleinf Feuerungen ist eine Trennung aufgrund der begrenzten Konstruktionsmöglichkeiten oft nur bedingt möglich. Zusätzlich wirken sich kleine Abmessungen, sowie eine gegebene Homogenität der Brennstoffpartikel positiv auf die Verbrennungsqualität aus [55]. Die Abläufe in den einzelnen Prozessen stellen sich wie folgt dar:

Die **Aufheizung und Trocknung** laufen endotherm ab. Das bedeutet es wird Energie benötigt. Dies verlangsamt den Temperaturanstieg im Brennraum. Ist der Wassergehalt im Brennstoff zu hoch, kann der Verbrennungsprozess ganz zum Erliegen kommen. Bei Holz liegt der Schwellwert bei 60 %. Liegt er höher, kann auf Grund der benötigten Verdampfungsenthalpie die für die Verbrennung notwendige Temperatur nicht mehr aufrechterhalten werden.

Bei der Aufheizung und Trocknung finden nahezu keine Zersetzungsprozesse im Brennstoff statt [29] [55].

Pyrolyse beschreibt den Prozess der thermischen Zersetzung eines Festbrennstoffes unter Sauerstoffausschluss (Luftverhältniszahl $\lambda = 0$). Durch die Wärmeeinwirkung im Temperaturbereich zwischen 200 und 500 °C werden die Makromoleküle der Biomasse zerstört. Dabei wird der Brennstoff in folgende Reaktionsprodukte aufgespalten:

- Pyrolysekohle als fester Rückstand
- Pyrolyseöl als flüssige Komponente
- Pyrolysegas als gasförmige Komponente

Dabei werden rund 80 % der organischen Substanz in Pyrolysegas umgewandelt [29] [55].

Die **Vergasung** ist eine partielle Oxidation und setzt im Anschluss an die Pyrolyse unter Zuführung eines Vergasungsmittels ein. In Feuerungen wird das Oxidationsmittel in der Regel durch den in der Verbrennungsluft enthaltenen Sauerstoff bereitgestellt. Im Teilprozess der Vergasung werden die in der Pyrolysephase entstandenen festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten durch weitere Wärmezufuhr mit dem Oxidationsmittel zur Reaktion gebracht. Dieser Prozess beginnt teilweise als Sekundärreaktion, während der Pyrolyse statt. Hauptsächlich läuft die Vergasung jedoch nach Abschluss der Pyrolysephase im Temperaturbereich von 800 - 1100 °C ab. Dabei werden alle festen Brennstoffrückstände in die gasförmige Phase überführt. Die Luftverhältniszahl liegt dabei zwischen 0 und 1. Es entsteht ein Gasgemisch, welches vorrangig aus Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Wasserdampf (H₂O), Wasserstoff (H₂) und Methan (CH₄) besteht [29] [55]. In Tabelle 13 sind die einzelnen Reaktionen der Vergasung mit den dazugehörigen Gleichungen (2-25) – (2-32)ä und der dabei auftretenden Reaktionsenthalpie dargestellt.

Tabelle 13: Reaktionen in der Vergasungsstufe [29].

Vergasungsreaktion	Gleichung	Enthalpie	
Gas-Feststoff-Reaktionen			
Vollständige Kohlenstoffoxidation	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$	(2-25)
Partielle Kohlenstoffreaktion	$C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO$	$\Delta H = -110,5 \text{ kJ/mol}$	(2-26)
Heterogene Wassergasreaktion	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	$\Delta H = +118,5 \text{ kJ/mol}$	(2-27)
Boudouard-Reaktion	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	$\Delta H = +159,9 \text{ kJ/mol}$	(2-28)
Hydrierende Vergasung	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	$\Delta H = -87,5 \text{ kJ/mol}$	(2-29)
Gas-Gas-Reaktionen			
Wassergas-Shiftreaktion	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H = -40,9 \text{ kJ/mol}$	(2-30)
Methanisierungs-Reaktion	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	$\Delta H = -203,0 \text{ kJ/mol}$	(2-31)
Reformierung von Kohlenwasserstoff	$C_m H_n + m H_2 O \leftrightarrow m CO + (m + \frac{n}{2}) H_2$		(2-32)

Die **Oxidation** ist der letzte Teilprozess bei der thermischen Zersetzung eines Brennstoffes. Der Oxidationsprozess ist eine exotherme Reaktion und liefert die Energie für die vorangehenden Teilprozesse. Die dabei ablaufenden Reaktionen laufen bei 700 - 1400 °C ab. Als Reaktionsprodukte entstehen hauptsächlich Kohlendioxid (CO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Wasserdampf (H₂O). Weitere Reaktionsprodukte wie Stickoxide (NO_x) oder Chlorwasserstoff (HCl) treten nur in geringen Mengen auf, können aber aufgrund ihrer umweltschädlichen Wirkung und daraus resultierenden Emissionsgrenzwerten ein Problem darstellen. Ziel ist die vollständige Verbrennung der bei der Pyrolyse und Vergasung entstandenen Gase. Eine unvollständige Verbrennung kann aus Luftmangel, unzureichender Durchmischung der Verbrennungsgase und –luft oder aus lokalen Kältezonen (Außenwände) resultieren. Das Problem der unvollständigen Verbrennung kann durch eine entsprechende Konstruktion der Feuerung, Steuerung der Primär-, Sekundär- und Tertiärluft, höchstmöglicher Brennraumtemperatur und einer Luftverhältniszahl von größer 1 gemindert oder sogar vollständig gelöst werden. Rückstände einer unvollständigen Verbrennung sind zum einen und-oder teiloxidierte Brennstoffmengen (Ruß) und Kohlenmonoxid (CO). Die in Tabelle 14 aufgeführten Gleichungen (2-33) – (2-36) beschreiben die bei der Oxidation ablaufenden Reaktionen [55].

Tabelle 14: Reaktionen in der Oxidationsstufe [29].

Reaktionsgleichung	Enthalpie	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$	(2-33)
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -283,0 \text{ kJ/mol}$	(2-34)
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$\Delta H = -241,8 \text{ kJ/mol}$	(2-35)
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$\Delta H = -889,1 \text{ kJ/mol}$	(2-36)

2.7.2 Emissionsbildung

Emissionen sind nach der Begriffsbestimmung des Bundes-Immissionsschutzgesetz-BlmSchG Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Erscheinungen. Luftverunreinigungen sind im Gesetz als Veränderung der natürlichen Zusammensetzung der Luft insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe und Geruchstoffe definiert [56]. Diese Definition dient als Grundlage der Betrachtung der Emissionsbildung bei der Verbrennung. Eine Einschätzung der Möglichkeit, die Verbrennungsrückstände (Asche) als Dünger auszubringen und der Notwendigkeit einer Rauchgasaufbereitung wird später erläutert. In diesem Abschnitt werden zunächst der Entstehungsprozess von Emissionen und deren Einflussfaktoren betrachtet.

Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe entsteht aus den Reaktionen der Hauptelemente. Läuft die Verbrennung ideal ab, verbleibt kein oxidationsfähiges organisches Material in der Asche oder im Rauchgas. In diesem Fall entstehen als Emissionen Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) [55]. Handelt es sich um einen nachhaltig produzierten Biomasse-Brennstoff, können diese Emissionen als umweltverträglich und klimaneutral betrachtet werden. Hierbei werden jedoch die Emissionen für die Bereitstellung außer Acht gelassen. Da Pferdemist als biogener Reststoff anfällt und somit auch keine Energie für die Erzeugung aufgebracht werden muss erfolgt an dieser Stelle auch keine weitere Betrachtung der Emissionen durch die Bereitstellungskette.

Emissionen aus einer unvollständigen Verbrennung setzen sich aus Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Ruß zusammen. Ruß bildet dabei den teil- oder nichtoxidierten Anteil der Staubemission. Er besteht aus kleinsten Feststoffpartikeln, welche durch das Atmen in die Lunge des Menschen gelangen können. Der Austritt von Kohlenwasserstoffen wird häufig als Geruchsbelästigung wahrgenommen. Sowohl die Kohlenwasserstoffe wie auch der Ruß haben eine gesundheitsschädliche Wirkung auf den Menschen. Ihre Entstehung ist deshalb zu verhindern [55]. Die technischen Möglichkeiten dazu wurden in Kapitel 2.7.1 erläutert.

Die Anteile dieser Stoffe im Rauchgas geben Aufschluss über die Qualität der Verbrennung. Die Kohlenmonoxidkonzentration kann leicht gemessen werden und ist daher als Indikator für die Qualität der Verbrennung geeignet. Die zweite Gruppe von Emissionen entsteht durch die im Brennstoff enthaltenen Spurenelemente und Verunreinigungen. Dazu zählen der nicht brennbare Anteil der Staubemission, Schwermetalle, Schwefeloxide, Chlor-, Kalium-, und Stickstoffverbindungen. Bei der Biomasseverbrennung können hier, je nach Stickstoffgehalt der Biomasse, größere Mengen an Stickoxiden entstehen. Dies kann den Einsatz von Sekundärmaßnahmen erforderlich machen. Eine weitere Einteilung der Emissionen ist durch die Hauptursache ihrer Entstehung möglich. Hier kann entweder aufgrund der Brennstoffzusammensetzung (brennstoffspezifisch) oder der Verbrennungsparameter (prozessspezifisch) unterteilt werden [55]. In Tabelle 15 werden die in der Praxis bedeutendsten Emissionen noch einmal zusammengefasst und charakterisiert.

Tabelle 15: Auszug der wichtigsten Emissionen, deren Auswirkung auf die Umwelt und durch was sie beeinflusst werden [55].

Emission	Auswirkung	Haupteinfluss
Kohlenmonoxid (CO)	umweltschädlich	Prozess
Asche/Staub	umweltschädlich	Brennstoff
Ruß/ Staub	umweltschädlich	Prozess
Schwefeloxide (SO₂, SO₃)	umweltschädlich	Brennstoff
Chlorwasserstoff (HCl)	umweltschädlich	Brennstoff
Stickoxide (NO, NO₂)	umweltschädlich	Prozess
Emissionen durch feste und flüssige Teilchen	umweltschädlich	Prozess

Im Folgenden werden die einzelnen Emissionen, ihre Auswirkungen und die Einflüsse darauf genauer erläutert.

Kohlenmonoxid (CO) ist ein Blutgift und wirkt schon in geringen Dosen für den Menschen tödlich. Es stellt das Zwischenprodukt der CO₂ Bildung dar. Wird die CO₂-Reaktion durch Sauerstoffmangel oder lokale Stellen niedriger Temperatur unterbrochen, bleibt das CO im Rauchgas enthalten. Die Gleichungen (2-37) und (2-38) zeigen die Umwandlungsschritte der CO₂ Entstehung.



Schwefeloxide (SO_x) bilden bei der Verbindung mit Wasser schweflige Säure (H₂SO₃), und Schwefelsäure (H₂SO₄). Dies kann zu Korrosion in der Feuerungsanlage führen. Gelangen die Schwefeloxide in die Umwelt und werden vom Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen, gehen die Reaktionsprodukte als „saurer Regen“ nieder. Die Entstehung von Schwefeloxiden ist in den Gleichungen (2-39) und (2-40) dargestellt.





Chlorwasserstoff (HCl) entsteht durch die Reaktion des im Brennstoff enthaltenen Chlors und Wasserstoff. Die Menge der entstehenden Chlorwasserstoffe hängt also vom Chlorgehalt des Brennstoffes ab. Kondensiert Chlorwasserstoff in der Feuerungsanlage oder im Rauchgassystem aus und löst sich in vorhandenem, kondensiertem Wasser, entsteht Salzsäure. Die Salzsäure wirkt wiederum hoch korrosiv. Die Reaktion von Chlor und Wasserstoff ist in Gleichung (2-41) beschrieben.



Stickoxide (NO_x) können auf die drei in Tabelle 16 dargestellten Arten entstehen. Unterschieden wird das thermische, das prompte und das brennstoffbedingte NO_x . Die Gleichungen (2-42) bis (2-47) zeigen die Entstehung der drei Stickoxidarten und deren Haupteinflussgrößen.

Tabelle 16: Die drei Arten der Entstehung von Stickoxiden und ihre Haupteinflussgrößen [55].

Element	Haupteinflussgrößen	Entstehung	
Thermisches NO_x	Flammentemperatur >1300 °C, Verweilzeit in der heißen Zone, Luftüberschuss	$\text{N}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$	(2-42)
		$\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$	(2-43)
		$\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	(2-44)
Promptes NO_x	Brennstoffradikale	$\text{HC} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN} + \text{N}$	(2-45)
NO_x aus Brennstoffstickstoff	Stickstoffgehalt Brennstoff	$\text{NH} + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	(2-46)
		$\text{NH} + \text{O} \leftrightarrow \text{N} + \text{OH}$	(2-47)

In Biomassefeuerungen herrschen in der Regel Temperaturen weit unter 1400 °C, was die Entstehung von thermischen NO_x verhindert. Bei biogenen Brennstoffen stellt der vorhandene Stickstoffgehalt die größte Einflussgröße für die Entstehung von Stickoxiden dar. Wie die Schwefeloxide reagieren auch Stickoxide bei Kontakt mit Wasser zu Säuren salpetriger Säure (HNO_2) und Salpetersäure (HNO_3).

Die **Staub**emission setzt sich aus dem Feinanteil der Asche, kondensierten langkettigen Kohlenwasserstoffen aus unvollständiger Verbrennung und Ruß zusammen. Die Entstehung der Staubemission hängt zum einen von der Prozessführung ab und zum anderen vom Brennstoff. Brennstoffe, welche einen hohen Aschegehalt mit sich bringen und/oder zur chemischen Aerosolbildung neigen, verursachen in der Regel einen hohen Staubpartikelaustritt. Die Staubpartikelemission ist als krebserregend eingestuft [55].

Feste und flüssige Schwebeteilchen sind eine weitere durch die Verbrennung verursachte Emission und werden auch Aerosole genannt. Diese haben eine negative Auswirkung auf das Ökosystem. Die Aerosole wirken als Kondensationskeime, wodurch feine Tröpfchen entstehen, welche wiederum große Wolken ausbilden. Diese Wolken, wie die Aerosole selbst, reflektieren und absorbieren die Sonnenstrahlung und verringern so die Strahlungsdichte auf der Erdoberfläche. Lagern sich die Teilchen auf Pflanzen ab, kann dies zur Einschränkung der Photosynthese führen. Teilchen die $< 1\mu\text{m}$ sind können nach dem Einatmen durch Lebewesen nicht mehr durch die körpereigenen Reinigungsmechanismen ausgeschieden werden. Im Körper können sie reizend, mutagen und toxisch wirken [29].

Dioxine und **Furane** stellen Überbegriffe für polychlorierte aromatische Verbindungen dar. Die unter diese Überbegriffe fallenden Gruppen sind Dibenzodioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF). Die Toxizität von Dioxinen wird durch den Äquivalenzfaktor beschrieben. Tetrachlordibenzodioxin (TCDD) ist mit dem Äquivalenzfaktor 1 gekennzeichnet und stellt damit das Element mit der höchsten Toxizitätsstufe dar. Andere Dioxine sind < 1 eingestuft. Dioxine können zum einen als Brennstoffverunreinigungen, zum anderen als Vorläuferverbindungen wie zum Beispiel chlorierte Aromaten in die Feuerung gelangen. Chloraromaten, wie zum Beispiel PCP, sind relativ stabile organische Verbindungen, werden aber auch bei Temperaturen oberhalb von $500\text{ }^\circ\text{C}$ in Gegenwart von Sauerstoff oxidiert. Wesentlich bedeutsamer als Chloraromaten im Hinblick auf die Dioxinmission von Feuerungsanlagen ist die De-Novo-Synthese. Voraussetzung der Synthese ist das

Vorhandensein von Chlor, Sauerstoff und Kohlenstoffverbindungen im Brennstoff und Abgas. Diese Konstellationen sind bei Feststofffeuerungen für biogene Stoffe stets vorhanden. Die De-Novo-Synthese nimmt mit der Höhe des Chlorgehalts im Brennstoff zu. Sie kann sowohl im Feuerungsraum als auch im Rauchgassystem vonstattengehen. Dabei müssen lediglich die einzelnen Reaktionspartner vorhanden sein und die kritische Temperatur von 250 - 450 °C erreicht werden. Problematisch ist die Rauchgasfilterung mit einem Elektrofilter, der bis zu einer Betriebstemperatur von 250 °C eingesetzt wird. So haben derartige Abgasreinigungsanlagen vor dem Filter eine erheblich geringere Konzentration als hinter dem Filtersystem. Um dieses Problem zu umgehen, wird oftmals die Rauchgastemperatur durch Eindüsen von Wasser unter die kritische Temperatur abgesenkt [57].

Die Kenntnis welche Menge und in welcher Zusammensetzung Rauchgas bei einer Verbrennung entsteht, kann im Vorfeld der Emissionsmessungen theoretisch bestimmt werden. Bei der Untersuchung neuer Brennstoffe ist dies für eine möglichst genaue Voreinstellung der Messgeräte und zur Überprüfung der Qualität der Verbrennung von Nutzen.

Liegt eine Elementaranalyse des Brennstoffes vor, kann nach [31] wie folgt vorgegangen werden. Für die Berechnungen wird von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen, da keine Werte über die Einbindung von Kohlenstoff in die Asche bei der Verbrennung von Pferdemist vorliegen. Auch der Anteil an Kohlenmonoxid ist nicht bekannt. Darüber hinaus bieten die für eine vollständige Verbrennung berechneten Werte die Möglichkeit, die Güte der Verbrennung bei den Versuchsfahrten zu bewerten.

Laut [29] ist bei der Verbrennung von Biomasse bei den üblichen Feuerungsraumtemperaturen von 800 – 1300 °C nicht mit einer nennenswerten Bildung von NO_x zu rechnen. Aus diesem Grund wird der Stickstoffanteil bei der Berechnung vernachlässigt.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Abgasmenge und –zusammensetzung ist die auf der Elementaranalyse basierende, in Gleichung (2-48) dargestellte Massenerhaltung [31].

$$c + h + s + o + n + w + a = 1 \quad (2-48)$$

mit:

<i>c</i>	Massenanteil Kohlenstoff
<i>h</i>	Massenanteil Wasserstoff
<i>s</i>	Massenanteil Schwefel
<i>o</i>	Massenanteil Sauerstoff
<i>n</i>	Massenanteil Stickstoff
<i>w</i>	Massenanteil Wasser
<i>a</i>	Massenanteil Asche

Sofern nicht durch die Elementaranalyse gegeben, werden die Massenanteile auf die Brennstoffmasse bezogen. Gleichung (2-49) bildet hierfür die Grundlage [31].

$$i = \frac{m_i}{m_B} \quad (2-49)$$

mit:

<i>i</i>	Massenanteil Brennstoffelement
<i>m_i</i>	Masse Brennstoffelement
<i>m_B</i>	Masse Brennstoff

Mithilfe der Gleichung (2-50) kann der theoretisch benötigte Sauerstoff bei vollständiger Verbrennung berechnet werden.

$$m_{O_2, \text{theor}} = \frac{M_{O_2}}{M_C} c + \frac{M_{O_2}}{2 \cdot M_{H_2}} h + \frac{M_{O_2}}{M_S} s - o \quad (2-50)$$

mit:

$m_{\text{O}_2, \text{theor}}$	theoretisch benötigte Sauerstoffmasse in $\text{kg}_{\text{O}_2}/\text{kg}_{\text{Brennstoff}}$
M_{C}	Molmasse von Kohlenstoff in kg/kmol
M_{H_2}	Molmasse von Wasserstoff in kg/kmol
M_{S}	Molmasse von Schwefel in kg/kmol
M_{O_2}	Molmasse von Sauerstoff in kg/kmol

Der Anteil an Sauerstoff im Verbrennungsraum wird häufig über die Zufuhr von Umgebungsluft geregelt. Das Massenverhältnis aus Luft und Brennstoff wird durch das Formelzeichen λ beschrieben. Wird dem Verbrennungsprozess mehr Sauerstoff als für eine vollständige Verbrennung stöchiometrisch nötig zugeführt, gilt $\lambda > 1$. Die Berechnung von λ findet mit Hilfe von Gleichung (2-51) statt [31].

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{\text{Luft}}}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}} \quad (2-51)$$

$$\left(\frac{\dot{m}_{\text{Luft}}}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}}_{\text{stöchiometrisch}} \right)$$

mit:

\dot{m}_{Luft}	Massenstrom Umgebungsluft
$\dot{m}_{\text{Brennstoff}}$	Massenstrom benötigte Luft zur vollständigen Verbrennung des eingesetzten Brennstoffs

Zur Bestimmung der Rauchgasmenge und –zusammensetzung wird nun die benötigte Verbrennungsluftmasse für trockene und feuchte Luft berechnet. Anschließend erfolgt die Berechnung für alle weiteren Bestandteile des Abgases. Die Gleichungen (2-52) bis (2-59) stellen die Grundlage für die Berechnung dar. Da der Anteil an Sauerstoff in der Luft 21 % beträgt, muss dies bei der Berechnung berücksichtigt werden. Der Korrekturfaktor wird durch das Formelzeichen Ω mit der Einheit $m_{\text{O}_2}^3 / m_{\text{Luft}}^3$ dargestellt. Wird reiner Sauerstoff bei der Verbrennung eingesetzt ist $\Omega = 1$ [31].

$$m_{\text{Lu, tr}} = \lambda \cdot \frac{m_{\text{O}_2, \text{min}} \cdot M_{\text{Lu, tr}}}{M_{\text{O}_2} \cdot \Omega} \quad (2-52)$$

mit:

$m_{\text{Lu, tr}}$	Masse der theoretisch benötigten trockenen Verbrennungsluft
$M_{\text{Lu, tr}}$	Molmasse von trockener Luft in kg/kmol
Ω	volumetrischer Sauerstoffanteil der Luft (0,21 m ³ /m ³)

$$m_{\text{Lu, f}} = (1 + x_{\text{Lu}}) \cdot m_{\text{Lu, tr}} \quad (2-53)$$

mit:

$m_{\text{Lu, f}}$	Masse der theoretisch benötigten feuchten Verbrennungsluft
--------------------	--

Die Gleichungen (2-54) bis (2-59) liefern die Grundlage für die Berechnung der Massen der einzelnen Bestandteile des Abgases.

Für die Berechnung von m_{CO_2} und m_{CO} ist zu berücksichtigen, dass bei einer vollständigen Verbrennung $(1 - \alpha - \beta) = 1$ gilt. In diesem Fall ist das berechnen des in Gleichung (2-55) dargestellten Kohlenmonoxidanteils nicht nötig, siehe hierzu Gleichung (2-50).

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{C}}} c \cdot (1 - \alpha - \beta) \quad (2-54)$$

mit:

m_{CO_2}	Masse Kohlenstoffdioxidemission
α	Massenanteil Kohlenstoff in Kohlenmonoxid umgewandelt
β	Massenanteil Kohlenstoff nimmt nicht an Verbrennung teil

$$m_{\text{CO}} = \frac{M_{\text{CO}}}{M_{\text{C}}} c \cdot \alpha \quad (2-55)$$

mit:

m_{CO} Masse Kohlenstoffdioxidemission
 M_{CO} Molmasse von Kohlenmonoxid in kg/kmol

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2}} h + w + x_{\text{Lu}} \cdot m_{\text{Lu, tr}} \quad (2-56)$$

mit:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ Masse Wasserdampf

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{M_{\text{SO}_2}}{M_{\text{S}}} s \quad (2-57)$$

mit:

m_{SO_2} Masse Schwefeldioxidemission

$$m_{\text{N}_2} = n + 0,79 \cdot m_{\text{Lu, tr}} \quad (2-58)$$

mit:

m_{N_2} Volumen Stickstoffemission

$$m_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) \cdot m_{\text{O}_2, \text{ theor}} \quad (2-59)$$

mit:

m_{O_2} Volumen Sauerstoffemission

Tabelle 17: Dichten der wesentlichen Rauchgasbestandteile [58].

Rauchgasbestandteil	Dichte [kg/m ³]
O ₂	1,429
CO ₂	1,977
H ₂ O (Dampf)	0,768
SO ₂	2,928
N ₂	1,250
Luft	1,293

Aufgrund des Bezugs auf relative Raumanteile gilt der Zusammenhang aus Gleichung (2-63).

$$\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 = 1 \quad (2-63)$$

mit:

CO ₂	Raumanteil Kohlenstoffdioxid im trockenen Rauchgas
CO	Raumanteil Kohlenstoffmonoxid im trockenen Rauchgas
SO ₂	Raumanteil Schwefeldioxid im trockenen Rauchgas
N ₂	Raumanteil Stickstoff im trockenen Rauchgas
O ₂	Raumanteil Sauerstoff im trockenen Rauchgas

Die Gleichungen (2-64) bis (2-68) zeigen die Berechnung der prozentualen Anteile der Einzelgase.

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{RG,tr}}} \quad (2-64)$$

$$\text{CO} = \frac{V_{\text{CO}}}{V_{\text{RG,tr}}} \quad (2-65)$$

$$\text{SO}_2 = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{RG,tr}}} \quad (2-66)$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{RG,tr}}} \quad (2-67)$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{RG,tr}}} \quad (2-68)$$

2.7.3 Asche

Die aus den Verbrennungsrückständen bestehende Asche kann verschiedene Probleme verursachen. Neben dem in Kapitel 2.7.2 bereits erwähnten Einfluss auf die Staubemission kann ein hoher Aschegehalt direkte Auswirkungen auf den Betrieb einer Feuerungsstätte haben. So erschwert ein hoher Aschegehalt das Sicherstellen einer vollständigen Verbrennung. Dies führt zur Reduktion der Leistung des Kessels. Ist das Feuerungssystem nicht für die anfallenden Aschemengen ausgelegt kann dies zu Betriebsstörungen führen.

Sind giftige Rückstände wie Schwermetalle in der Asche zu finden, führt dies zu einer kostenintensiven Entsorgung. Ein hoher Aschegehalt kann deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Feuerungsanlage haben.

Aus diesen Gründen ist es wichtig, Kenntnisse über das zu erwartende Ascheaufkommen zu haben. Dies ermöglicht die Auswahl eines passenden Feuerungssystems mit ausreichend dimensioniertem Ascheaustrag. Darüber hinaus können die Kosten für die Entsorgung der Asche kalkuliert werden. Dies kann zum einen durch eine theoretische Berechnung erreicht werden, zum anderen können Versuche an der Technikumsanlage die theoretischen Werte zusätzlich validieren.

Die Gleichungen (2-69) bis (2-73) zeigen die Berechnungsgrundlagen für die theoretische Ermittlung des Aschegehalts.

Bei der in Kapitel 2.7.1 beschriebenen Verbrennung reagieren Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel zu gasförmigen Stoffen, das enthaltene Wasser wird in die Gasphase überführt. Zurück bleiben die mineralischen Bestandteile des Brennstoffs. Daraus folgt Gleichung (2-69) [59].

$$c+h+s+o+n+a+w=1 \quad (2-69)$$

mit:

<i>c</i>	Massenanteil Kohlenstoff im Brennstoff
<i>h</i>	Massenanteil Wasserstoff im Brennstoff
<i>s</i>	Massenanteil Schwefel im Brennstoff
<i>o</i>	Massenanteil Sauerstoff im Brennstoff
<i>n</i>	Massenanteil Stickstoff im Brennstoff
<i>a</i>	Massenanteil Asche im Brennstoff
<i>w</i>	Massenanteil Wasser im Brennstoff

Umstellen der Gleichung (2-70) nach α ergibt:

$$a=1-(c+h+o+n+s+w) \quad (2-70)$$

Werden Additive zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften eingesetzt, sind diese in der Regel mineralischen Ursprungs und müssen ebenfalls der verbleibenden Asche zugerechnet werden. Daraus folgt Gleichung (2-71).

$$a=1-(c+h+o+n+s+m)+\textit{Additiv} \quad (2-71)$$

mit:

<i>Additiv</i>	Massenanteil Additiv
----------------	----------------------

Wird die Aschenkonzentration auf die Trockensubstanz bezogen, entfällt der Wasseranteil und es folgt Gleichung (2-72).

$$a = 1 - (c + h + o + n + s) + \text{Additiv} \quad (2-72)$$

Die Massenkonzentration einer trockenen Probe kann wie folgt mit Gleichung (2-73) berechnet werden.

$$\text{Massenkonzentration}_{\text{Asche}} = \frac{100\% \cdot m_{\text{Asche}}}{m_{\text{Probe}}} \quad (2-73)$$

mit:

$\text{Massenkonzentration}_{\text{Asche}}$	Anteil der Asche in der Probe in %
m_{Asche}	Masse der Asche in kg
m_{Probe}	Masse der Probe in kg

Weist die Asche darüber hinaus eine niedrige Ascherweichungstemperatur auf, kann dies ebenfalls zu Problemen beim Betrieb von Feuerungsstätten führen. Die Norm [60] unterscheidet dabei folgende Temperaturniveaus:

- Die **Temperatur am Beginn der Schrumpfung** (SST) ist erreicht, wenn die Probenkörperfläche kleiner 95 % der Ausgangsfläche ist.
- Von der **Erweichungstemperatur** (DT) wird gesprochen, sobald ein erstes Schmelzen des zylindrischen Probekörpers zu erkennen ist. Dies ist an den abgerundeten Kanten des Probekörpers zu erkennen.
- Bei der **Halbkugeltemperatur** (HT) hat der Probekörper eine Halbkugelform angenommen.
- Beim Erreichen der **Fließtemperatur** (FT) hat sich der Probekörper als dünne Schicht auf der Trägerplatte ausgebreitet.

Für die technischen Anwendungen entscheidend sind die Halbkugeltemperatur (HT) und die Fließtemperatur (FT) [29].

Bei welcher Temperatur der jeweilige Zustand erreicht wird, hängt maßgeblich von der elementaren Zusammensetzung des Brennstoffs ab. Dies ermöglicht bei Vorliegen einer Elementaranalyse eine theoretische Abschätzung der Erweichungstemperatur (DT) und Fließtemperatur (FT) in °C [61]. Dafür werden die Regressionsgleichungen (2-74) und (2-75) herangezogen werden. Die Angaben von Kalium (k), Calcium (ca) und Magnesium (mg) werden als Massenanteile des trockenen Brennstoffs eingesetzt.

$$DT[^\circ C] = 1172 - 53,9 \cdot k + 252,7 \cdot ca - 788,4 \cdot mg \quad (2-74)$$

$$FT[^\circ C] = 1369 - 43,4 \cdot k + 192,7 \cdot ca - 698 \cdot mg \quad (2-75)$$

Die Gleichungen lassen erkennen, dass eine Zugabe von Calcium oder das Absenken der Magnesium- und Kaliumgehalte eine Erhöhung der Erweichungstemperatur zur Folge haben. Ist dies nicht sinnvoll, können diese Effekte durch eine Anpassung der Feuerungsstätte eingedämmt werden. So können Zusatzeinrichtungen wie gekühlte Rostsysteme, eine Abgasrückführung, oder eine Brennstoffverwirbelung, welche die Flammtemperatur und damit Temperatur im Brennraum senken. Damit soll das Temperaturniveau in der Feuerung unter der Ascheerweichungstemperatur des jeweiligen Brennstoffs gehalten werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin die entstehenden Ascheklumpen möglichst klein zu halten,. Dies geschieht mit Bewegungselementen im Glutbett und Aschebrechern [29].

Tabelle 18 zeigt einen Vergleich dieser Temperaturen für verschiedene Biomassebrennstoffe. In Abbildung 14 sind die Werte noch einmal anschaulich im direkten Vergleich dargestellt.

Tabelle 18: Ascheerweichungstemperaturen verschiedener Biomassebrennstoffe in °C [29], [54].

Brennstoff	DT [in °C]	HAT [in °C]	FT [in °C]
Fichtenholz (mit Rinde)	1426	--	1583
Rinde (Nadelholz)	1440	1460	1490
Roggenstroh	1002	1147	1188
Weizenstroh	998	1246	1302
Triticalestroh	911	1125	1167
Gerstenstroh	980	1113	1173
Miscanthus	973	1097	1170
Landschaftspflegeheu	1061	--	1228
Straßengrasschnitt	1200	1270	1286
Pferdemist	1145	1173	1193

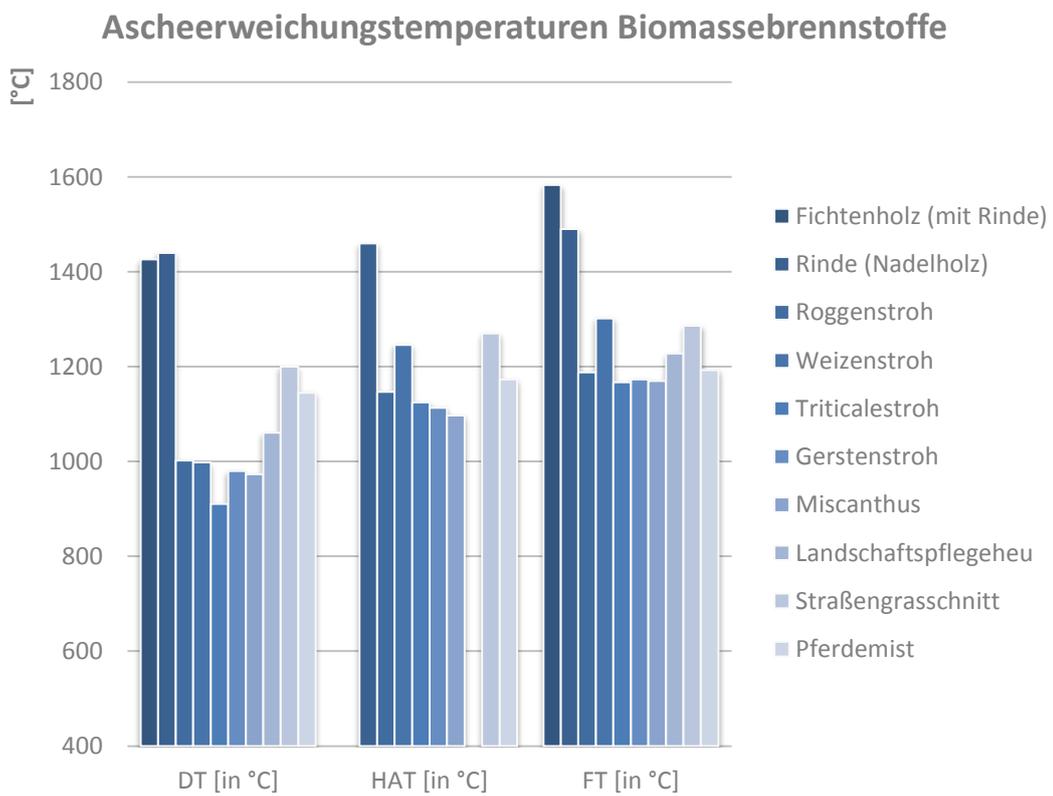


Abbildung 14: Ascheerweichungstemperaturen verschiedener Biomassebrennstoffe in °C [29], [54].

2.7.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen für die Verwertung von Pferdemist

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Verwertungsmöglichkeiten für Pferdemist stellen sich sehr unübersichtlich dar. Es müssen Geltungsbereiche verschiedener Verordnungen geprüft werden. Dazu zählen die europäischen Verordnungen 1069/2009 [62] zur Beseitigung tierischer Nebenprodukte und 2000/76 [63] über die Verbrennung von Abfällen und die für die Umsetzung der Verordnungen gültigen deutschen Gesetze. Dabei sind das Tierische Nebenprodukte- Beseitigungsgesetz (TierNebG) [64], das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz-KrWG) [65], das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [66] mit den dazugehörigen Verordnungen (BImSchV) 1, 4, 13, und 17, [67], [68], [69], [70] das Tiergesundheitsgesetz [71] und die Düngemittelverordnung [72] von Bedeutung.

Die **Verbrennung** von Pferdemist wird durch das Bundesimmissionsschutzgesetz und dessen Verordnungen geregelt. Die Verordnungen und Gesetze zur Beseitigung von tierischen Nebenprodukten schließen Exkremate aus. Das Tiergesundheitsgesetz findet hier ebenfalls keine Anwendung. Somit wird die Verbrennung von Pferdemist allein durch das Bundesimmissionsschutzgesetz geregelt. Die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte sowie die Einteilung von genehmigungsfreien und genehmigungspflichtigen Anlagen werden in den Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) dargestellt. In der 1. BImSchV werden Brennstoffe aufgeführt, welche in Kleinf Feuerungs-Anlagen unter Einhaltung bestimmter Qualitätskriterien ohne Immissionsschutz-rechtliche Genehmigung verbrannt werden dürfen. Pferdemist ist in dieser Liste nicht enthalten. Somit greifen für die Reglementierung der Pferdemistverbrennung die 4. BImSchV zur Reglementierung genehmigungsbedürftiger Anlagen und die 17. BImSchV für Anlagen zur Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen. Die 4. BImSchV bildet hierbei die Grundlage für alle genehmigungsbedürftigen Anlagen. Die 17. BImSchV spezifiziert dabei auf Grundlage dieser die Vorschriften für die Verbrennung und

Mitverbrennung von Abfällen. Zur eindeutigen Definition von Biobrennstoffen muss außerdem die 13. BImSchV herangezogen werden. In der 13. BImSchV wird Gülle oder Festmist und somit auch Pferdemist nicht als Biobrennstoff aufgeführt. Damit fällt die Pferdemistverbrennung nach § 2 Absatz 2 Nr. 6 der 17. BImSchV unter diese Verordnung. Damit gelten die in Tabelle 19 dargestellten Emissionsgrenzwerte welche durch die 17. BImSchV festgelegt sind. Die angegebenen Grenzwerte beziehen sich auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 11 Prozent.

Tabelle 19: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für Anlagen mit weniger als 50 MW Feuerungswärmeleistung [70].

Schadstoff	Tagesmittelwert [in mg/m ³]	Halbstundenmittelwert [in mg/m ³]
Gesamtstaub	10	20
Gesamtkohlenstoff	10	20
HCl	10	60
HF	1	4
SO _x	50	200
NO _x	200	400
Hg	0,03	0,05
CO	50	100
NH ₃	10	15

Durch die rechtliche Einstufung ist der wirtschaftlich sinnvolle Einsatz von Pferdemist im Bereich von dezentralen Kleinfeuerungsanlagen nach 1.BImSchV als ausgeschlossen zu betrachten. Ab welcher Anlagengröße ein Betrieb nach 17. BImSchV ökonomisch sinnvoll ist muss durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ermittelt werden. Dies ist allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit. Eine Änderung der Gesetzesgrundlage ist kurz- und mittelfristig nicht zu erwarten. Das Problem der Pferdemistentsorgung und die Möglichkeit der Doppelnutzung von Pferdemist als Energieträger und Dünger wurden vom Gesetzgeber noch nicht wahrgenommen. So wurde eine Anfrage an das Rheinland-Pfälzische Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung bezüglich des Entsorgungsproblems und den gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Pferdemistverbrennung wie folgt beantwortet:

„Für Betriebe der Pferdehaltung ist die Wärme- und Stromerzeugung auf Basis von Pferdemist oder daraus hergestellter Pellets aktuell ohne Relevanz. Die anfallenden Mengen werden in Rheinland-Pfalz in der Regel ähnlich wie Stroh als Strukturverbesserer und Humusdünger zur Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen im Ackerbau eingesetzt. Werden die düngerechtlichen Regelungen eingehalten, bewertet die Landesregierung diesen eingeführten Verwertungsweg als ökonomisch und ökologisch besonders sinnvoll.“ [73] Dies ist zwar keine Aussage auf Bundesebene, gibt jedoch den Blickwinkel der gesetzgebenden Instanzen wieder.

3 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die eingesetzten Analyseverfahren und theoretischen Grundlagen. Darüber hinaus gibt es einen Überblick über die, für die Untersuchungen aufgebaute, Pelletierlinie und ihrer technischen Ausstattung. Eine Erläuterung des Konzepts des Gesamtverfahrens findet sich ebenfalls in diesem Kapitel. Anschließend werden die einzelnen Prozessschritte näher erläutert.

3.1 Gesamtverfahren

Um für die Praxis verwertbare und skalierbare Ergebnisse zu erhalten wurden die Messfahrten und die Probenherstellung nicht mit Laborgeräten durchgeführt. Stattdessen wurde Industrietechnik eingesetzt. Im Unterschied zu einer Standard-Industrieanwendung wurde sie mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet. Dies sollte zum einen eine hohe Praxisrelevanz gewährleisten, zum anderen sollte dadurch der Einfluss der starken Inhomogenität des Pferdemists minimiert werden. Nachteil dieses Ansatzes ist der hohe Aufwand für die Durchführung der Messreihen. So mussten sehr große Mengen an Material transportiert werden. Darüber hinaus bedeutet eine solche Anlage eine hohe Reinigungs- und Wartungsintensität, welche nur mit hohem personellem Aufwand bewältigt werden kann. Da die erforderliche Anlage im Rahmen des Forschungsvorhabens „Biomassepellets aus Pferdemist“ bereits an der Hochschule Rosenheim aufgebaut wurde und für die vorliegende Arbeit angepasst und genutzt werden konnte, wurde die erhöhte Aussagekraft der Ergebnisse einem geringeren Aufwand von Untersuchungen im Labormaßstab vorgezogen. Die Anlage umfasst neben einer Pelletierlinie einen Biomasse-Feuerungsversuchsstand und ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FT-IR) zur Rauchgasanalyse. Die Staubmessungen wurden von Mitarbeitern der Rohrdorfer Zementwerke Gebr. Wiesböck GmbH durchgeführt. Die benötigten Elementaranalysen wurden ebenfalls von der Rohrdorfer Zementwerke Gebr. Wiesböck GmbH und dem Labor der

Professur für regenerative Energiesysteme der Technischen Universität München durchgeführt.

Der Grundaufbau der Pellettierlinie stellt den aktuellen Stand der industriellen Produktion von Brennstoffpellets dar. Dieser umfasst:

- einen Niedertemperatur-Bandrockner zur thermischen Trocknung des Brennstoffes
- eine Hammermühle zum Erzeugen einer optimalen Partikelgröße für den Pressvorgang
- eine Pelletpresse mit Ringmatrize
- eine Förder- und Kühleinrichtungen
- eine Dosiereinrichtung für Zuschlagstoffe

Für den wissenschaftlichen Einsatz wurde die Anlage mit einer umfangreichen Sensorik ausgestattet. So können alle Prozesse überwacht und ausgewertet werden. Der Aufbau und die Funktionsweise der Sensorik werden später gesondert erläutert. Abbildung 15 zeigt das Fließschema der Pellettierlinie. Die Fördereinrichtungen wurden zugunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

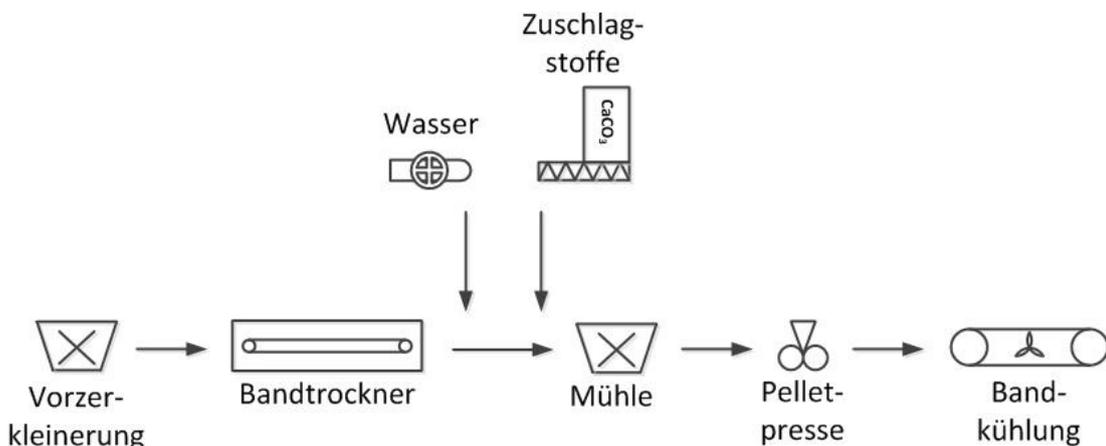


Abbildung 15: Fließschema Pellettierlinie FH-Rosenheim.

Zusätzlich wurde für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen für einige Probechargen eine Schneckenpresse zur mechanischen Entwässerung vorgeschaltet. Durch das Abscheiden eines Teils der Flüssigphase sollten die Gehalte der wasserlöslichen Störstoffe abgesenkt werden. Die Absenkung des

Wassergehalts betrug dabei im Schnitt 33 %. Der Schwerpunkt lag auf der maximalen Verbesserung der Brennstoffeigenschaften. Der energetische Gesichtspunkt spielte dabei eine untergeordnete Rolle. Durch die kleine Bauform der Presse und den Einsatz einer Standard-Pressgarnitur, welche nicht auf das Pressgut angepasst ist, war lediglich eine Einschätzung über den Energieverbrauch möglich. Jedoch konnten die Auswirkungen der Störstoff-Absenkung auf die Emissionswerte verlässlich bestimmt werden. Der eigentliche Prozess von Trocknung und Pelletierung wurde über eine Steuer- und Regeleinheit voll automatisiert. So wurde auch die Dosierung von Zuschlagstoffen von der Steuerung übernommen und durch einen Regler an die aktuelle Durchsatzmenge des Trockners angepasst. Die Durchsatzmenge variierte aufgrund der schwankenden Eingangswassergehalte und dem immer gleichen Ausgangswassergehalt. Der stabile Ausgangswassergehalt wurde ebenfalls über einen eigens programmierten Regler realisiert. Damit konnten Ungenauigkeiten durch Bedienfehler ausgeschlossen werden.

Abbildung 16 zeigt die eingesetzte Anlage, Abbildung 17 die Schneckenpresse.



Abbildung 16: Pelletierlinie der Hochschule Rosenheim.



Abbildung 17: Schneckenpresse zur mechanischen Entwässerung des Pferdemists.

Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte und eingesetzten Anlagenkomponenten näher beschrieben.

3.2 Entfernen von Verunreinigungen

Pferdemist kann mit Steinen, Sand, Ästen und Metallteilen verunreinigt sein. Diese sollten vor dem Einfördern in die Pelletierlinie aussortiert werden. So können Schäden und überhöhter Verschleiß reduziert werden. In der Praxis werden diese Aufgaben von technischen Einrichtungen wie Magnetabscheidern, Windsichtern und Absetzbecken übernommen. Mit diesen Anlagen können sehr hohe Abscheidegrade der Verunreinigungen erreicht werden. Aufgrund der hohen Kosten für diese Einrichtungen und der geringen Probenmengen wurden diese Komponenten an der Forschungsanlage nicht installiert. Stattdessen mussten die Verunreinigungen von Hand aussortiert werden. Dies war möglich, da der Pferdemist von einem Hof mit befestigten Paddocks geholt wurde. Somit waren die Verunreinigungen mit Steinen und Ästen sehr gering. Diese konnten problemlos aussortiert werden. Die Abscheidung von Sand war unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich. Kleinere Metallteile wurden vor der Hammermühle mit einem einfachen Magneten aufgefangen. Die Abbildung 18 bis Abbildung 20 zeigen Beispiele für häufig auftretende Verunreinigungen.



Abbildung 18: Verunreinigung durch einen Stein.



Abbildung 19: Verunreinigung durch einen Ast.



Abbildung 20: Verunreinigung durch groben Sand.

3.3 Vorzerkleinerung

Für eine gleichmäßige und effiziente Trocknung des Pferdemists ist eine Vorzerkleinerung unabdingbar. Pferdemist besteht zum Großteil aus kompakten Kugeln. Diese sind so fest, dass sie durch die mechanische Belastung bei der Förderung und dem Verteilen auf dem Trocknungsband nicht aufbrechen. Dadurch besteht eine kleine Oberfläche, welche ein effizientes Trocknen verhindert. Darüber hinaus bildet sich an der Oberfläche eine Art Kruste. Dies verlangsamt den Trocknungsprozess zusätzlich. Das Aufbrechen dieser festen Strukturen vergrößert die Oberfläche und verhindert die Krustenbildung. Die Pflanzenfaserpartikel wurden durch das Kauen der Pferde schon ausreichend gekürzt. Deshalb wurde der Pferdemist nicht weiter mit Schneidwerkzeugen oder einer Mühle bearbeitet. Es wurden lediglich die Pferdeäpfel zerfasert. Dies wurde mit einem handelsüblichen Gartenhäcksler durchgeführt. Der Viking GE 355 wurde leicht modifiziert. So wurde die Längenbegrenzungsscheibe entfernt. Diese Scheibe sorgt für ein kontrolliertes Nachrutschen der Äste und bestimmt somit die Dicke der erzeugten Hackschnitzel.

Beim Pferdemist führte sie jedoch zu einem Verstopfen des Häckslers. Ebenfalls um ein Verstopfen des Häckslers zu vermeiden, wurden unter das Schneidmesser zwei Räumere aus einer Winkelschiene montiert. Die Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen den Originalzustand des Häckslers sowie die modifizierte Version.

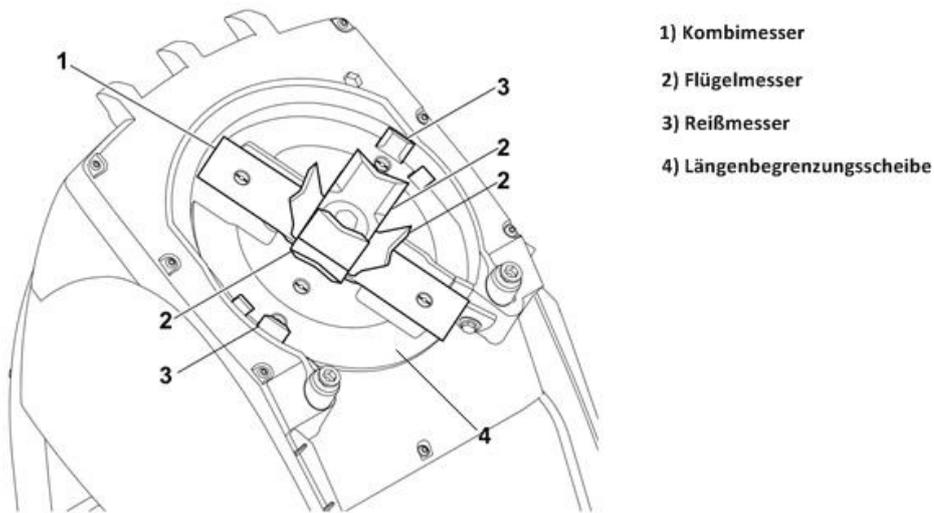


Abbildung 21: Konfiguration des eingesetzten Gartenhäckslers im Auslieferungszustand [74].

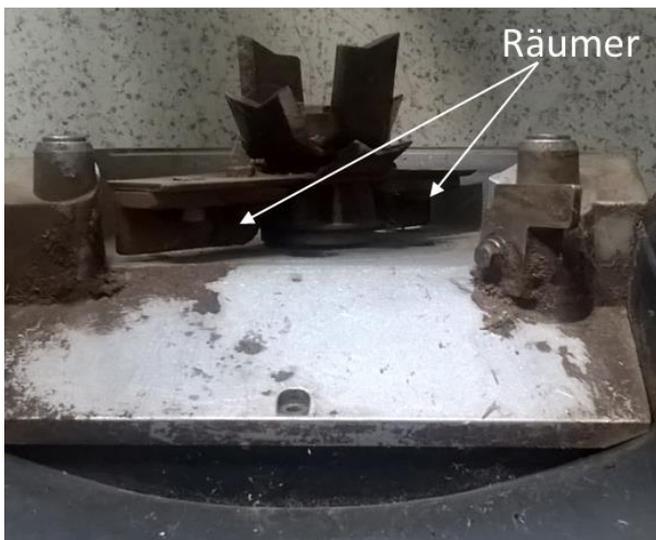


Abbildung 22: Modifizierter Gartenhäcksler mit Räumern unter dem Kombimesser und ausgebauter Längenbegrenzungsscheibe.

Diese einfachen Anpassungen ermöglichten eine ausreichende Auflockerung des Materials und einen ausreichenden Durchsatz, um die Pelletierlinie mit Rohmaterial zu versorgen. Ein Vergleich des frisch angelieferten und des vorzerkleinerten Material ist in den Abbildung 23 und Abbildung 24 zu sehen.



Abbildung 23: Frischer Rohmist bei der Anlieferung.



Abbildung 24: Mist nach der Vorzerkleinerung.

3.4 Mechanische Entwässerung

Die mechanische Entwässerung wurde mit einer Standard-Schneckenpresse durchgeführt. Der Durchsatz der Presse lag bei einer Absenkung des Wassergehaltes um 20 % bei ca. 20 kg pro Stunde. Damit lag er weit unter der benötigten Menge für den kontinuierlichen Betrieb der Pelletierlinie. Aus diesem Grund musste das benötigte Material für eine Messfahrt vorgepresst und gelagert werden. Die Lagerung erfolgte in Big Bags welche mit einer Membran ausgekleidet sind. Dadurch konnte das Material geschützt vor Regen und nahezu Luftdicht bis zur Messfahrt gelagert werden. Dies verhinderte eine Schimmelbildung und das natürliche Trocknen des Pressguts. Beides hätte eine Veränderung der Eigenschaften des Pressguts zur Folge gehabt, welche die Ergebnisse maßgeblich beeinflusst hätte. Dies hätte sich wiederum negativ auf die Vergleichbarkeit mit den ungepressten Chargen ausgewirkt.

Im Vorfeld der Hauptversuche mit der Schneckenpresse wurden Vorversuche mit einer manuell betätigten hydraulischen Presse durchgeführt. Diese Versuche haben die positive Auswirkung der mechanischen Entwässerung in Bezug auf die Absenkung der Störstoffe aufgezeigt. In Abbildung 25 ist das Funktionsprinzip einer Schneckenpresse dargestellt.

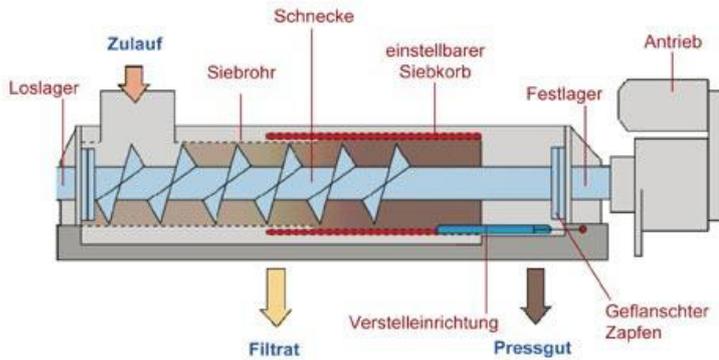


Abbildung 25: Funktionsprinzip der eingesetzten Schneckepresse [75].

3.5 Trocknung

Der Trockner wurde eigens für die Durchführung von Trocknungsversuchen konzipiert. Er basiert auf dem Konzept der Niedertemperaturbandtrocknung. Dies ist der Stand der Technik im Bereich der Biomassetrocknung bei der Nutzung der Abwärme von KWK-Prozessen. Der Trockner spiegelt die Bedingungen in einem Industriebandtrockner wieder. Dies ermöglicht ein direktes Anwenden der ermittelten Daten für Industrieprozesse. In der nachfolgenden Abbildung 26 ist die Funktionsweise von Niedertemperaturbandtrocknern dargestellt.

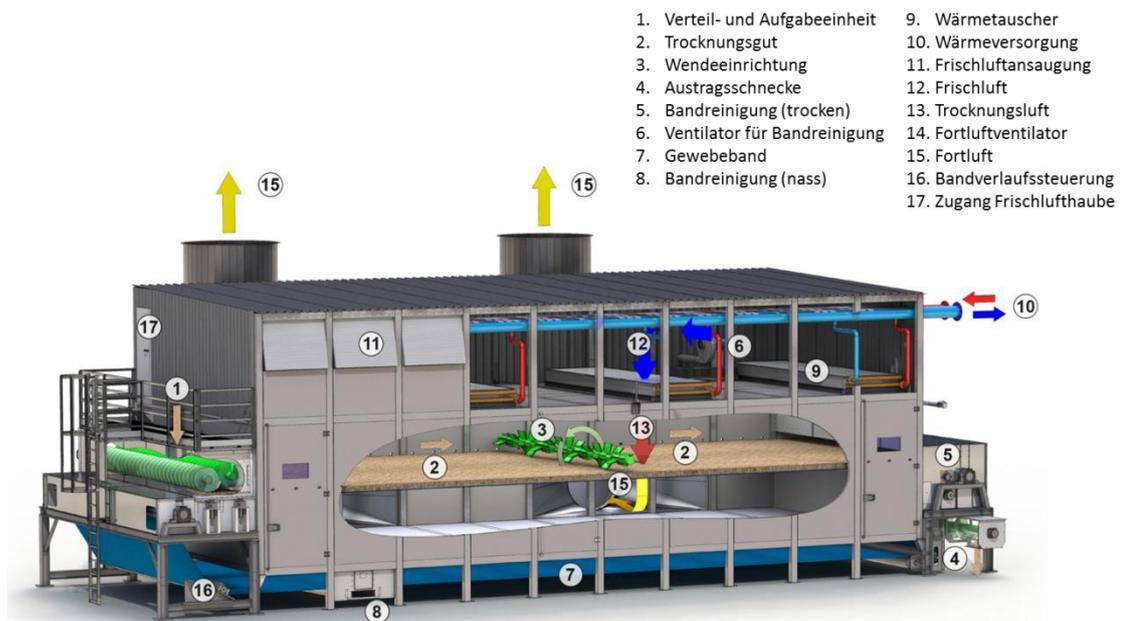


Abbildung 26: Aufbau und Funktion eines Niedertemperaturbandtrockners [76].

Der Trockner bietet Einstellmöglichkeiten für alle relevanten Trocknungsparameter. Die Wärmequelle wird durch einen gasbefeuchten indirekten Luftheritzer dargestellt. Dies ermöglicht das Anfahren von unterschiedlichen Temperaturniveaus. Dabei wird jedoch keine zusätzliche Feuchtigkeit durch den Brennstoff in das Trocknungsgut eingebracht. Zahlreiche Messstellen ermöglichen eine exakte Beobachtung und Optimierung des Trocknungsprozesses. Die Abbildung 27 zeigt ein CAD-Modell des eingesetzten Trockners.

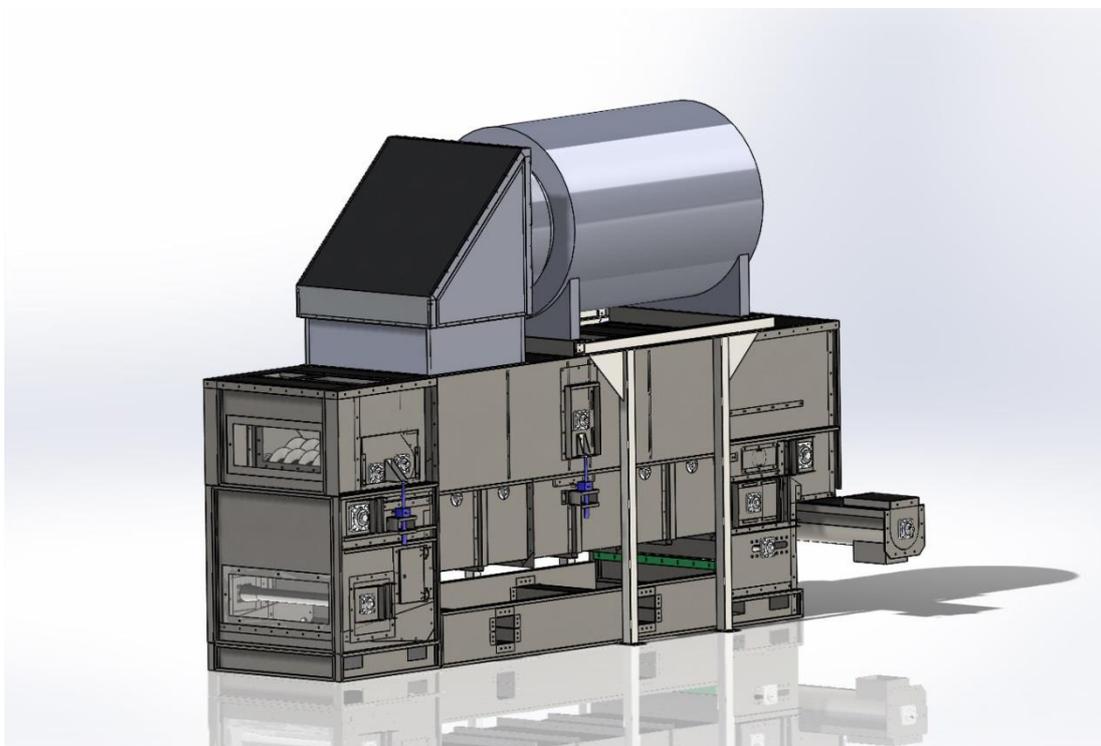


Abbildung 27: CAD-Modell des eingesetzten Bandtrockners [77].

Um einen exakten und stabilen Ausgangswassergehalt zu gewährleisten wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Regelungskonzept entwickelt, welches eine maximale Schwankung des Wassergehalts von $\pm 1\%$ zulässt [50]. Der Energiebedarf wurde wie in Kapitel 2.6.6 beschrieben mithilfe der Verdampfungsrate bestimmt. Diese Methode ermöglichte eine kontinuierliche sehr genaue Bestimmung des Energieeinsatzes.

Im Anschluss an den Trocknungsprozess besteht die Möglichkeit dem Trocknungsgut Zuschlagstoffe beizumischen. Die dazu benötigte Dosiereinrichtung

wurde eigens für diese Anlage entwickelt und gefertigt. Die benötigte Zugabemenge wird von der Steuerung über den aktuellen Durchsatz des Trockners berechnet und dem Produktstrom zugegeben. Der Durchsatz des Trockners wird über Wägezellen im Produktvorlagebehälter über der Presse bestimmt und ständig aktualisiert. Die Zugabe der Zuschlagstoffe vor der Hammermühle bietet den Vorteil einer intensiven Vermischung durch die Hammermühle.

3.6 Nachzerkleinerung

Für eine ideale Produktaufbereitung für das Pelletieren wird das Trocknungsgut nach dem Trocknen noch einmal zerkleinert. Dadurch entsteht eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung. Dies gewährleistet zum einen den störungsfreien und effizienten Pelletiervorgang und zum anderen begünstigt eine kleine Partikelgröße den Feuchteaustausch im Produkt. Der Feuchteaustausch findet im Reifebehälter statt, welcher über der Pelletpresse angebracht ist. Für diesen Aufbereitungsschritt wurde eine einfache Standardmühle gewählt. Die Mühle bietet die Möglichkeit, die innenliegenden Siebe zu wechseln. Die Größe der Lochung der Siebe gibt die Partikelgröße des Mahlguts vor. Für den Pferdemist wurde ein Sieb mit 3 mm Rundlöchern eingesetzt. Dieses Sieb hat sich bei den Versuchen als geeignet erwiesen. Abbildung 28 zeigt den Typ der eingesetzten Hammermühle.



Abbildung 28: Beispiel für den eingesetzten Hammermühlen Typ [78].

3.7 Pelletierung und Kühlung

Für die Pelletierung stand eine Ringmatrizen-Presse zur Verfügung. Dieser Pressentyp entspricht neben den ebenfalls in der Industrie üblichen Flachmatrizen-Pressen dem aktuellen Stand der Technik. Die Presse liefert bei Pferdemist einen Durchsatz von ca. 500 kg/h. Abbildung 29 zeigt das Funktionsprinzip einer Ringmatrizenpresse.

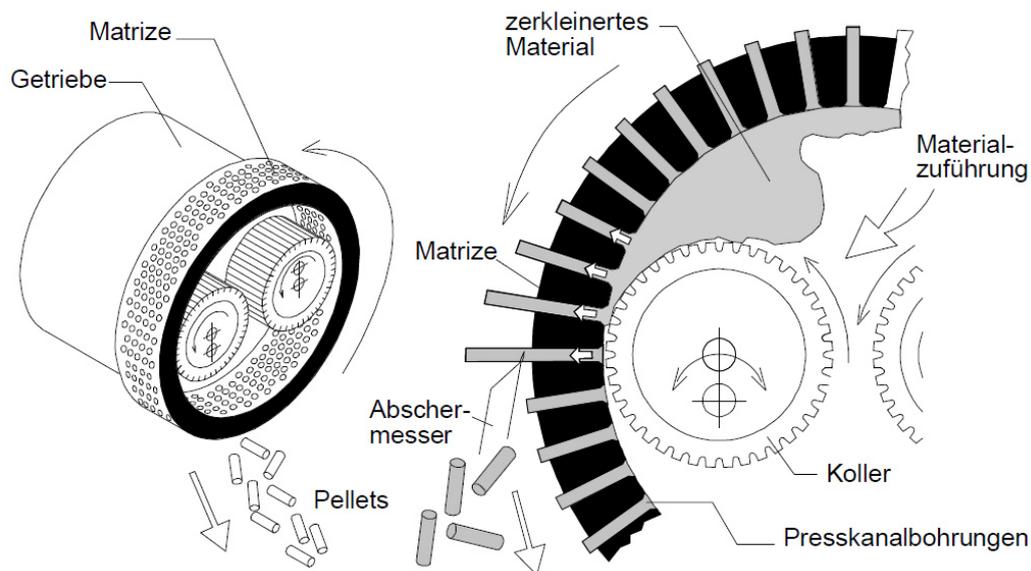


Abbildung 29: Funktionsprinzip einer Ringmatrizenpresse [29].

Die Presse verfügt über eine Dosiereinrichtung für eine geregelte Zufuhr des Pressmaterials sowie über eine Zwangsspeisung. An der Presse wurden keine Modifizierungen vorgenommen. Beim Austritt aus der Presse werden die Pellets über ein Kühlband geleitet. Durch diese Kühlung werden die Pellets auf ca. 5 °C über Umgebungstemperatur abgekühlt. Dadurch werden die Pellets stabilisiert bevor sie in einen Big Bag gefördert werden. Über die Bandkühlung wird auch der Feinanteil abgesaugt und erneut dem Kreislauf zugeführt. Abbildung 30 zeigt ein Schema dieses Prozesses.

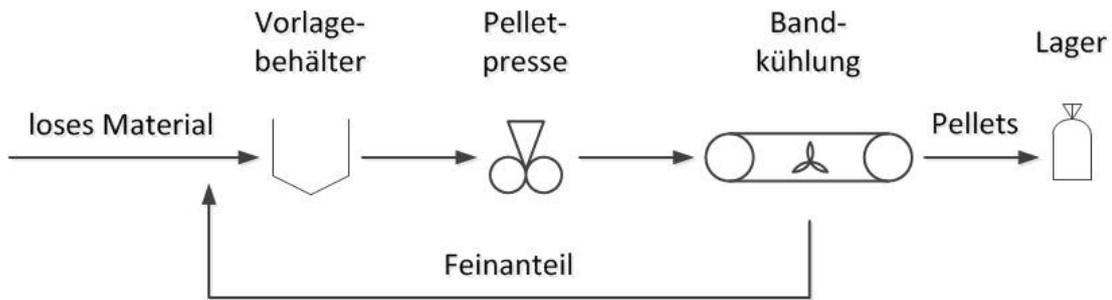


Abbildung 30: Schema der eingesetzten Pelletierung mit Kühlung und Rückführung des Feinanteils.

3.8 Analyse der Brennstoffeigenschaften

Grundlegend für die Bewertung eines sinnvollen Einsatzes eines Brennstoffes ist die Kenntnis über die in Kapitel 2.5.1 beschriebenen charakteristischen Brennstoffeigenschaften. Dazu zählen Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten, flüchtige Bestandteile und Emissionsbildung. Darüber hinaus spielen die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Brennstoffes eine wichtige Rolle, wie in Kapitel 2.5.2 aufgeführt. Hierzu zählen Stückigkeit (Abmessung, Geometrie), Größenverteilung/ Feinanteil, Brückenbildungsneigung, Schütt- bzw. Lagerdichte, Rohdichte (Teilchendichte) und Abriebfestigkeit untersucht.

Die Brennstoffeigenschaften wurden zum Teil im Labor untersucht, zum Teil im industrienahen Prozess und teilweise in beiden Varianten. Die Laboranalysen wurden während der Phase der Vorversuche vom Labor der Professur für regenerativer Energiesysteme der Technischen Universität München in Straubing und von dem Betriebslabor der Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH durchgeführt. Für die Hauptversuche wurde ein akkreditiertes Umweltlabor beauftragt. In diesen Laboren wurden Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten und flüchtige Bestandteile untersucht. Diese Eigenschaften mit Ausnahme der flüchtigen Bestandteile wurden zudem während der Versuchsfahrten zur Prozessüberwachung ebenfalls an der Hochschule Rosenheim ermittelt. Dies erfolgte mit folgenden Messverfahren:

Der **Wassergehalt** wurde nach DIN EN 14774-1 [79] in einem Trocknungsofen oder mit einer PCE MB 200 Feuchteanalysewaage bestimmt.

Der **Brennwert** wurde nach DIN 51900-1 mit einem Bombenkalorimeter bestimmt. Anschließend wurde der Heizwert nach [80] Gleichung (3-1) berechnet.

$$H_{u,p(an)} = H_{o,v(an)} - [k \cdot h_{(an)} + 0,8 \cdot (n_{(an)} + o_{(an)}) + k_1 \cdot w] \quad (3-1)$$

mit:

k	Verdampfungswärme des bei der Verbrennung aus dem Wasserstoff entstehenden Wassers bei 25 °C. (212J/%(H))
k_1	spezifische Verdampfungswärme von Wasser bei 25 °C (24,4 J/%)
w	Massenanteil Wasser der Probe
h	Massenanteil Wasserstoff
n	Massenanteil Stickstoff
o	Massenanteil Sauerstoff

Aschegehalt und **Ascheerweichungstemperatur** wurden nach DIN EN 14775 und DIN CEN/TS 15370-1 unter Einsatz eines Labormuffelofens bestimmt. Am industrienahen Versuchsstand wurde der Aschegehalt bestimmt. Dies erfolgte durch Auswiegen und Auslitern des zugeführten Brennstoffs und der angefallenen Asche. Um eine gute Genauigkeit zu erreichen, wurde der Kessel nach jedem Versuchsdurchlauf komplett gereinigt und die Brennkammer ausgesaugt. Die Messung der Emissionen wird in Kapitel 3.10 ausführlich beschrieben.

Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften wurden ausschließlich an der Hochschule Rosenheim untersucht. Dies wurde mit folgenden Methoden durchgeführt:

Die **Stückigkeit** (Abmessung, Geometrie) wurde nach DIN EN ISO 17829 bestimmt.

Die **Größenverteilung** und der **Feinanteil** wurden nach DIN EN ISO 18846 und DIN EN 15149-1 und bestimmt.

Die **Schüttdichte** wurde nach DIN EN 15103 bestimmt.

Die **Abriebsfestigkeit** wurde nach DIN EN 15210-1 bestimmt.

3.9 Feuerungsversuchsstand

Die Verbrennungsversuche wurden auf einem an der Hochschule Rosenheim installierten Biomassekessel durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen RHK-AK104 von der Firma Heizomat mit einer Nennwärmeleistung von 100 kW. Dieser Kessel basiert auf dem System eines bewegten Rostelements. Dieses wird hier durch eine Aschekette umgesetzt. Der Brennraum ist mit Formteilen aus Feuerbeton ausgekleidet. Dieser Spezialbeton ist bis 2000 °C hitzebeständig. Die Brennkammer selbst, wie auch die Rauchzüge und die Reinigungsschnecken sind aus 6-8 mm starkem Stahl gefertigt. Der Kessel entstammt der Standard-Produktlinie und wurde in der Technik und Regelung nicht verändert. Es wurde lediglich ein Thermoelement angebracht, welches das Messen der Brennraumtemperatur ermöglicht. Manuelle Regelungsmöglichkeiten bestehen durch das Regulieren der Brennstoffzufuhr und der Primär- und Sekundärluft. Abbildung 31 zeigt die Funktionsweise der eingesetzten Feuerung.

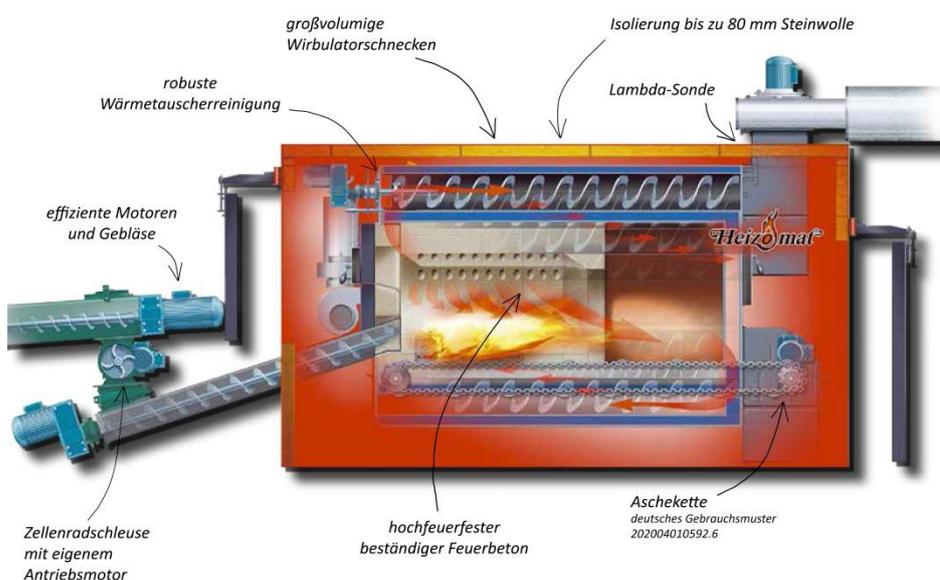


Abbildung 31: Funktionsschema des eingesetzten Feuerungssystems [81].

3.10 Rauchgasanalyse

Für die Rauchgasanalyse wurde ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer, kurz FT-IR, vom Typ CX 4000 der Firma Gasmet eingesetzt. Die Infrarot-Spektroskopie nutzt die unterschiedliche Durchdringung von Gasen und Gasgemischen durch IR-Strahlung. Die Gasatome beginnen durch Aufnahme von Energie aus der IR-Strahlung in den Molekülketten zu schwingen. Diese gaspezifische Dynamik führt bei den meisten Gasen zu einer Absorption der IR-Strahlung bei bestimmten Wellenlängen. Das Infrarot Spektrometer erfasst das Ausmaß der Absorption der IR-Strahlung bei den erzeugten Wellenlängen durch das zu analysierende Gas. Daraus resultiert ein graphisch dargestellter Verlauf des Absorptionsgrades bei den unterschiedlichen Wellenlängen. Diese Grafik wird als Messspektrum bezeichnet. Nach der Aufnahme des Messspektrums, vergleicht die Software dieses mit gespeicherten Referenzspektren. Diese Spektren stellen die Absorption des Reingases dar. Durch das Übereinanderlegen der Spektren kann nun bestimmt werden, welches Gas in welcher Konzentration vorhanden ist. Dabei können zwei Arten von Spektren erzeugt werden.

Die **Transmissionsspektren** stellen die Messung der Intensität des Lichts, welches das Gas durchdringt, als Funktion der Wellenlänge dar. Dabei wird die Transmission durch Gleichung (3-2) berechnet.

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (3-2)$$

mit:

T	Transmission
I	Ausgangsintensität
I_0	Eingangsintensität
λ	Wellenlänge

Erhält man einen Wert von eins bedeutet dies, das 100 % des eingestrahlenen Lichts das Gas durchdringen. Wird Licht absorbiert, erhält man einen Wert kleiner eins.

Absorptionsspektren werden am häufigsten zur Auswertung von Gasuntersuchungen angewandt. Für diese Spektren wird jeweils eine Messung mit Nullgas in diesem Fall reiner Stickstoff und eine Messung mit Messgas durchgeführt. Dabei stellt I_0 den Wert für das Nullgas und I den Wert für das Messgas dar. Die Absorption oder auch Extinktion wird dann aus dem dekadischen Logarithmus der reziproken Transmisson gebildet. Die Berechnung kann mit den Gleichungen (3-3) und (3-4) durchgeführt werden.

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3-3)$$

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \log \frac{I_0}{I} \quad (3-4)$$

Das Ergebnis ist ein für die Auswertung geeignetes Spektrum. Ein Beispiel ist in Abbildung 32 dargestellt.

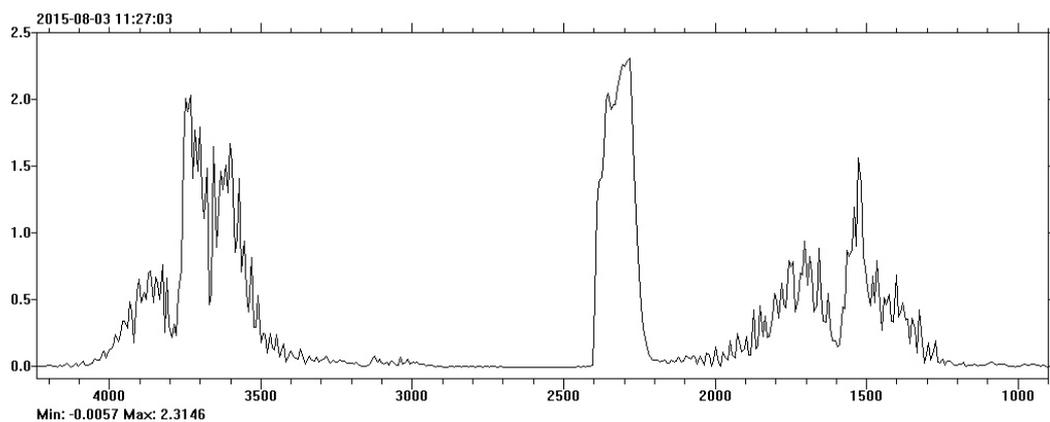


Abbildung 32: Beispiel für ein Absorptionsspektrum.

Die Auswertung ist nun einfach möglich, da der Wert der Absorption A direkt proportional zur Konzentration des Messgases und zur optischen Wellenlänge ist. Die Software kann nun die gespeicherten Referenzspektren mit dem gemessenen Spektrum abgleichen. Dies geschieht solange, bis ein passendes Spektrum gefunden

wurde. Nun kann die Konzentration ausgegeben werden. In Abbildung 33 ist ein Beispiel dargestellt und anschließend kurz erläutert.

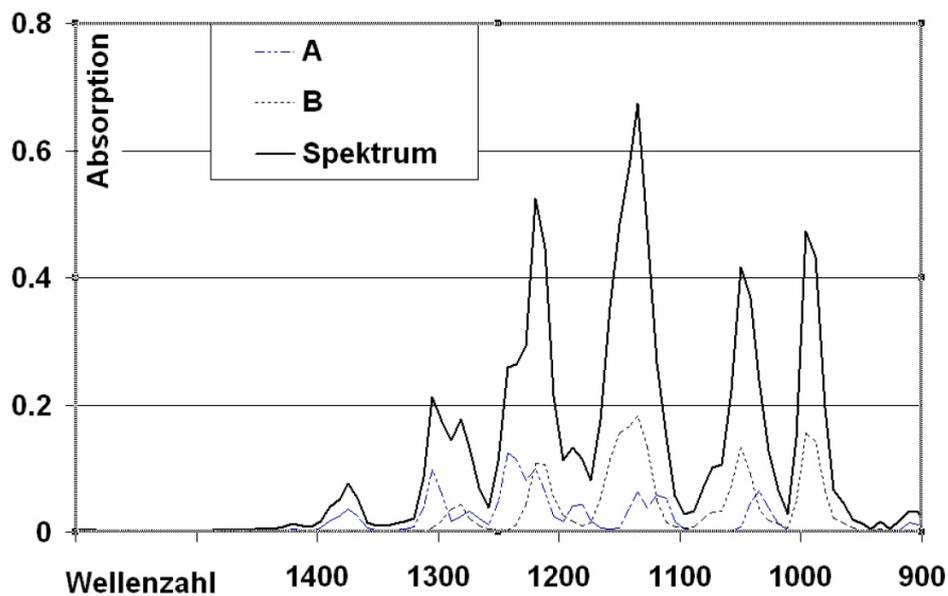


Abbildung 33: Beispiel für eine quantitative Mehrkomponentenanalyse von Calcmet [82].

Der Analysator erkennt zwei Referenzspektren, die Komponenten A und B, welche zum aufgenommenen Spektrum (Linie Spektrum) passen. Das System multipliziert nun die Referenzspektren. Ist der Multiplikator mit der geringsten Abweichung gefunden, ist dies die Lösung. Dieses Verfahren wird für alle Wellenlängen angewandt. Dadurch wird ein sehr genaues Ergebnis erzielt.

Um Verfälschungen der Ergebnisse und eine Beschädigung der Messzelle zu vermeiden, wurde dem FT-IR eine Gasaufbereitungseinheit vorgeschaltet. Die Gasaufbereitung ist mit einer Heizzone und einem Filter ausgestattet. Durch die Kombination mit einer beheizten Entnahmesonde wird das Rauchgas durchgehend auf einer Temperatur von 180 °C gehalten und Ruß- und Staubpartikel abgeschieden. Daraus folgt, dass weder Kondensat noch Verunreinigungen das Ergebnis negativ beeinflussen können.

Um den Sauerstoffgehalt im Rauchgas bestimmen zu können, wurde zusätzlich ein O₂ Analysator mit vorgeschaltetem Messgaskühler integriert. Dieser wird ebenfalls von der Gasaufbereitung gespeist.

Das gesamte Messsystem ist auf Abbildung 34 zu sehen.

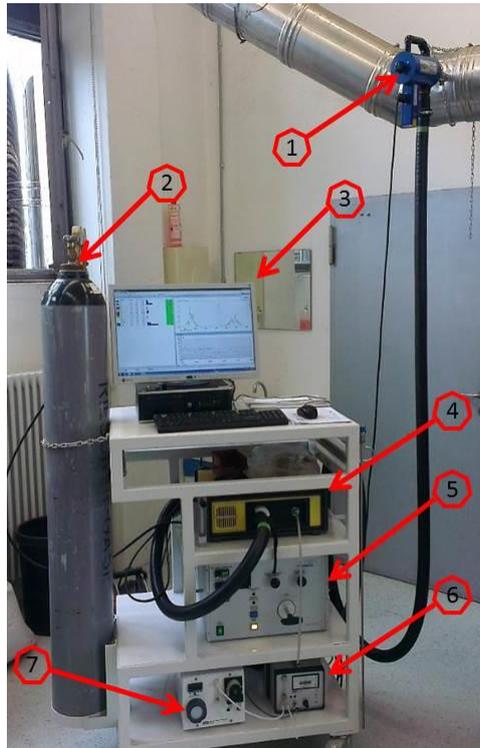


Abbildung 34: Rauchgasmesssystem der Hochschule Rosenheim mit FT-IR.

- 1 Entnahmesonde
- 2 Nullgas (Stickstoff)
- 3 Messrechner
- 4 Analysator
- 5 Messgasaufbereitung
- 6 O₂-Analysator
- 7 Messgaskühler

Die Messungen wurden über eine Dauer von einer halben Stunde durchgeführt. Mit jeder Brennstoffcharge wurden drei Vergleichsmessungen durchgeführt. Bei starken Abweichungen einer Messung wurden zusätzlich weitere Messungen durchgeführt.

3.11 Staubmessung

Vor den Messfahrten konnte noch keine genaue Einschätzung der Staubkonzentration im Rauchgas bei der Pferdemitverbrennung angegeben werden. Es konnte lediglich von einer hohen Staubbeladung ausgegangen werden. Aus diesem Grund war es notwendig, ein robustes Messsystem mit einem großen Messbereich einzusetzen. Da ein solches System nicht verfügbar war und auch nicht angeschafft werden konnte, erklärte sich die Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH bereit, die Messungen durchzuführen. Diese verfügt über das Messgerät FW100 der Firma Sick. Es handelt sich dabei um ein Messsystem für den Einsatz in Industrieanlagen. Aufgrund dieser Gegebenheiten konnte nur eine geringe Anzahl an Messungen durchgeführt werden.

Das eingesetzte Messsystem beruht auf dem Prinzip der Streulichtmessung, dieses Messprinzip ermöglicht das Erfassen sehr kleiner bis sehr großer Partikelkonzentrationen. Das System arbeitet mit einer Laserlichtquelle und einem hochempfindlichen Detektor. Dieser Detektor misst die durch die Staubpartikel verursachte Streuung des Laserstrahls. Das Empfangssignal wird von der Messelektronik verstärkt und verarbeitet. Die gemessene Streulichtintensität verhält sich direkt proportional zur Staubkonzentration. Die Streulichtintensität hängt allerdings nicht nur von der Staubbeladung, sondern auch von den optischen Eigenschaften der Staubpartikel ab. Deshalb ist eine Kalibrierung des Messsystems im Vorfeld der Messungen nötig. Für Pferdemit lagen zum Zeitpunkt keine Kalibrierdaten aus einer gravimetrischen Messung vor. Diese gravimetrische Messung konnte aus Kostengründen auch nicht in Auftrag gegeben werden. Deshalb wurde auf Datensätze zurückgegriffen, welche mit vergleichbarer Biomasse erstellt wurden. Hier lagen verschiedene Datensätze vor und es wurden die Daten für Heu ausgewählt. Abbildung 35 stellt das Messprinzip grafisch dar [83].

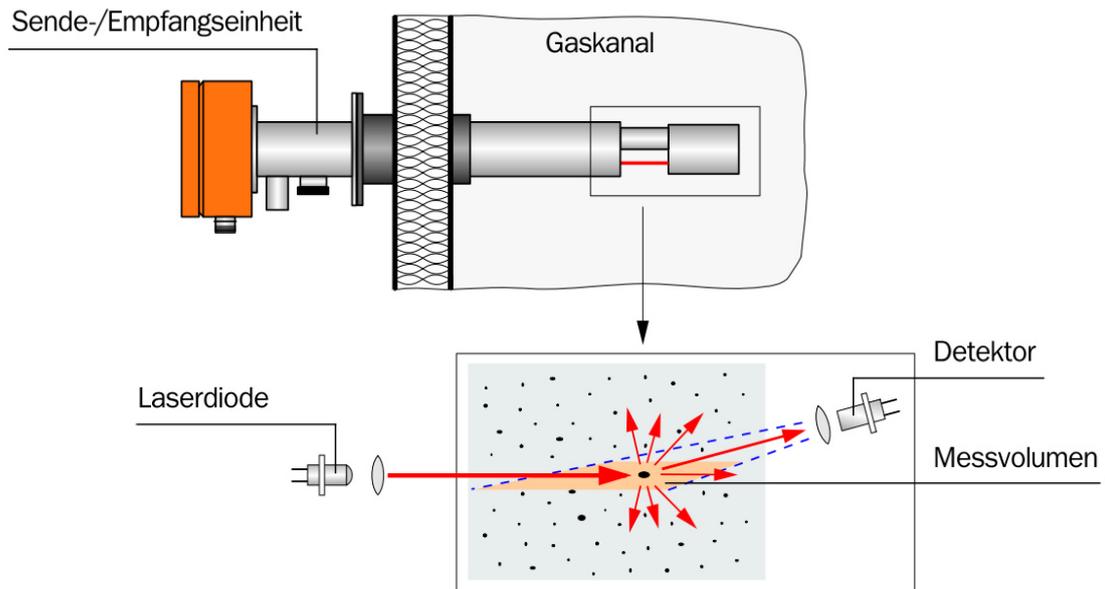


Abbildung 35: Messprinzip FW 100 der Firma Sick [83].

Das System ist eignungsgeprüft und damit zugelassen für Messungen im Rahmen der 13., 17., 27. BImSchV und der TA-Luft. Es zeichnet sich zudem durch die Eignung für schwierige Bedingungen in der Praxis wie Schwankungen der Gasgeschwindigkeit, Feuchte, Ladung der Partikel oder Verschmutzung aus. Da diese Verhältnisse auch am praxisnahen Versuchsstand anzufinden waren, war dies ein geeignetes System. Das Messsystem ermöglichte auch unter diesen Bedingungen sehr genaue Messergebnisse. Zu Es war darauf zu achten, dass eine möglichst gleichmäßige Strömung an der Messstelle vorliegt. Dies wurde durch eine ausreichende Ein- und Auslaufstrecke umgesetzt. Diese Strecken wurden nach Angaben des Herstellers mit jeweils dem dreifachen hydraulischen Durchmesser ausgelegt. Die Messungen wurden mit ausgewählten Proben durchgeführt, um neben der generellen Staubemission bei der Pferdemitverbrennung die Auswirkungen der Aufbereitung auf die Staubentwicklung zu untersuchen. Die Messdauer lag hier bei zwei Stunden pro Messfahrt.

3.12 Elementaranalyse

Die Elementaranalysen der Vorversuche wurden vom Labor der Professur für regenerative Energiesysteme der Technischen Universität München in Straubing

durchgeführt. Hier stand allerdings kein Analysesystem zur Bestimmung von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Sauerstoff (O) und Schwefel (S) zur Verfügung. Es wurden die Anteile von Aluminium (Al), Calcium (Ca), Eisen (Fe), Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Zink (Zn) und Phosphor (P) untersucht. Die Bestimmung der C, H, N, O, S-Werte wurden von der Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH durchgeführt. Bei extremen Schwankungen wurde eine weitere Analyse mit Rückstellproben durchgeführt.

Für die Hauptversuche wurden die Proben in ein akkreditiertes Labor geschickt. Hier konnte eine komplette Brennstoffanalyse aus einer Hand durchgeführt werden.

Da die Proben für die Analyse transportiert werden mussten, wurden diese direkt nach der Entnahme eingefroren. Damit sollte eine Verfälschung der Ergebnisse durch die Lagerung und den Transport minimiert werden.

Dabei wurden die Verfahren Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (F-AAS) für Al, Ca, Fe, K, Na, Mg, Mn und Photometrie für P, C, H, N, O, S angewendet. Diese Analysemethoden entsprechen dem aktuellen Stand der Technik.

3.13 Ascheerweichung und Aschegehalt

Bei der Bestimmung der Ascherweichungstemperatur und dem Aschegehalt wurde in zwei Stufen verfahren. Zuerst wurden jeweils Laborversuche nach DIN EN 14775 [84] durchgeführt. Anschließend wurde das Verhalten des Brennstoffs bezüglich des Ascheanfalls und der Ascheerweichung in der Versuchsfeuerung untersucht. Danach wurden die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Laborversuche wurden nach DIN EN 14775 [84] und DIN CEN/TS 15370-1 [60] durchgeführt. Die Laborversuche ermöglichen dabei eine genaue Erkenntnis über das Ascheerweichungsverhalten, da die Temperaturen für die einzelnen Stadien der Ascheerweichung wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben eindeutig bestimmt werden können.

Für den Einsatz in der Praxis ist die Erweichungstemperatur ausschlaggebend. Bei dieser Temperatur kann es zu Anbackungen und Versinterung kommen. Dies wiederum kann zu Betriebsstörungen und Effizienzeinbußen führen. Halbkugel- und Fließtemperatur sollten im Praxisbetrieb nicht erreicht werden. Werden diese

Temperaturen im Betrieb dennoch erreicht, ist mit erheblichen Störungen im Betrieb bis hin zum Stillstand der Anlage zu rechnen.

Bei den Laboruntersuchungen wurden jeweils drei Proben von einer Charge untersucht. Hierbei wurden im Falle starker Abweichungen ebenfalls zwei weitere Versuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen war eine exakte Bewertung und Bestimmung der ausschlaggebenden Temperaturen möglich. Bei den Versuchen an der Versuchsfeuerung wurden die Auswirkungen auf den Betrieb bewertet. Jedoch konnte nur die Temperatur an der Grenzschicht des Glutbetts zur offenen Flamme gemessen werden. Somit war in den Praxisversuchen keine exakte Bestimmung des Ascheerweichungsverhaltens möglich.

Für den Aschegehalt wurde analog verfahren. Hier sind jedoch die Werte aus den Versuchen am Feuerungsversuchsstand als aussagekräftiger zu bewerten. Dies folgt aus den größeren Brennstoff- und Aschemengen und damit verbunden den geringeren Auswirkungen von Messfehlern.

3.14 Sensorik

Aufgrund der praxisnahen Forschung an einer Anlage im industrienahen Maßstab muss die eingesetzte Sensorik zum einen robust und zum anderen genau sein. Diese Anforderungen werden von den meisten Sensoren und Messsystemen auf dem Markt erfüllt. Alle eingesetzten Messfühler und –systeme wurden kalibriert und somit die maximale Genauigkeit gewährleistet.

Für die **Temperaturmessung** wurden die in Tabelle 20 aufgeführten Sensoren eingesetzt.

Für die Messung der Produkt- und Luftfeuchten wurden die in Tabelle 21 dargestellten Sensoren und Messverfahren eingesetzt.

Des Weiteren wurden für die Messung von Luftgeschwindigkeit, Ascheerweichung und Heizwert die in Tabelle 22 aufgeführten Sensoren und Messverfahren eingesetzt.

Tabelle 20: Eingesetzte Sensoren zur Temperaturmessung bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage.

Sensortyp/ Verfahren	Messbereich °C	Grenzabweichung °C	Vorgabe durch
PT 100	-50 - 400	$\pm(0,3 + 0,005 \text{ ltl})^a$	DIN EN 60751:2009-05 [85]
PT 1000	-40 - 180	$\pm(0,15 + 0,002 \text{ ltl})^a$	DIN EN 60751:2009-05 [85]
Thermoelement Typ K	-40 - 1400	$\pm 1,5$	DIN EN 60584-1:2014-07 [86]

^a ltl = Betrag der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens

rF= relative Luftfeuchte, WG= Wassergehalt, MW= Messwert

Tabelle 21: Eingesetzte Sensoren und Verfahren zur Bestimmung von Wassergehalt und Feuchte bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage und im Versuchslabor.

Sensortyp	Messbereich [%]	Grenzabweichung [%]	Vorgabe durch
Taupunkt	0 – 100 rF	$\pm(1,5 + 1,5\%*MW)$ rF	Hersteller [87]
Radar	0 – 100 WG	$\pm 0,3\%^a$	Hersteller [88]
Trockenschrank	0 – 100 WG	-- ^b	DIN EN 14774-1 [79]
Trockenschrank	0 – 100 WG	-- ^b	DIN EN 14774-2 [89]
Feuchteanalyse- waage	0 – 100 WG	$\pm 0,04\%$	Hersteller [90]

^a nach Erstellen einer Produktspezifischen Kalibrierkurve

^b Die Inhomogenität der Biomasse lässt keine Aussage über die Präzision zu [79] [89]

Tabelle 22: Eingesetzte Sensoren und Verfahren zur Bestimmung von Luftgeschwindigkeit, Aschegehalt und -erweichung und Heizwert bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage und im Versuchslabor.

Sensortyp/ Verfahren	Messbereich	Grenzabweichung %	Vorgabe durch
Dünnschicht- Anemometer	0 – 40 m/s	$\pm 1\%$	Hersteller [91]
Aschegehalt	--	$\pm 2,0\%$	DIN EN 14775 [84]
Ascheerweichung	0 – 1400 °C	--	DIN CEN/TS 15370-1 [60]
Heizwert	--	$\pm 300 \text{ J/g}$	DIN 51900-1 [80]

Die zur Staubbelastung und Rauchgasanalyse eingesetzte Messtechnik wurde in den Kapiteln 3.10 und 3.11 ausführlich beschrieben und wird hier nicht nochmals erläutert.

War es erforderlich aus den Messwerten weitere Werte zu berechnen, wurde dies direkt in der Steuerung der Anlage oder mithilfe von Excel-Tools realisiert. Eine genauere Erläuterung folgt im folgenden Kapitel.

3.15 Datenaufzeichnung und -auswertung

Die Messfahrten lieferten eine große Menge an Daten, welche aufgezeichnet, aufbereitet und schließlich ausgewertet werden mussten. Hierbei war es erforderlich, eine exakte Trennung der Ergebnisse der einzelnen Versuche und eine genaue Dokumentation der Rahmenbedingungen sicherzustellen. Bei der Aufbereitung war die Verwertbarkeit und Plausibilität der ausgewählten Werte zu berücksichtigen. Im Rahmen der Auswertung musste sichergestellt werden, dass konsequent die gleichen Bezugsgrößen und Formeln eingesetzt wurden.

Die Messdatenerfassung erfolgte in Form von Excel-Tabellen. Die aufgenommenen Daten wurden von den Messsystemen direkt in die betreffenden Tabellen gespeichert. Die Messfahrten wurden jeweils mit eigenem Namen und einem Zeitstempel für jeden aufgenommenen Messwert versehen. Dies ermöglichte die exakte Trennung der einzelnen Versuche. Vorlagen in Form von Versuchsprotokollen stellten das Festhalten der Rahmenbedingungen sicher.

Die Auswahl und Aufbereitung der zur Auswertung verwendenden Messwerte erfolgte manuell. Diese aufwendige Methode der Datenauswahl garantierte das Erkennen von Unregelmäßigkeiten und eventuellen Störungen im Prozessablauf und ermöglichte ein Aussortieren dieser Daten. Waren Datensätze durch zu große Schwankungen oder einen instabilen Prozessverlauf völlig unbrauchbar, wurden die Messungen wiederholt. Teilweise wurden mit den ermittelten Werten Berechnungen durchgeführt. Diese Berechnungen wurden entweder direkt mit dem Messdatenerfassungssystem durchgeführt oder mit programmierten Excel-Tools. Anschließend wurden die berechneten Werte direkt als Ausgangswerte gespeichert. Dieses Vorgehen sicherte die korrekte Berechnung ohne Flüchtigkeitsfehler oder ähnlichem.

Zur Auswertung der aufgenommenen Daten wurden Diagramme und Tabellen erstellt. Diese Hilfsmittel vereinfachten die Bewertung und Diskussion der Ergebnisse ergänzend zu den erstellten Datensätzen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse dargestellt. Diese beschreiben die Brennstoffeigenschaften von Pferdemist und geben Aufschluss darüber, ob es sinnvoll ist, Pferdemist vor dem Einsatz als Energieträger in Biomassefeuerungen aufzubereiten. Darüber hinaus bringen die Ergebnisse Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz von Pferdemist als Brennstoff. Auch eine Einschätzung der Eignung der untersuchten mechanischen Aufbereitung mithilfe dieser Ergebnisse ist möglich. Pferdemist ist kein genau definierter Begriff. Er beschreibt lediglich eine Mischung aus Kot und Einstreu und eventuelle Verunreinigungen wie Pferdehaare, Futterreste, Sand, Steine und Äste. Jedoch sagt dies nichts über das Verhältnis von Kot zu Einstreu. Dieses Verhältnis beeinflusst die Brennstoffeigenschaften jedoch erheblich. Liegt ein hoher Einstreuanteil in Form von Sägespänen vor sind die Brennstoffeigenschaften günstiger als bei einem geringen Anteil an Einstreu. Zusätzlich wirken sich die unterschiedlichen Einstreuarten unterschiedlich auf die Brennstoffeigenschaften aus. Am häufigsten kommen hier Sägespäne und Stroh zum Einsatz. Der in dieser Arbeit untersuchte Pferdemist stammt aus einem gewerblich betriebenen Reiterhof. Der Einstreuanteil lag hier im Durchschnitt bei 5 – 10 % bezogen auf die Masse. Dies wurde in Stichproben durch aussieben ermittelt. Die Einstreu bestand aus unbehandelten Fichten- und Tannenspänen.

4.1 Mechanische Aufbereitung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mechanischen Vorbereitung dargestellt. Diese umfassen zum einen das Absenken des Störstoffgehaltes und zum anderen die Verbesserung der Energieeffizienz bei Herstellung der Pellets durch eine Vorzerkleinerung.

4.1.1 Mechanische Vorentwässerung

Die Untersuchung des Prozessschrittes mechanische Vorentwässerung sollte zwei Fragestellungen klären. Zum Einen, in wie weit sich Störstoffe wie Chlor und Schwefel mit der Flüssigphase austragen lassen. Zum anderen sollte eine mögliche Energieeinsparung aufgrund des Austrags an Wasser ohne Phasenänderung untersucht werden. Bei den Störstoffen sollten Chlor (Cl), Schwefel (S), Stickstoff (N) und Kalium (K) abgesenkt werden. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Versuche mit einer Handpresse und der Schneckenpresse (Extruder) dargestellt. Die Vorversuche mittels Handpresse wurden im Rahmen einer im Rahmen dieser Arbeit vergebenen Abschlussarbeit ermittelt [92]. Der Wassergehalt der ungepressten Probe lag dabei bei 69 %. Nach auspressen mit der Handpresse lag der Wassergehalt bei 51 % und nach dem Austritt aus der dem Extruder bei 38 %.

Tabelle 23: Störstoffanteile mit und ohne mechanisches Auspressen (atro, Durchschnittswerte) [92].

	ungepresst [Masse-%]	Handpresse [Masse-%]	Extruder [Masse-%]
Chlor	0,79	0,38	0,18
Schwefel	0,26	0,24	0,16
Stickstoff	1,65	1,56	0,83
Kalium	2,37	1,55	1,21
Calcium	2,22	2,50	1,7
Natrium	0,26	0,16	0,13
Magnesium	0,46	0,43	0,37

Der Energiebedarf lag bei 300 kWh/to. Dieser Wert wird in Kapitel 4.1.4 mit dem Energiebedarf für die thermische Trocknung verglichen.

4.1.2 Vorzerkleinerung und Trocknung

Die ersten Pelletierungsversuche fanden mit unbehandeltem Pferdemist statt. Dieser wurde nach dem Abholen vom Pferdehof direkt auf die Pelletierlinie aufgegeben. Dabei wies der Pferdemist die bekannte stückige Form auf. Die „Pferdeäpfel“ waren teilweise noch deutlich zu erkennen. Ein großer Teil des Mistes war jedoch schon durch die mechanische Einwirkung beim Ausmisten und Verladen in seiner Struktur aufgebrochen. Es entstanden kleine dünne Plättchen mit einer Größe von ca. zehn mal zehn Millimetern und einer Dicke von drei bis fünf

Millimetern. Dies bedeutete eine große vorhandene Oberfläche. Daraus ließ sich schließen, dass eine gute Trocknungsleistung erreicht werden sollte.

Die ersten Versuche zeigten jedoch, dass diese Annahme nicht zutreffend war. Die Funktionsweise der Verteileinheit im Trockner führte zu einer Verdichtung des Materials. Daraus resultierten große, schwer durchströmbare Bereiche im Produktteppich. Daraus resultierte eine erheblich verschlechterte Trocknungseffizienz. Dies rührte zum Großteil daher, dass für die Gewährleistung eines homogenen und vollflächigen Produktteppichs ein gewisser Überschuss in der Verteileinheit vorhanden sein muss. Der Überschuss zirkuliert in der Verteileinheit des Trockners und gleicht Schwankungen in der Materialzufuhr aus. Dies verhindert zuverlässig das Entstehen von Löchern im Produktteppich. Eine unvollständige Produktschüttung würde ein nahezu komplettes Aussetzen des Trocknungsprozesses bewirken.

Eine zweite Aufgabevariante, wurde mit Hilfe einer Programmänderung in der SPS simuliert. Dabei wird das Produkt mit einem kleinen Überschuss durch den Trockner durchgeleitet. Der nicht benötigte Materialanteil wird direkt in den Vorlagebehälter zurück gefördert. Ein Umbau des Versuchstrockners auf dieses System war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, deshalb konnte diese Variante nur simuliert werden. Dazu wurde die Zufördermenge exakt auf den Bedarf eingestellt. Somit konnte ohne Überschuss gefahren werden was die Verdichtung des Materials verhinderte. Allerdings bedingte diese Lösung einen hohen Personalaufwand, um auf Schwankungen im Materialzufluss manuell reagieren zu können. Dieser Lösungsansatz alleine brachte eine deutliche Verbesserung der Trocknungseffizienz. Jedoch war das Ergebnis aufgrund des weiterhin hohen thermischen Energieverbrauchs nicht zufriedenstellend. Aus diesem Grund wurde der Trocknung eine Vorzerkleinerung vorgeschaltet. Dies wurde mit dem oben beschriebenen Häcksler realisiert. Durch die Erhöhung der Oberflächen, welche direkt mit der Trocknungsluft umströmt werden konnten, wurde nochmals eine signifikante Verbesserung der Trocknungseffizienz erreicht. In Abbildung 36 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

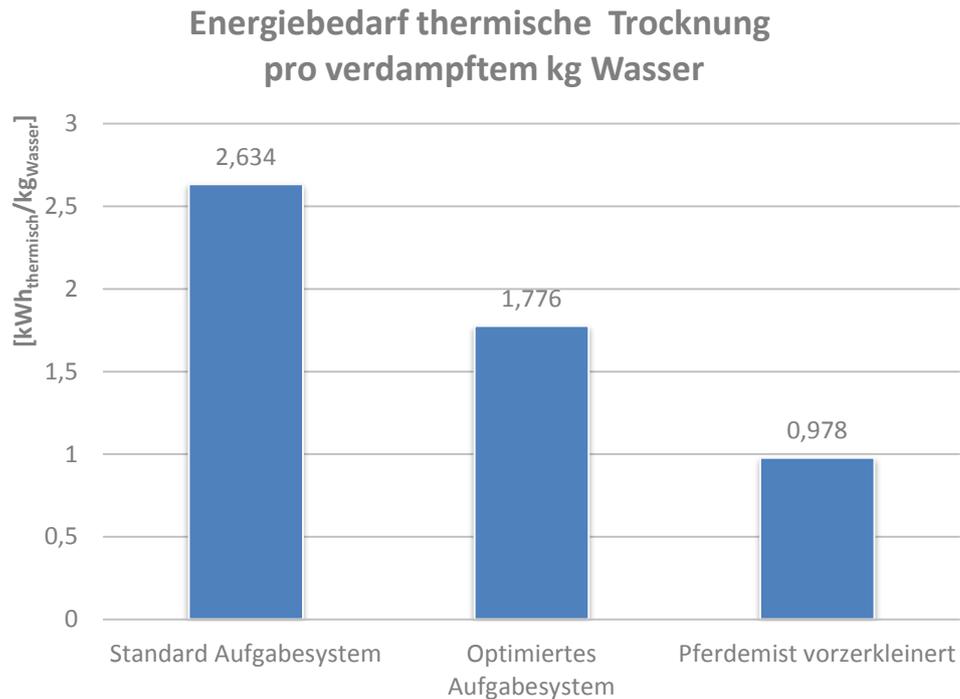


Abbildung 36: Thermischer Energiebedarf in kWh für die Verdampfung pro kg Wasser bei der thermischen Trocknung von Pferdemist beim Einsatz von unterschiedlichen Aufgabesystemen und Vorzerkleinerung.

Für die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs zur Herstellung von Pferdemistpellets wurde neben der thermischen auch die eingesetzte elektrische Energie bei der Trocknung erfasst.

4.1.3 Homogenisieren und Pressen

Um eine hohe Qualität der Pellets sicherzustellen, empfiehlt es sich, das zu verpressende Material nach dem Trocknen zu zermahlen. Dies sorgt für eine gleichmäßige Partikelgröße des Produkts. Bei der hierbei eingesetzten Hammermühle kann die Partikelgröße durch den Einsatz von Sieben mit unterschiedlicher Lochung variiert werden. Es wurden Tests mit unterschiedlichen Rundlochsieben von 0,5 – 6 mm Lochdurchmesser durchgeführt. Dabei hat sich ein Lochdurchmesser von 3 mm für eine hohe Pelletfestigkeit und -oberflächenstruktur besonders bewährt.

Bei den Pressversuchen wurden Matrizen mit unterschiedlichen Bohrungslängen eingesetzt. Der Durchmesser wurde mit 6 mm nach den am Markt üblichen Dimensionen ausgewählt. Das Verdichtungsverhältnis lag bei 1 : 6,33. Dabei wurde eine Schüttdichte von 450 kg/m^3 erreicht. Diese Schüttdichte ist deutlich geringer als die bei Holzpellets. Eine stärkere Verdichtung erhöht die Schüttdichte. Dies funktioniert jedoch nur bei Pferdemist ohne Zuschlagstoffe. Wird Calciumcarbonat in Anteilen größer 4 % hinzugegeben, verstopft die Matrize bei einem Verdichtungsverhältnis größer 1:6,33 sehr schnell. Ein Pressen von Pellets mit einem Calciumcarbonatanteil größer 8 % war nicht möglich. Hier kam es zu extremer Hitzeentwicklung, was letztendlich zu einem Brand in der Pelletpresse führte. Die Probencharge mit 10 % Additiv musste somit in loser Form den Verbrennungsversuchen zugeführt werden. Um bei allen Proben ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten, wurden alle Proben mit derselben Bohrungsgeometrie hergestellt.

Die Abriebsfestigkeit ist auch ohne Presshilfsmittel durchaus zufriedenstellend. Die Pellets konnten konstant mit hoher Qualität erzeugt werden. In Tabelle 24 sind die durchschnittlichen physikalischen Eigenschaften aller Probenchargen aufgeführt.

Tabelle 24: Durchschnittliche physikalische Eigenschaften der erzeugten Pferdemistpellets im Vergleich mit Normwerten [43], [32].

Anforderung	Einheit	DIN EN ISO 17225-2 gewerblich und häuslicher Bereich	DIN EN ISO 17225-2 industrielle Verwendung	DIN EN ISO 17225-6	Pferde- mist- pellets
Durchmesser, D	mm	D06, 6 ± 1 mm	D06, 6 ± 1 mm	D06 bis D25, $D \pm 1$	5,974
Länge, L	mm	$3,15 < L \leq 40$	$3,15 < L \leq 40$	$3,15 < L \leq 40$	24,70
Mechanische Festigkeit, DU	m-%	$DU97,5 \geq 97,5$	$97,5 \leq DU \leq 99,0$	$97,5 \leq DU \leq 99,0$	98,1
Feingutanteil, F	m-%	$F1,0 \leq 1,0$	$F4,0 \leq 4,0$	$F4,0 \leq 4,0$	2,0
Schüttdichte, BD	kg/m^3	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$	450 - 650

Die erzielten Durchschnittswerte belegen das Einhalten der in den Normen aufgeführten Anforderungen für die physikalischen Eigenschaften. Der Feinanteil, welcher nicht verpresst und abgesaugt werden musste, lag bei 4 %. Auch dieser Wert liegt somit im normalen Bereich bei der Pelletierung von Biomasse.

4.1.4 Gesamtenergiebedarf für die Pelletierung von Pferdemist

Für die Bewertung der Eignung von Brennstoffpellets aus Pferdemist spielen nicht nur die mechanisch-physikalischen Eigenschaften eine wichtige Rolle, es müssen ebenso die ökonomischen Aspekte berücksichtigt werden. Um hier eine fundierte Einschätzung abgeben zu können, müssen Erkenntnisse über den zur Produktion benötigten Energiebedarf gewonnen werden. Um einen Vergleich mit dem in der Praxis üblichen Energieaufwand für die Pelletierung von Biomasse führen zu können, wurden auf der Forschungsanlage auch Holzpellets produziert. Dies ermöglicht einen Vergleich mit den in der Praxis eingesetzten großindustriellen Anlagen. Tabelle 25 zeigt den Energiebedarf für die Pelletierung von Holzspänen und Pferdemist auf der Forschungsanlage im Vergleich zu dem in der Literatur angegebenen Energiebedarf für die Produktion von Holzpellets. Eine Verpackung und ein Transport in ein Lager fanden bei den Messfahrten nicht statt. Der Energiebedarf für diese Prozessschritte ist in Form von Literaturwerten unter dem Punkt Peripherie berücksichtigt. Der Energieaufwand für Fördereinrichtungen, Zellenradschleuße und Brückenbrecher im Vorlagebehälter sind ebenfalls im Punkt Peripherie enthalten. Wurde der Pferdemist mechanisch entwässert, war keine Vorzerkleinerung nötig. Die sich daraus ergebenden Werte sind ebenfalls in Tabelle 25 aufgeführt.

Tabelle 25: Benötigter Energieeinsatz für die Produktion von Pferdemistpellets und Holzpellets auf der Forschungsanlage in kWh/to, im Vergleich zu den Literaturwerten von [52].

Prozessschritt	Pferdemist vorzerkleinert [kWh/to]	Pferdemist mech. Entwässert [kWh/to]	Sägespäne [kWh/to]	Sägespäne Literaturwerte [kWh/to]
Mech. Entwässerung	--	300	--	--
Vorzerkleinerung	2,5	--	--	--
Trocknen thermisch	1924	870	980	1200
Trocknen elektrisch	54,8	50,6	50	23,8
Zerkleinern	3,2	2,8	4	18,7
Pelletierung	34,3	34,3	62	51
Kühlung	5,1	5,1	5,1	2
Peripherie	10,3 ¹⁾	9,3 ¹⁾	8,8 ¹⁾	18,35
Gesamtprozess	2034	1272	1110	1314

¹⁾ Literaturwerte

4.2 Analyseergebnisse der einzelnen Brennstoffchargen

Von den untersuchten Brennstoffchargen wurden jeweils Elementaranalysen und bei der anschließenden Verbrennung Rauchgasanalysen durchgeführt. Dies sollte eine Bewertung der Wirkung der eingesetzten Aufbereitungsschritte ermöglichen. Darüber hinaus sollten eventuelle Schwankungen in der Elementarzusammensetzung aufgezeigt werden. Dafür wurden jeweils Proben vor und nach der Aufbereitung entnommen und im Labor analysiert. Um bei den Messfahrten möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, wurden im Bereich der Brennstoffeigenschaften Vorversuche durchgeführt. Diese Versuche wurden im Rahmen von Abschlussarbeiten durchgeführt. Diese Herangehensweise diente dem Ermitteln erster Kenntnisse über den Brennstoff und die eingesetzte Technik. Dadurch war eine angepasste Abstimmung der Produktions- und Analysesysteme möglich.

4.2.1 Brennstoffanalysen

Die benötigten Probenchargen konnten aufgrund des Logistikaufwands und des großen Arbeitsaufwands nicht alle auf einmal hergestellt werden. Dies führte dazu, dass teilweise längere Zeiträume zwischen dem Aufbereiten der einzelnen Probenchargen lagen. Da das Rohmaterial immer direkt vor der Probenherstellung geholt wurde, konnte nicht von gleichen Ausgangsbedingungen bezüglich der stofflichen Zusammensetzung ausgegangen werden. Diese Vermutung bestätigte sich durch Vorversuche, welche im Rahmen dieser Arbeit als Abschlussarbeiten, [93], [92] durchgeführt wurden. Tabelle 26 zeigt die in diesen Untersuchungen ermittelte durchschnittliche Elementarzusammensetzung von Rohmist. Tabelle 27 zeigt die in den Vorversuchen ermittelten Werte für die brennstofftechnischen Eigenschaften laut Analyselabor.

Tabelle 26: Durchschnittswerte der Vorversuche für die Elementarzusammensetzung von Pferdemist [93].

Element	Masse %, atro	Element	Masse %, atro	Element	Masse %, atro
Wasser	65,640	Ca	1,488	Ti	0,043
Asche	14,660	Si	2,508	Mn	0,025
S	0,210	Al	0,258	P	0,231
C	41,300	Fe	0,152	Sr	0,005
H	5,620	Mg	0,472	Zn	0,007
N	1,100	S	0,197	Ba	0,005
Hg	0,010	K	1,053	Cr	0,005
Cl	0,791	Cl	0,598	Ni	0,005
O	36,309	Na	0,147		

Tabelle 27: In den Vorversuchen ermittelte durchschnittliche Werte für Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt und Ascherweichungstemperatur [54].

Eigenschaft	Wert
Durchschnittlicher Wassergehalt [Masse-%]	65,82
Durchschnittlicher Heizwert, wf [MJ/kg] [54]	17,5
Durchschnittlicher Aschegehalt, Laborofen [Masse-%]	15,97
Durchschnittliche Ascheerweichungstemperatur, DT [°C]	1145

Abbildung 37 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Wassergehalts aller im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Frischmist Proben. Die Proben wurden vom Labor der Professur für regenerative Energiesysteme der Technischen Universität München analysiert. Die Häufigkeitsverteilung lässt den starken Schwankungsbereich der Proben erkennen. Es wurden Proben aus allen Jahreszeiten untersucht. Wie zu erwarten, waren die Wassergehalte bei Ställen mit großen Paddocks im Sommer deutlich geringer als im Winter. Bei der Boxenhaltung war der unterschied tendenziell geringer. Proben aus der Boxenhaltung liegen jedoch nur vereinzelt vor und sind in der gezeigten Häufigkeitsverteilung nicht aufgeführt.

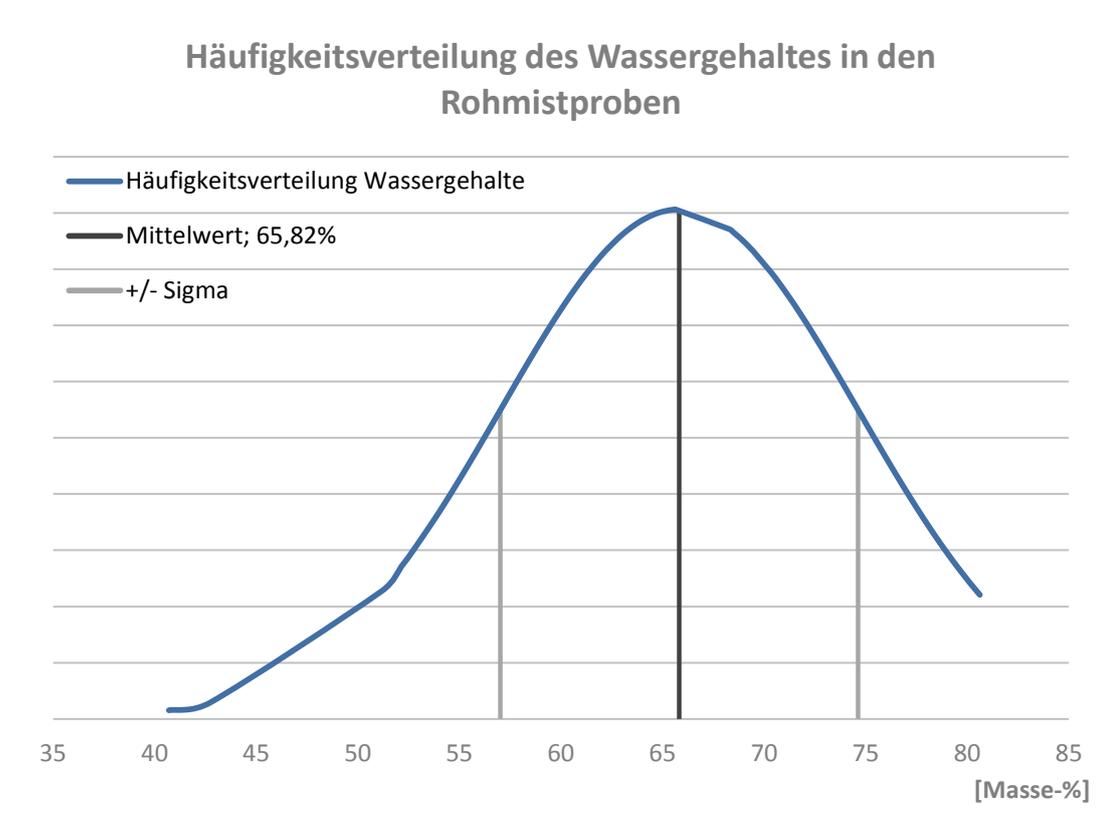


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der in den Laboren der Technischen Universität München und der Hochschule Rosenheim gemessenen Wassergehalte, n=204.

In Abbildung 38 ist die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Stickstoffgehalte der Rohmistproben dargestellt. Im Vergleich zu den anderen gemessenen Elementen wie Ca oder Cl ist hier eine relativ geringe Schwankung der Messwerte zu erkennen.

Häufigkeitsverteilung des Stickstoffs in den Rohmistproben

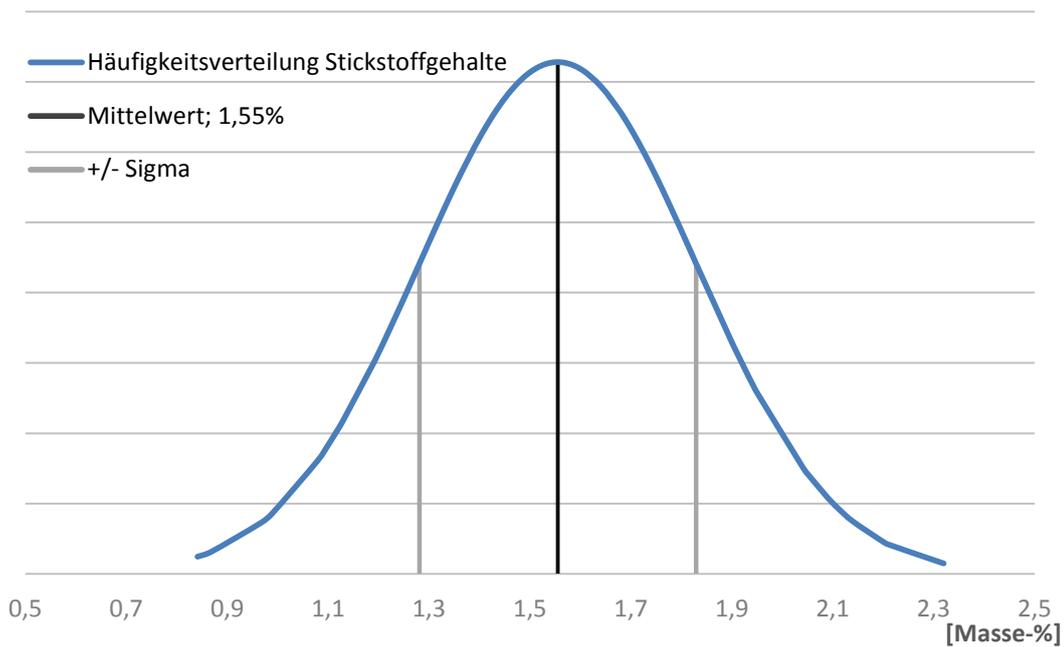


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Stickstoffgehalte, n=123.

Abbildung 39 ist die Häufigkeitsverteilung der in den Rohmistproben gemessenen Schwefelgehalte zu sehen. Die Analyseergebnisse von Schwefel weisen eine große Schwankungsbreite auf.

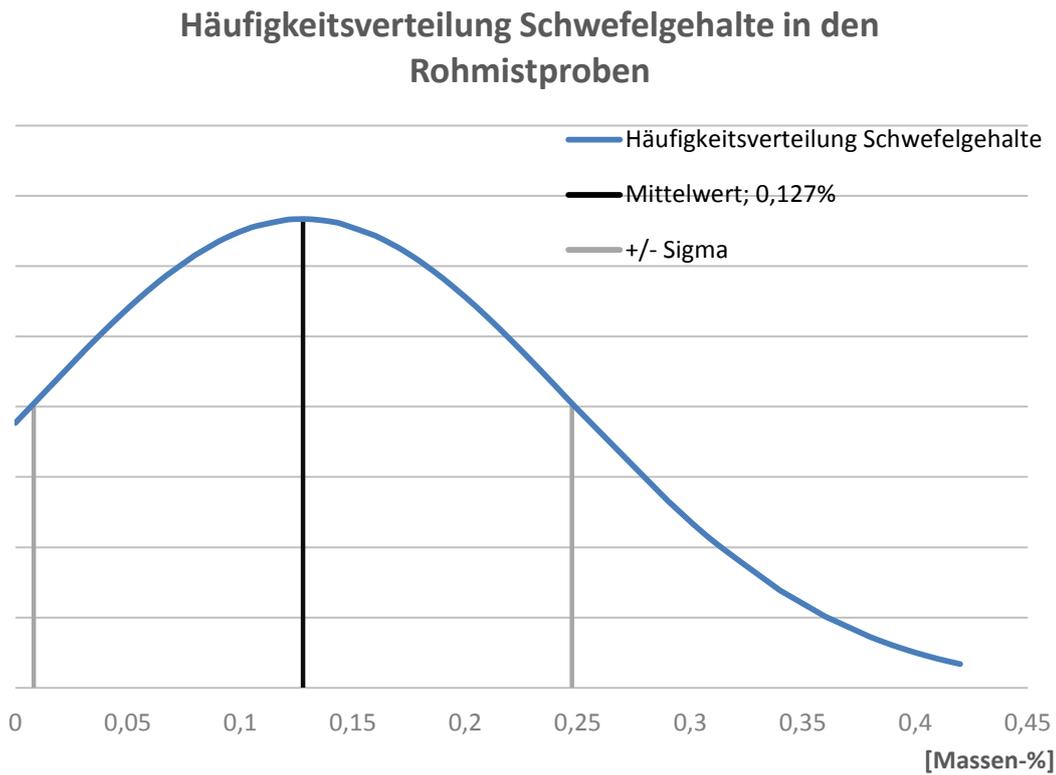


Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Schwefelgehalte, n=123.

Die Ergebnisse der Analysen für den Chlorgehalt der Rohmistproben sind in Form einer Häufigkeitsverteilung in Abbildung 40 aufgeführt.

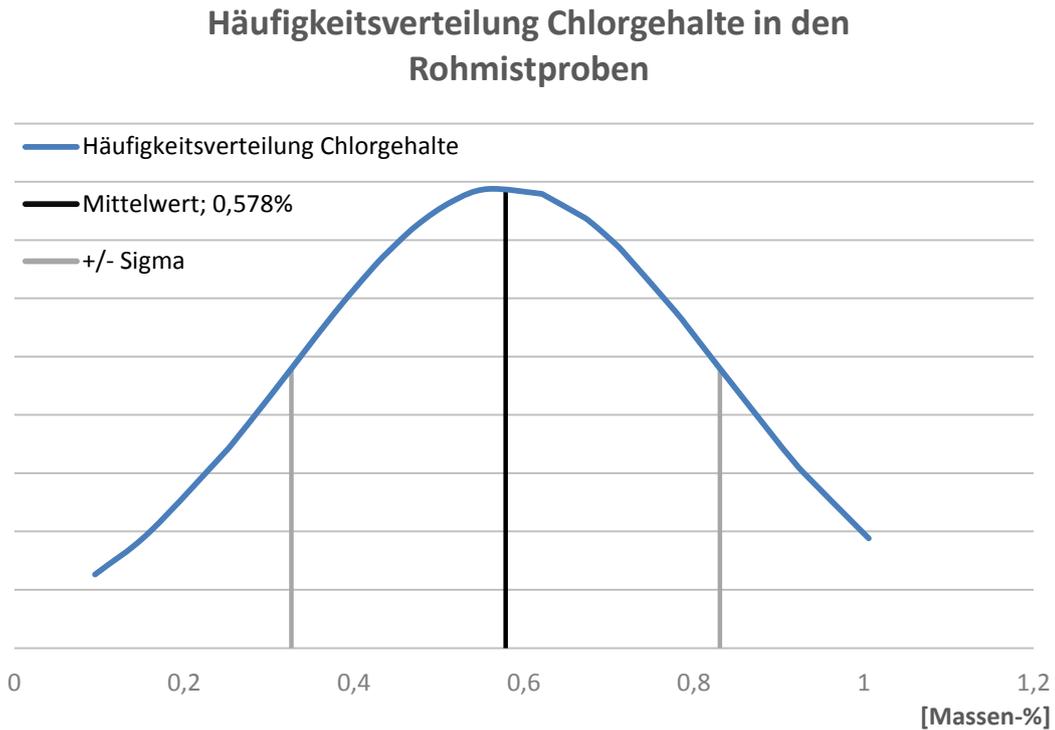


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Rohrdorfer Zementwerke Gebr. Wiesböck GmbH gemessenen Chlorgehalte, n=31.

Die Schwankungsbreite und Verteilung der gemessenen Kaliumgehalte der untersuchten Rohmistproben sind in Abbildung 41 zu sehen. Der Kaliumgehalt ist im Zusammenspiel mit dem Calcium- und Magnesiumgehalt entscheidend für die Ascherweichungstemperatur. Dieser Zusammenhang ist in Kapitel 2.7.3 näher erläutert.

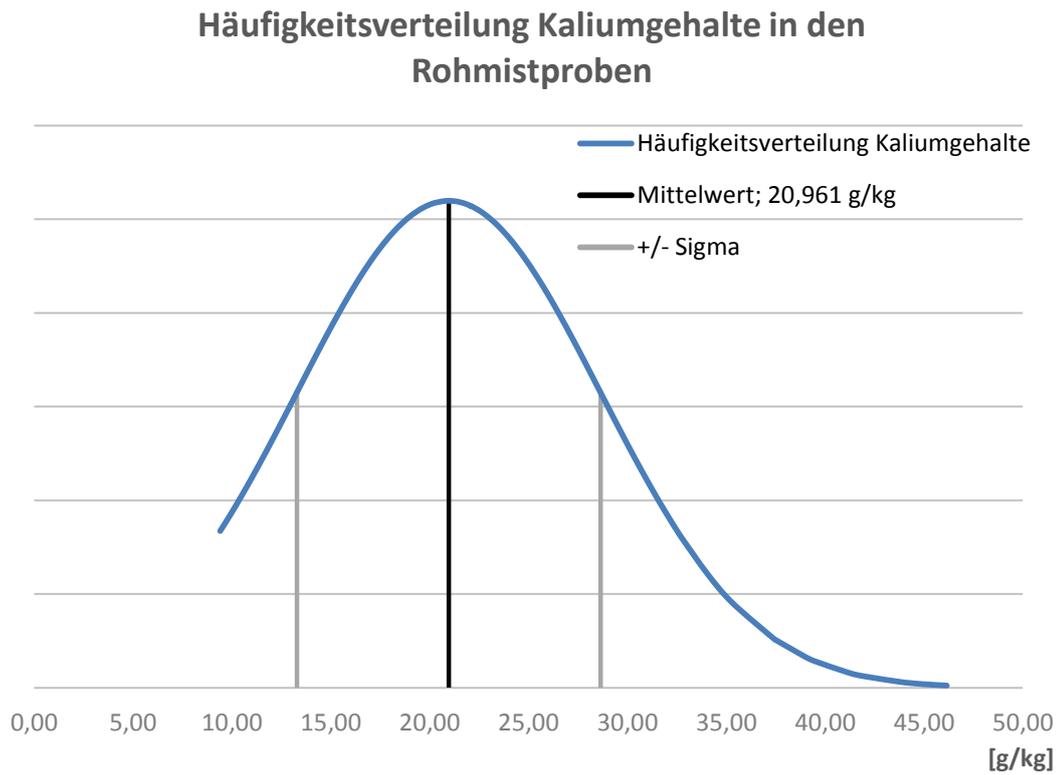


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Kaliumgehalte, n=221.

Abbildung 42 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Calciumgehalte der analysierten Rohmistproben.

Häufigkeitsverteilung Calciumgehalte in den Rohmistproben

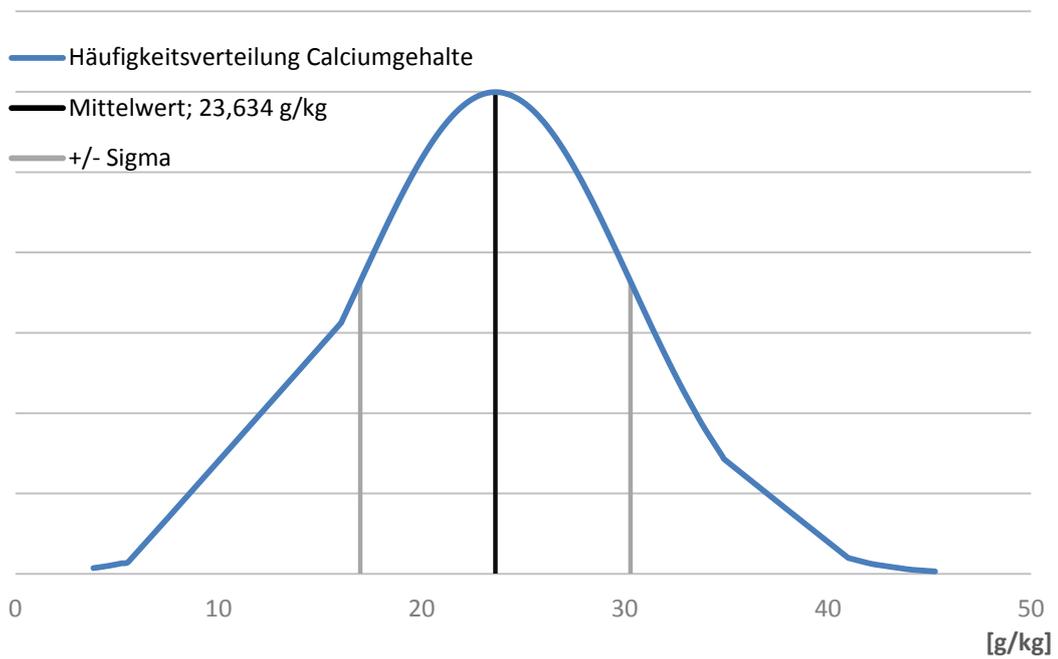


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Calciumgehalte, n=225.

Die in Abbildung 43 dargestellte Häufigkeitsverteilung zeigt die Magnesiumgehalte der Rohmistproben.

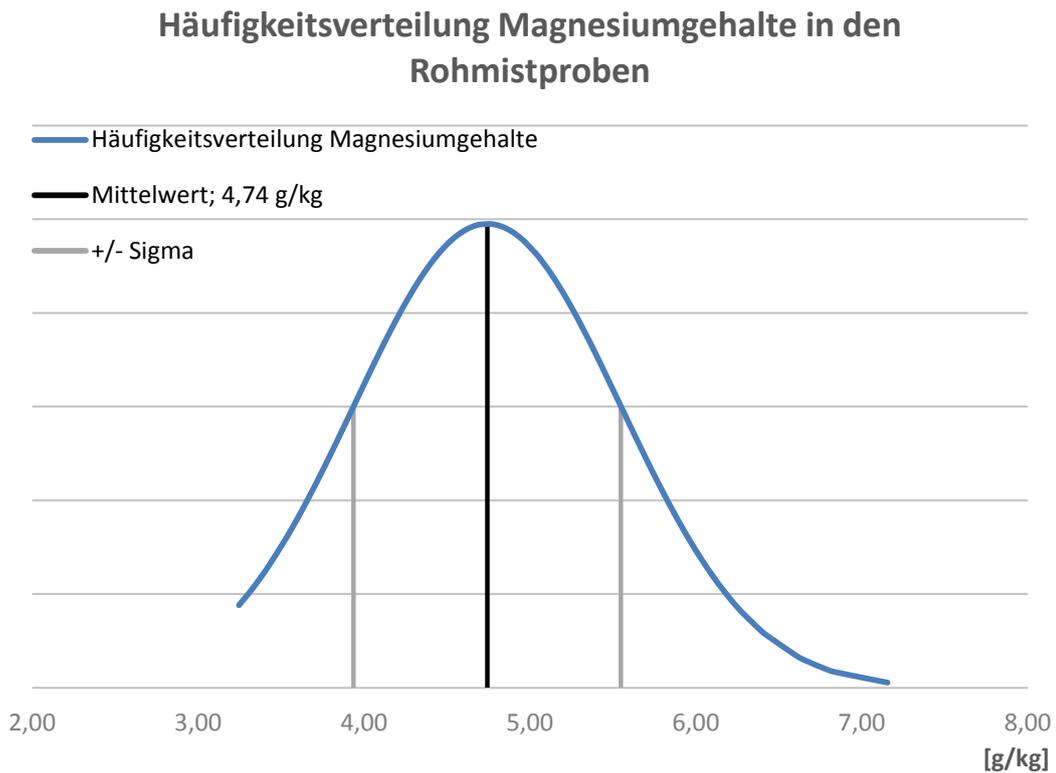


Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Magnesiumgehalte, n=216.

Bei allen Abbildungen zu erkennen ist die große Schwankungsbreite der Werte. Dies liegt an den sehr kleinen Probengrößen von 0,1 Gramm für die Elementaranalyse. So kann bei der Elementaranalyse ein Sandkorn oder ein Sägespan das Ergebnis schon signifikant beeinflussen.

Die Analysewerte der kooperierenden Labore wurden darüber hinaus durch eigene Messfahrten bezüglich des Aschegehalts ergänzt. Diese wurden zum einen unter Laborbedingungen und zum anderen unter praxisnahen Bedingungen am Feuerungsversuchstand durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 44 aufgeführt.

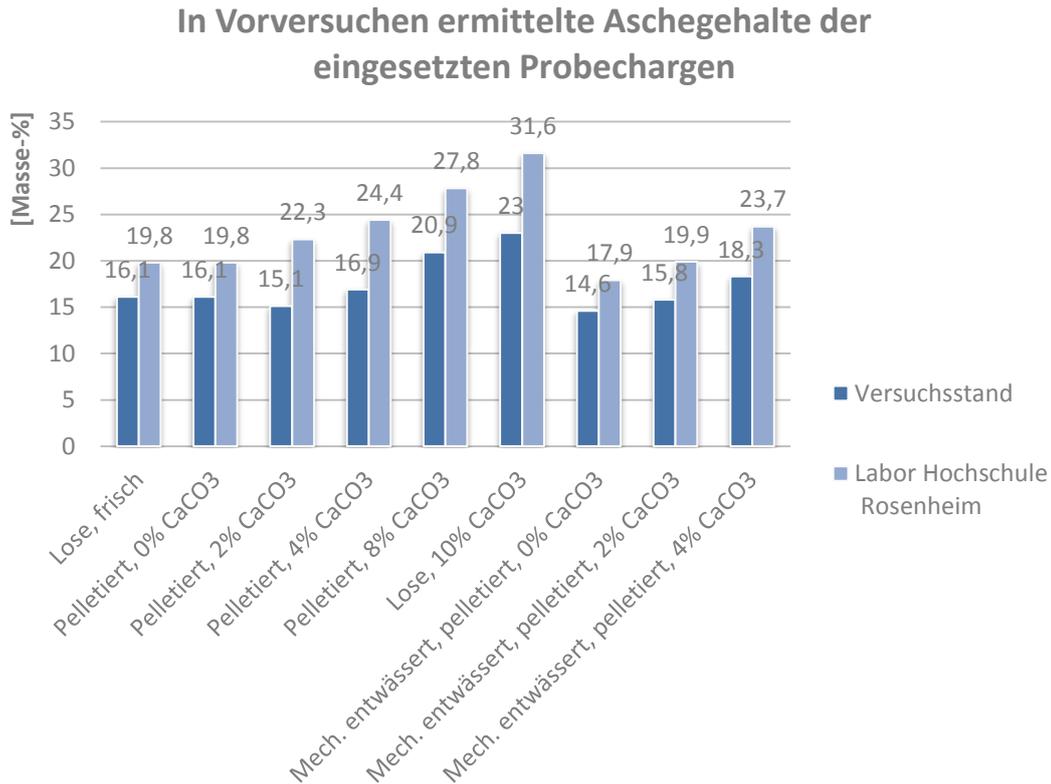


Abbildung 44: In Vorversuchen ermittelte Aschegehalte der eingesetzten Probechargen unter Labor- bzw. praxisnahen Bedingungen [93].

Von den für die Hauptversuche eingesetzten Probenchargen wurden Stichproben entnommen und von einem akkreditierten Umweltlabor analysiert. Dabei wurde die Bandbreite der untersuchten Elemente erweitert. Es wurden zusätzlich die Gehalte von Zink (Zn), Kupfer (Cu), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Cadmium (Cd) und Arsen (As) bestimmt. Abbildung 46 bis Abbildung 62 zeigen die Analyseergebnisse für die wichtigsten Brennstoffeigenschaften der verschiedenen Proben. Es werden die für die Verbrennung ausschlaggebenden Bestandteile und Eigenschaften dargestellt, welche in Kapitel 4.1.3 noch nicht dargestellt wurden. Die folgende Abbildung 45 zeigt den Anteil an flüchtigen Bestandteilen in den untersuchten Pferdemistproben.

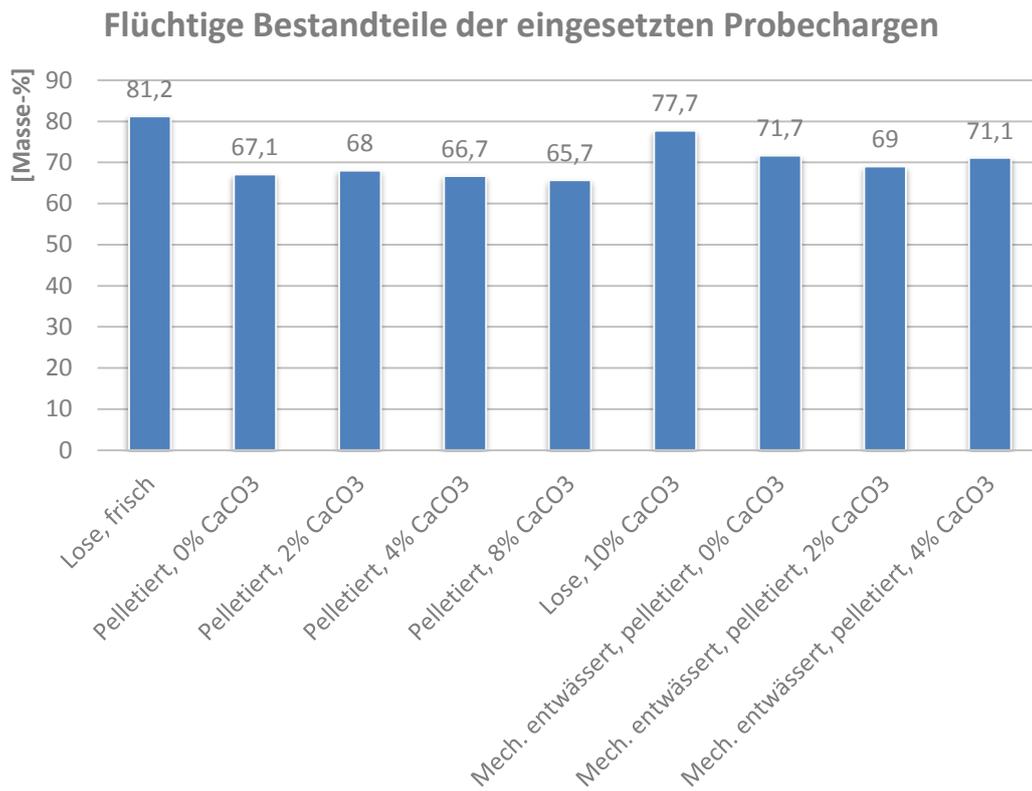


Abbildung 45: Anteil der flüchtigen Bestandteile der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Der Heizwert der in den Hauptversuchen eingesetzten Probenchargen ist in Abbildung 46 dargestellt.

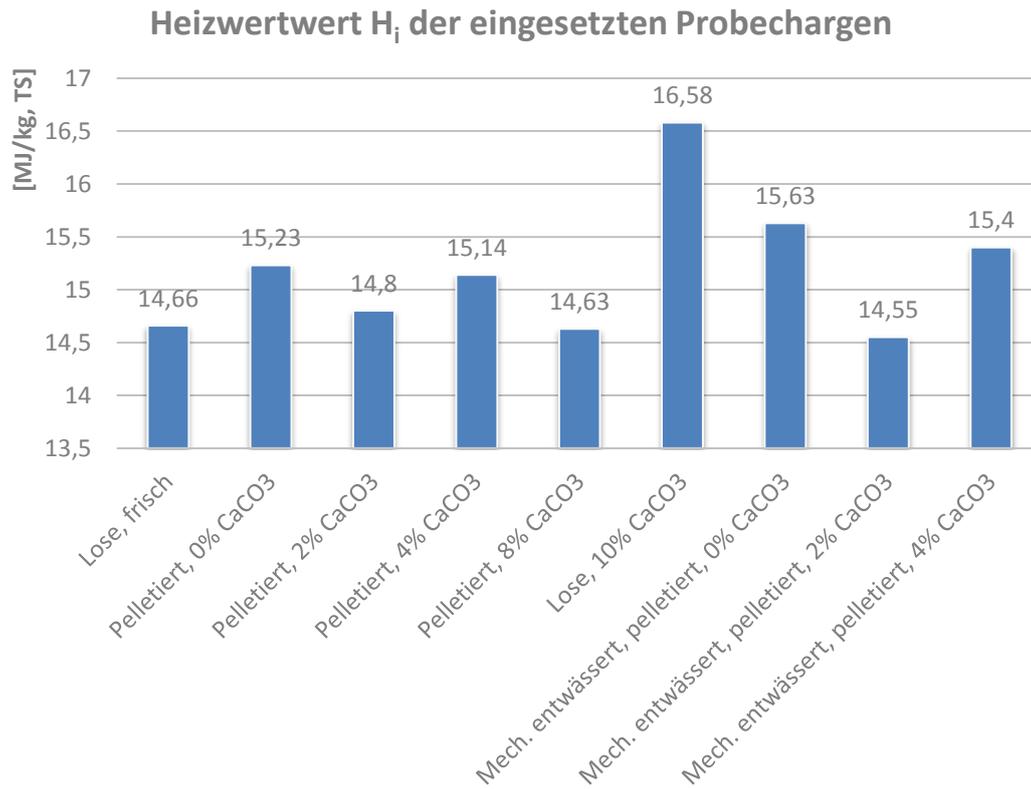


Abbildung 46: Heizwert H_i der untersuchten Probechargen in MJ/kg, atro.

In Abbildung 47 ist ein Vergleich der Veraschung unter Laborbedingungen und dem Ascheanfall bei der Verbrennung auf dem Versuchstand zu sehen.

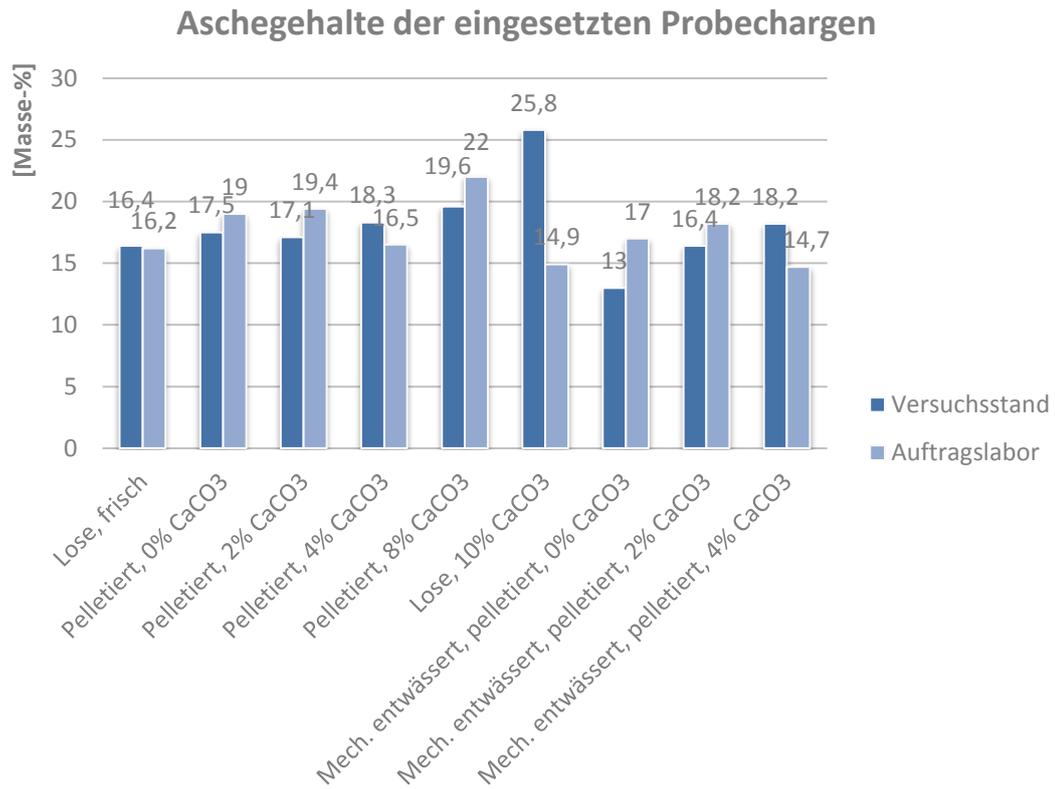


Abbildung 47: Aschegehalte der untersuchten Probechargen unter Labor und Versuchsstand in Masse-%, atro.

Die durch das akkreditierte Umweltlabor bestimmten Ascheerweichungstemperaturen sind in Abbildung 48 dargestellt.

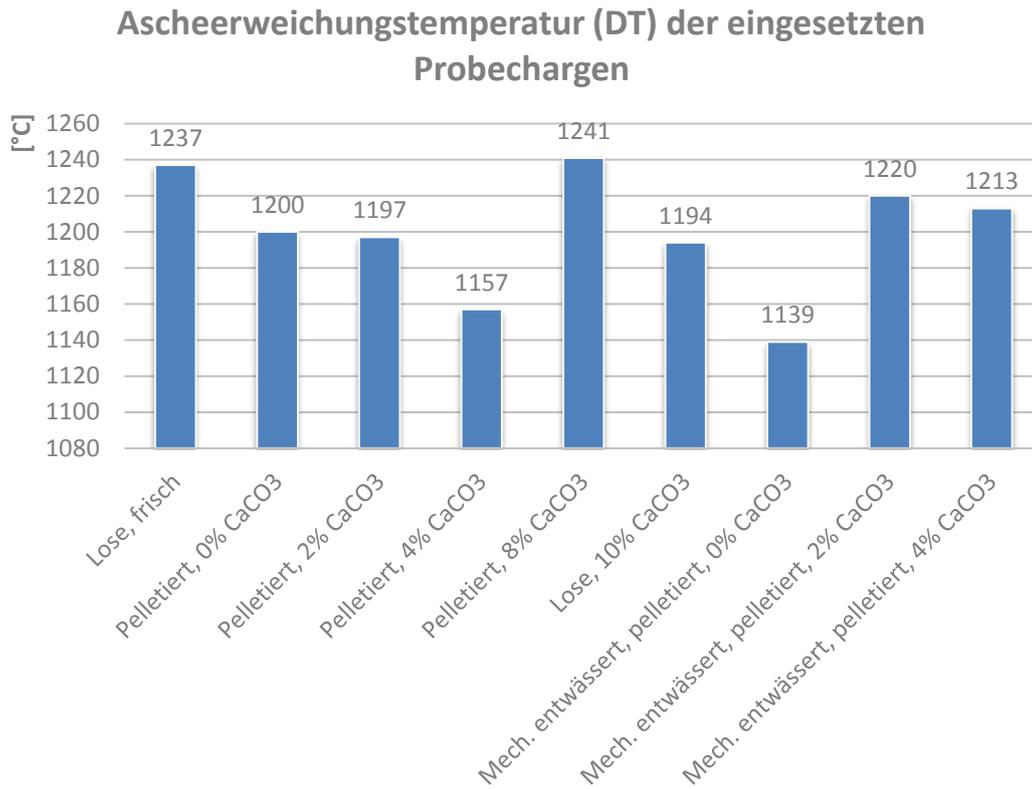


Abbildung 48: Laborergebnisse für die Ascheerweichungstemperaturen für die untersuchten Probechargen in °C.

Die Kohlenstoffgehalte der eingesetzten Probechargen sind in Abbildung 49 dargestellt.

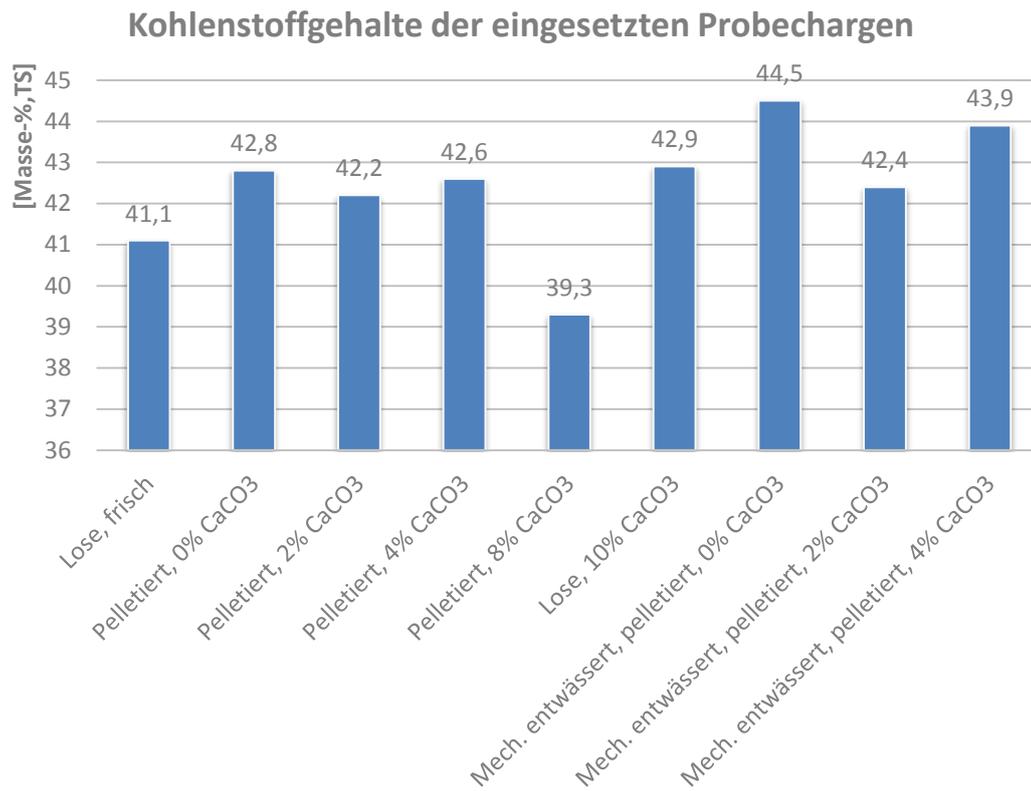


Abbildung 49: Kohlenstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

In Abbildung 50 sind die Wasserstoffgehalte der Probenchargen zu sehen.



Abbildung 50: Wasserstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Die in den Analysen festgestellten Sauerstoffgehalte sind in Abbildung 51 dargestellt.

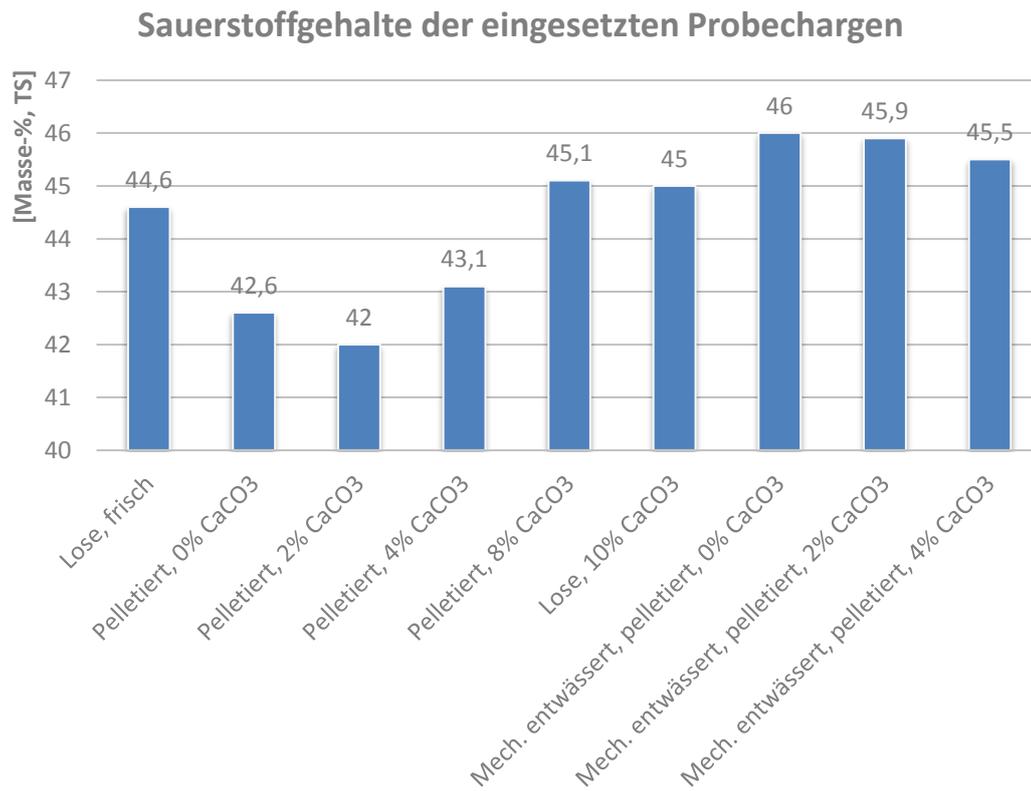


Abbildung 51: Sauerstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Die in den Probenchargen der Hauptversuche gemessenen Calciumgehalte sind in Abbildung 52 zu sehen. Calcium erhöht wie in Kapitel 2.7.3 beschrieben die Ascheerweichungstemperatur.

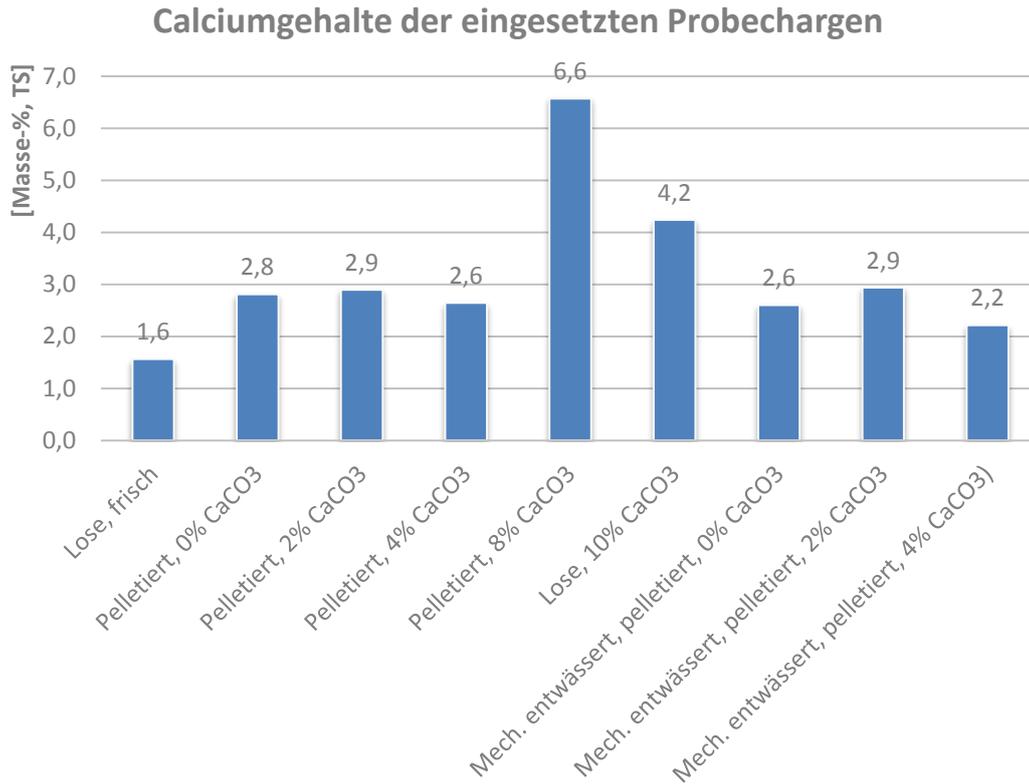


Abbildung 52: Calciumgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Abbildung 53 zeigt die Kaliumgehalte der während der Hauptversuche eingesetzten Probenchargen. Kalium und Magnesium haben nach Gleichung (2-74) einen negativen Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur, da sie diese senken.

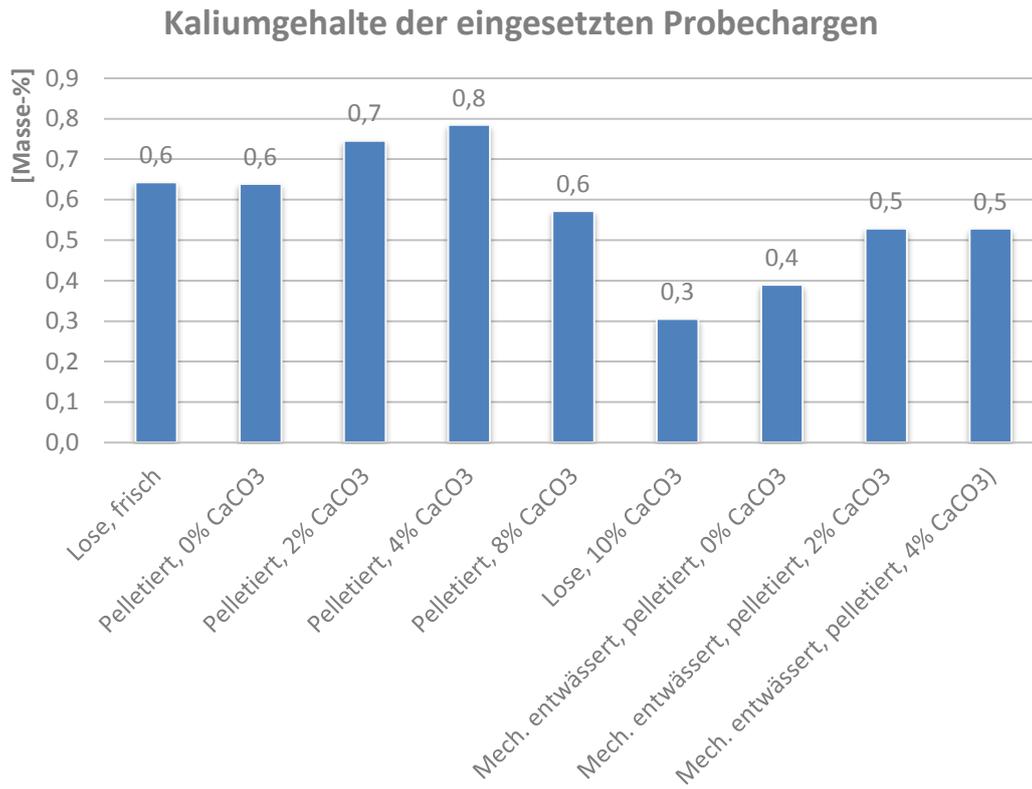


Abbildung 53: Kaliumgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Die Magnesiumgehalte der Probenchargen sind in Abbildung 54 dargestellt.

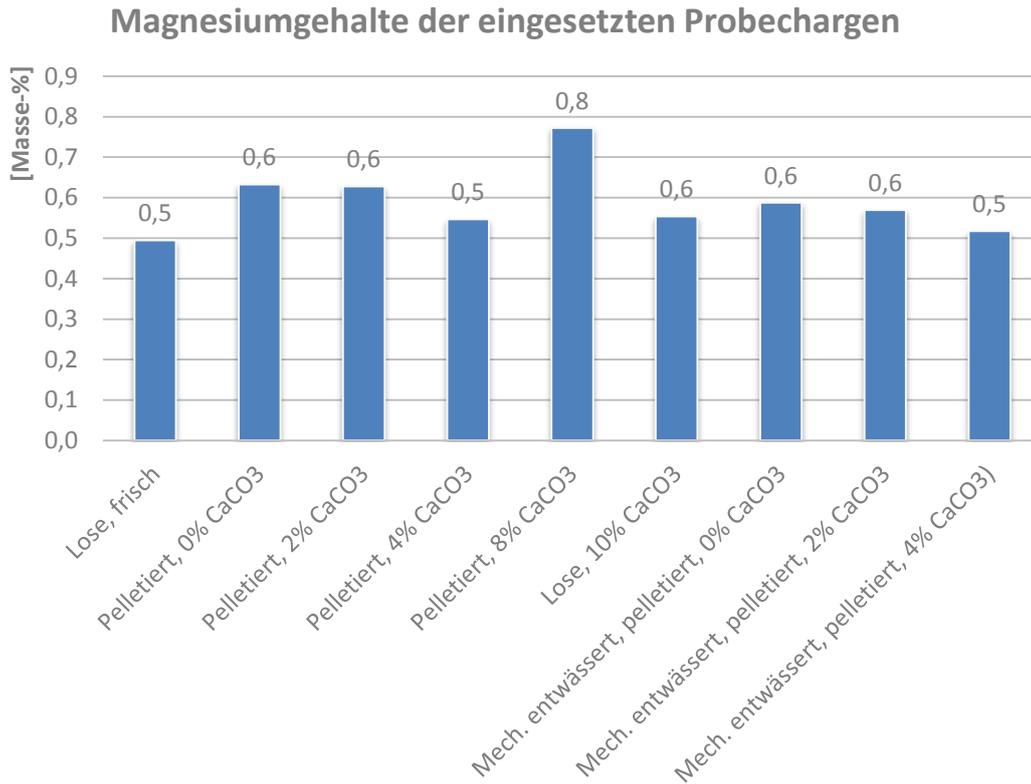


Abbildung 54: Magnesiumgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Im Bezug auf die Rauchgasemissionen spielen die Gehalte der Elemente Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl) eine tragende Rolle. Sie verbinden sich während des Verbrennungsprozesses zu schädlichen Verbindungen wie NO₂, SO₂ und HCl welche eine umweltschädliche Wirkung und oder die Standzeiten der Anlagen verringern. In Abbildung 55 sind die Stickstoffgehalte der untersuchten Proben dargestellt.



Abbildung 55: Stickstoffgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Die Schwefelgehalte der Probenchargen sind in Abbildung 56 aufgeführt.

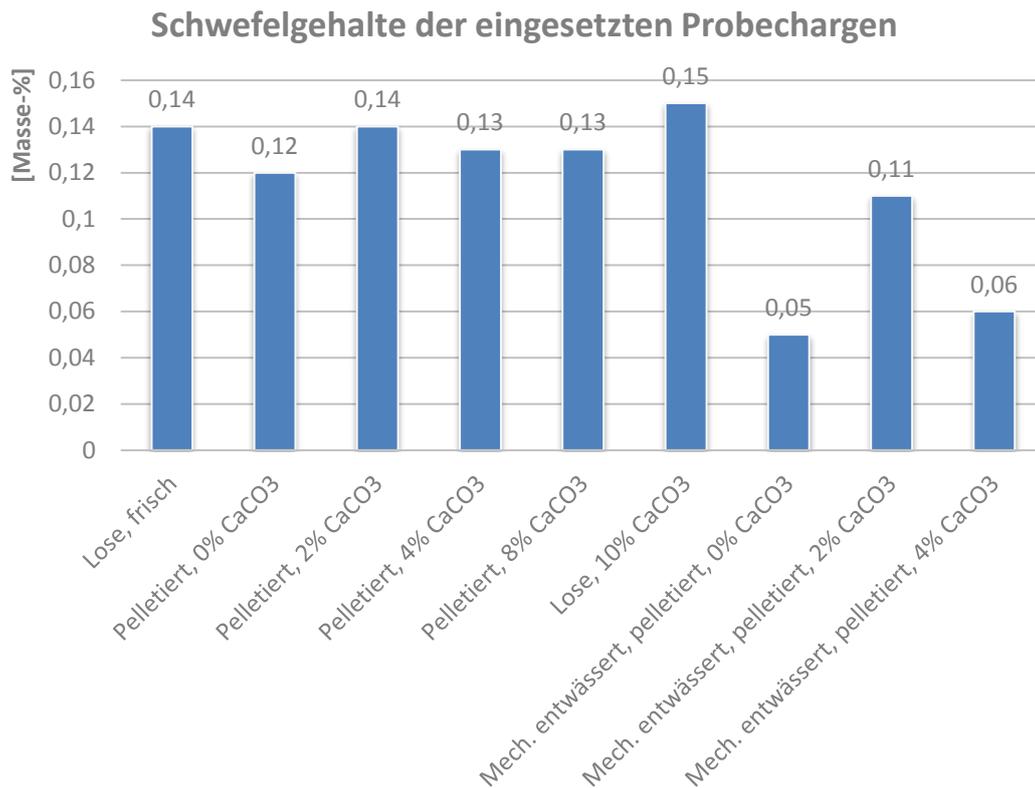


Abbildung 56: Schwefelgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Die in den für die Hauptversuche eingesetzten Proben enthaltenen Chlorgehalte sind in Abbildung 57 dargestellt. Hohe Chlorgehalte können zu starker Korrosion in der Feuerungsanlage führen.

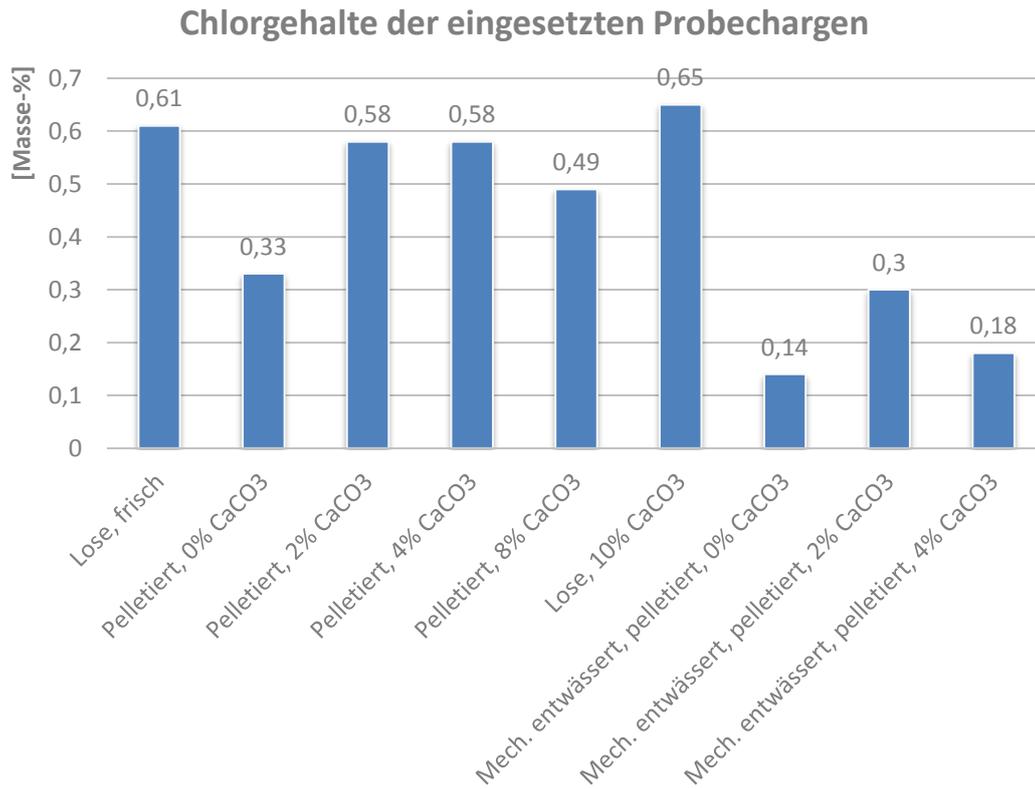


Abbildung 57: Chlorgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.

Abbildung 58 zeigt den Vergleich der Wassergehalte einer Frischmistprobe zu den aufbereiteten Proben. Der Pferdemit wurde auf einen Wassergehalt von 11 % getrocknet. Es ist deutlich zu sehen, dass durch den Pelletier Vorgang nochmals Wasser entzogen wird.

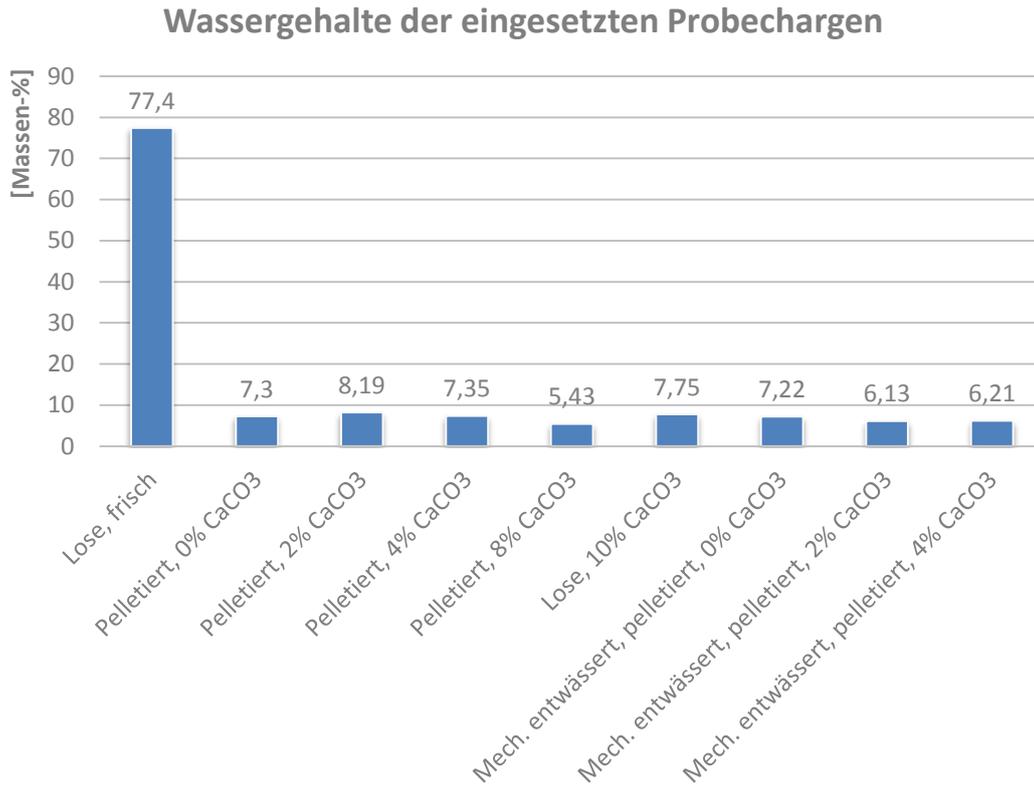


Abbildung 58: Wassergehalte der untersuchten Probechargen in Massen-%, atro.

In Abbildung 59 und den folgenden sind die Schwermetallgehalte dargestellt. Diese spielen bei der eventuellen Verwertung der Asche als Dünger eine wichtige Rolle. Diese Werte dienen nur zu Information. Die Verwertungswege für die Asche werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Abbildung 59 zeigt die Zinkgehalte der analysierten Probenaschen.

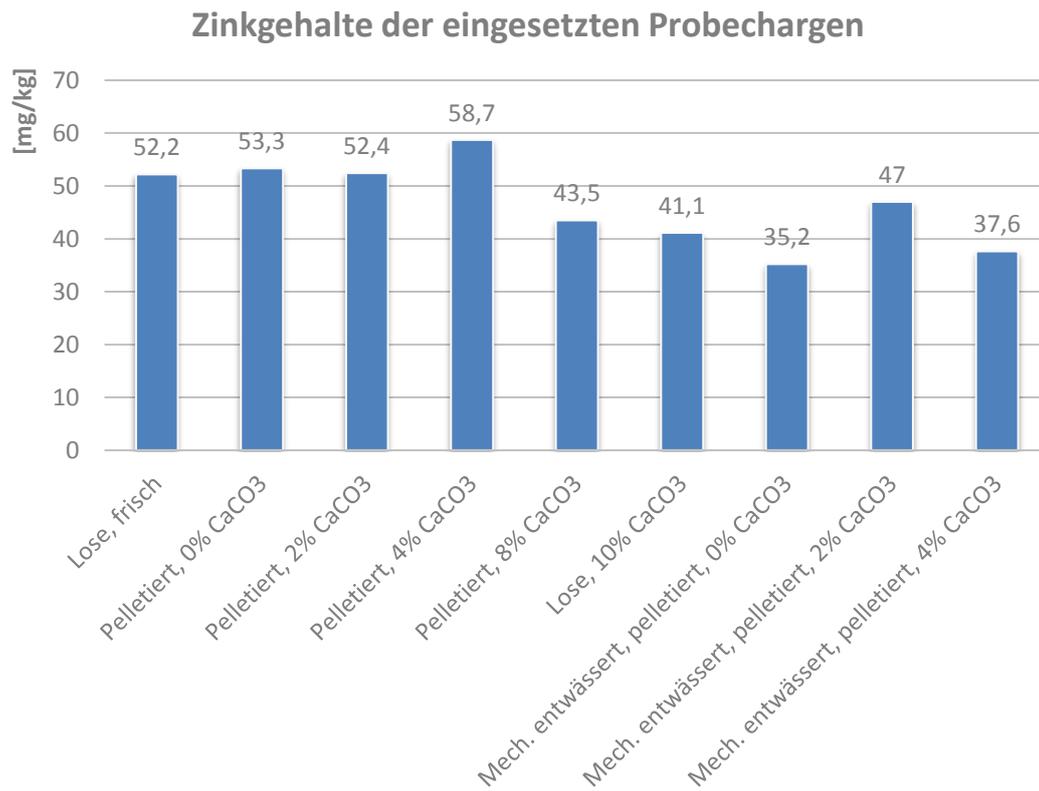


Abbildung 59: Zinkgehalte der untersuchten Probechargen in mg/kg, atro.

Die Quecksilbergehalte sind in Abbildung 60 zu sehen.

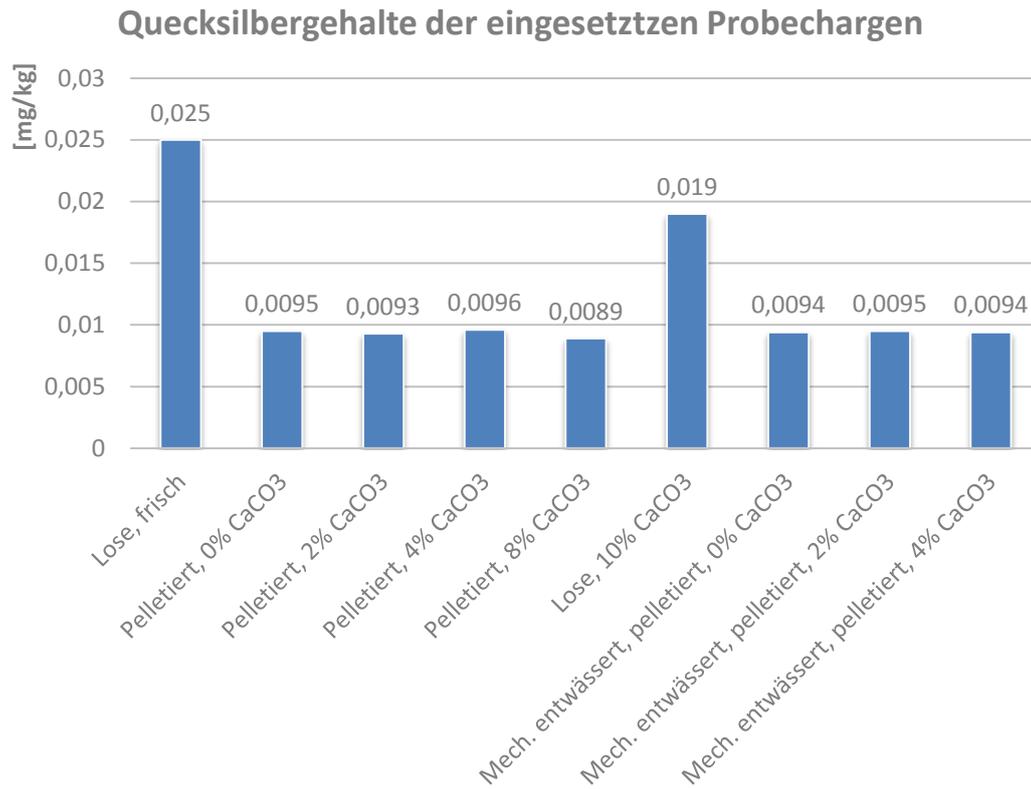


Abbildung 60: Quecksilbergehalte der untersuchten Probechargen in mg/kg, atro.

Abbildung 61 zeigt die Chromgehalte der eingesetzten Pferdemitproben.

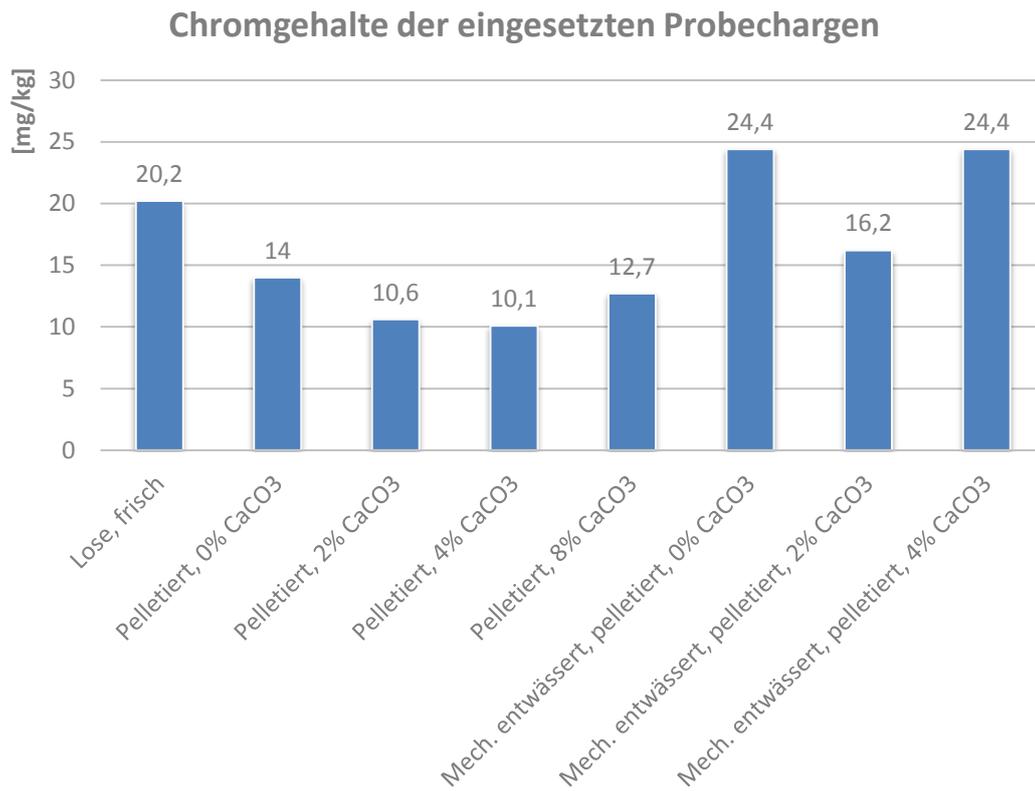


Abbildung 61: Chromgehalte der untersuchten Probechargen in mg/kg, *atro*, die Werte der nicht dargestellten Probechargen lagen unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens.

Die Kupfergehalte der Probechargen sind in Abbildung 62 dargestellt. Bei den nicht dargestellten Proben lag der Kupfergehalt unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens.

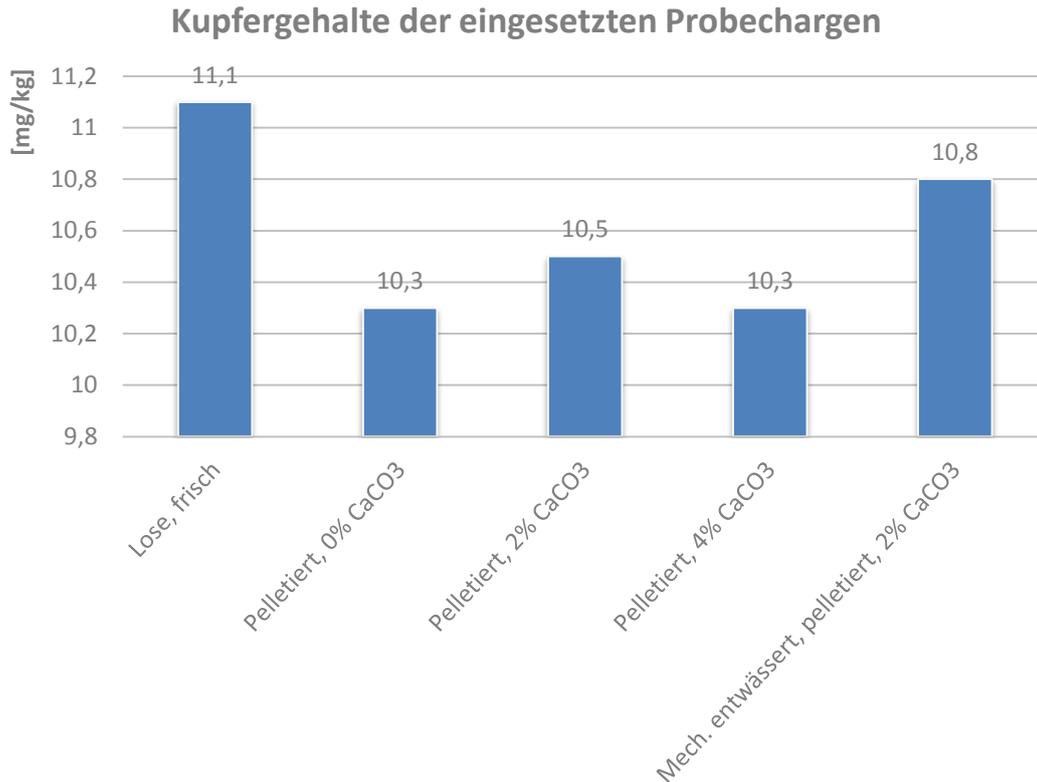


Abbildung 62: Kupfergehalte der untersuchten Probenchargen in mg/kg, atro, die Werte der nicht dargestellten Probechargen lagen unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens.

Die Werte der weiteren in den Normen aufgeführten Elemente Arsen, Cadmium, Blei, und Nickel lagen unter der Nachweisgrenze der vom Labor eingesetzten Verfahren und damit auch unter den in den Normen aufgeführten Grenzwerten. Dies zog sich konsistent durch alle analysierten Proben.

4.2.2 Rauchgasanalyse

Auch für die Messung der Rauchgasemissionen bei der Verbrennung der Probenchargen wurden Vorversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 63 bis Abbildung 66 dargestellt. Bei den CO-Werten wurde das Ergebnis für die Charge „Lose, 10 % CaCO₃“ nicht dargestellt, da diese den Darstellungsbereich überschritten. Dies zeigte, dass der verwendete Kessel für die Verbrennung von losem Material nicht geeignet ist. Abbildung 63 zeigt die gemessenen CO₂-Konzentrationen.

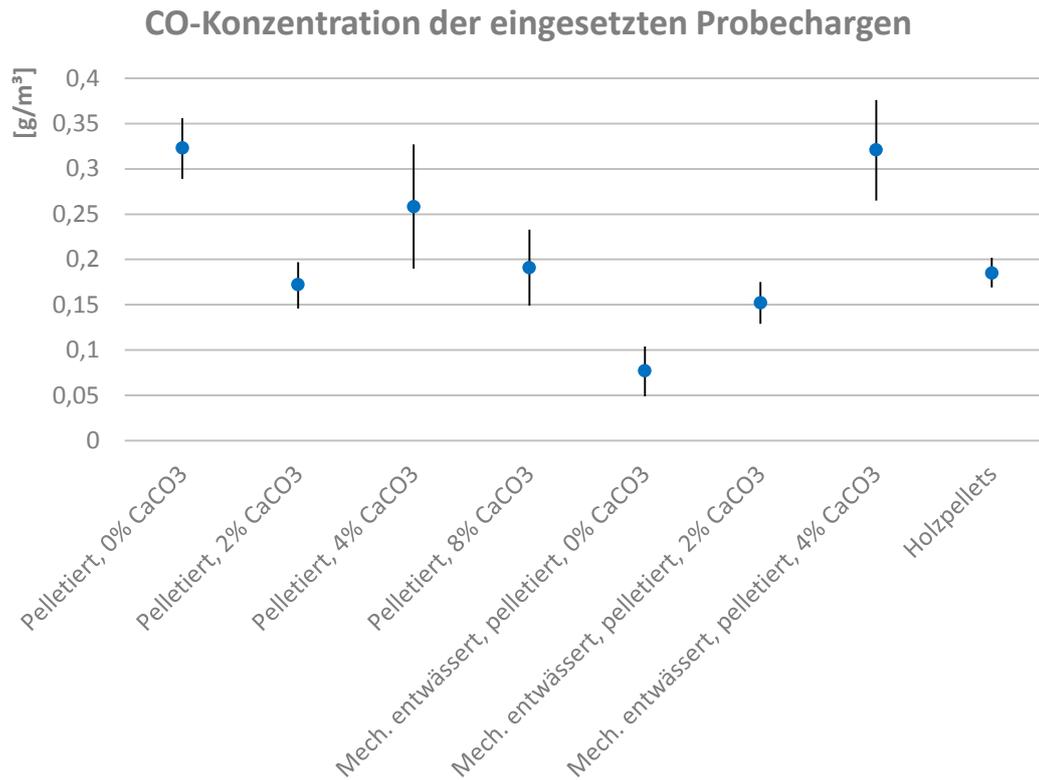


Abbildung 63: Bei Feuerungsversuchstand ermittelte CO-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemist-Probechargen in g/m^3 , atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Bei den in Abbildung 64 dargestellten SO_2 -Konzentrationen sind ebenfalls bei der Charge „Lose, 10 % CaCO_3 “ starke Schwankungen zu erkennen. Wie oben beschrieben bereitete die Verbrennung von losem Material in der für Hackschnitzel und Pellets ausgelegten Feuerung Probleme. Dies erklärt die starken Abweichungen bei der Verbrennung der losen Probe.

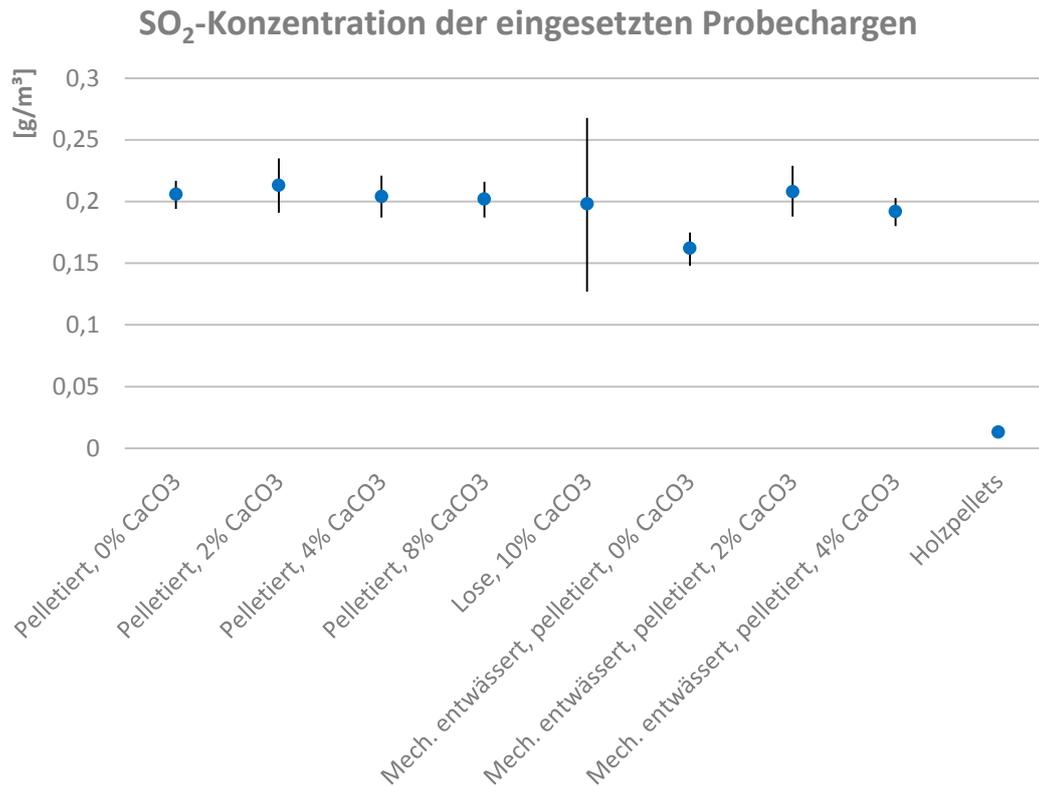


Abbildung 64: Am Feuerungsversuchstand ermittelte SO₂-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m³, atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Die bei den Vorversuchen ermittelten NO_x-Emissionen sind in Abbildung 65 aufgeführt.

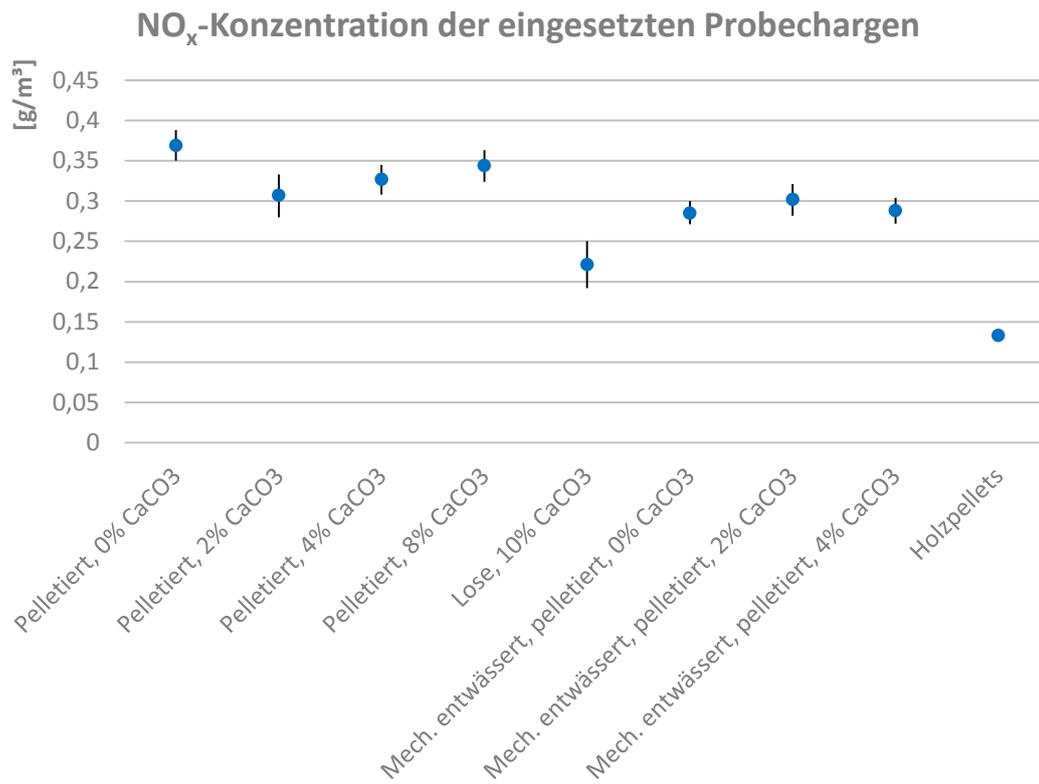


Abbildung 65: Am Feuerungsversuchsstand ermittelte NO_x-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m³, atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Abbildung 66 zeigt die gemessenen HCl-Konzentrationen der Vorversuche.

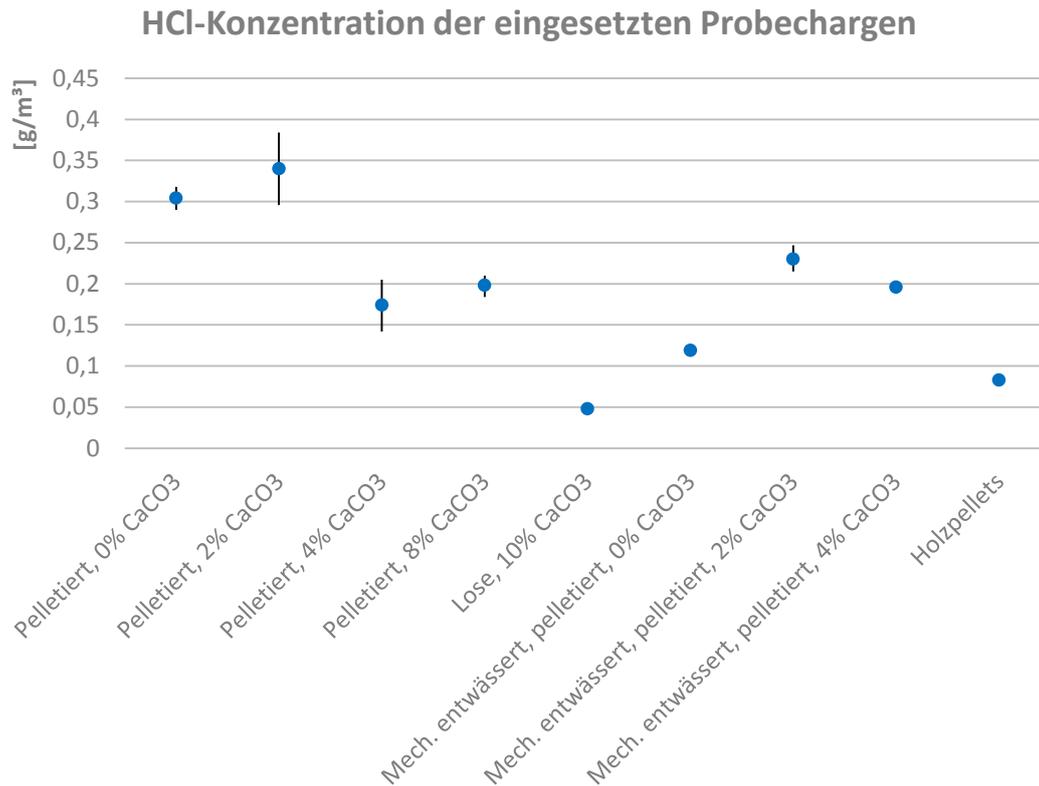


Abbildung 66: Am Feuerungsversuchstand ermittelte HCl-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemist-Probechargen in g/m³, atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Für die Hauptversuche wurden jeweils drei Messfahrten mit jeder Probencharge durchgeführt. Die Ergebnisse der Hauptversuche sind in Abbildung 67 bis Abbildung 71 dargestellt. Die große Menge der Messwerte und die Vielzahl von Messfahrten führten zu einer größeren Streuung der Werte als bei den Vorversuchen. Die Diagramme zeigen den Durchschnitt aus allen Messfahrten für die einzelnen Probenchargen. Zusätzlich ist die Standardabweichung mit $\pm \sigma$ dargestellt. Wie bei den Vorversuchen waren die CO-Werte für die Probecharge „Lose, 10 % CaCO₃“ ebenfalls nicht darstellbar. Die Abbildung 67 zeigt die Ergebnisse der CO-Messungen während der Hauptversuche.

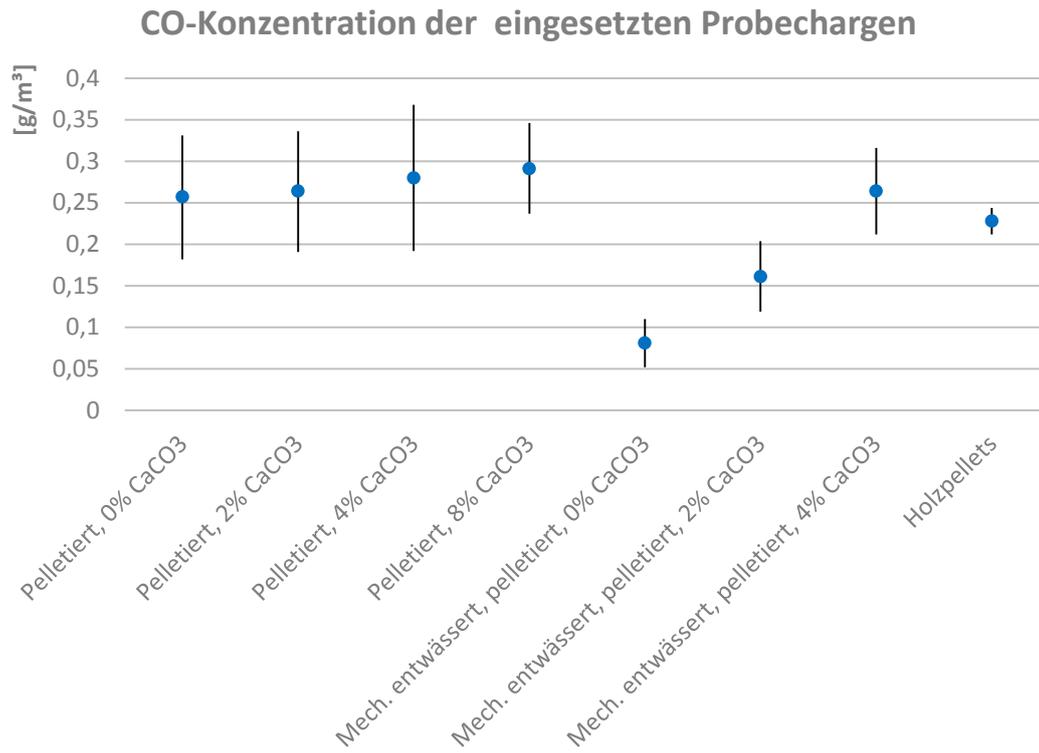


Abbildung 67: Ergebnisse der Hauptversuche für die CO-Emissionen bei der Verbrennung der Probechargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Die in Abbildung 68 gezeigten SO_2 -Werte zeigt den positiven Einfluss der Aufbereitungsmaßnahmen auf diese Emission.

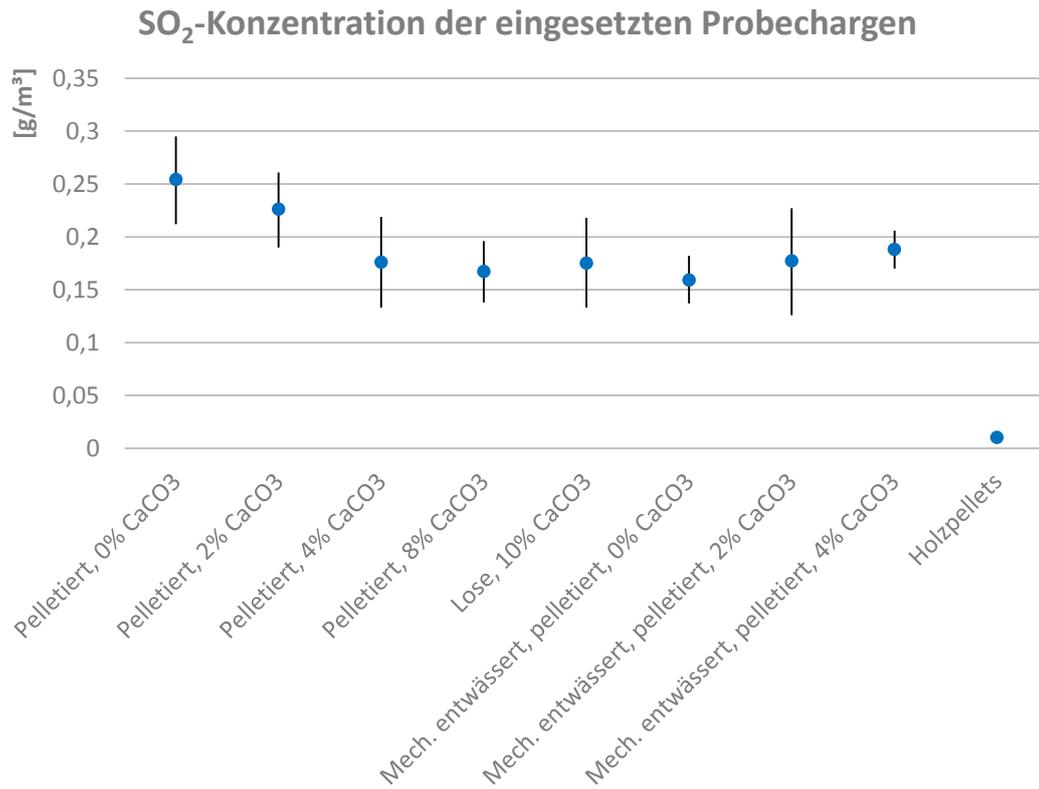


Abbildung 68: Ergebnisse der Hauptversuche für die SO₂-Emissionen bei der Verbrennung der Probechargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m³, atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Der Chlorgehalt konnte durch das mechanische Auspressen am stärksten positiv beeinflusst werden. Dies hat eine positive Auswirkung auf die HCl-Emission wie in Abbildung 69 dargestellt.

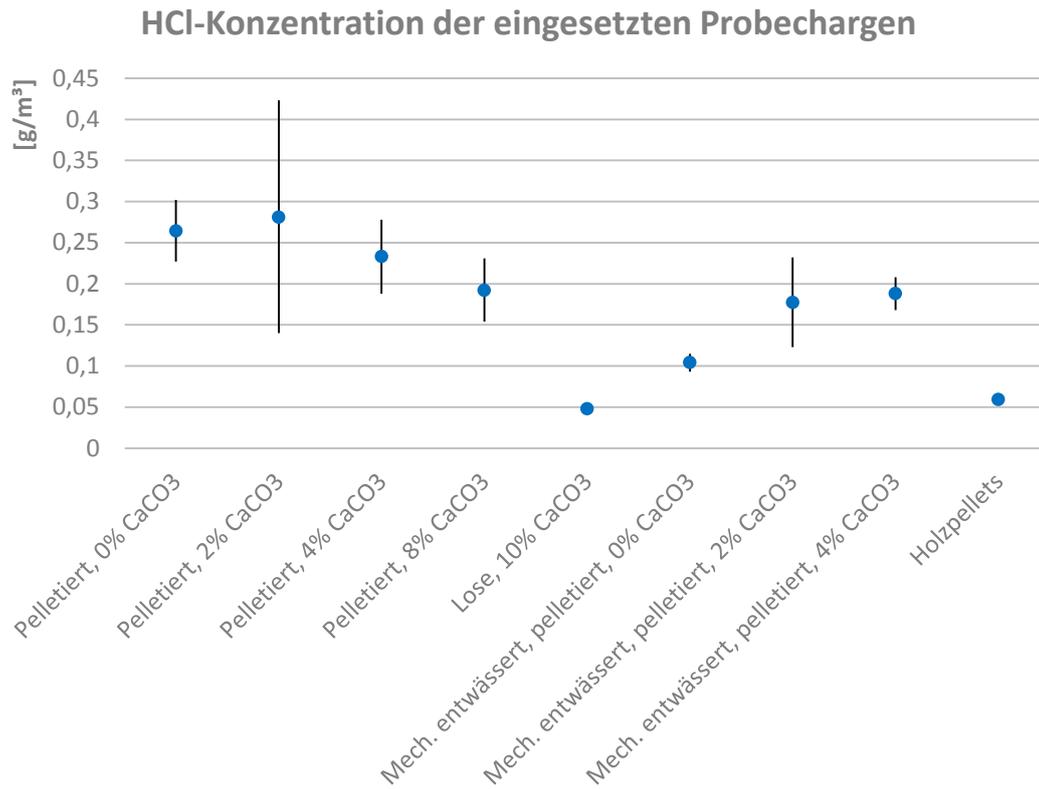


Abbildung 69: Ergebnisse der Hauptversuche für die HCl-Emissionen bei der Verbrennung der Probechargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Die NO_x -Konzentrationen sind in Abbildung 70 dargestellt.

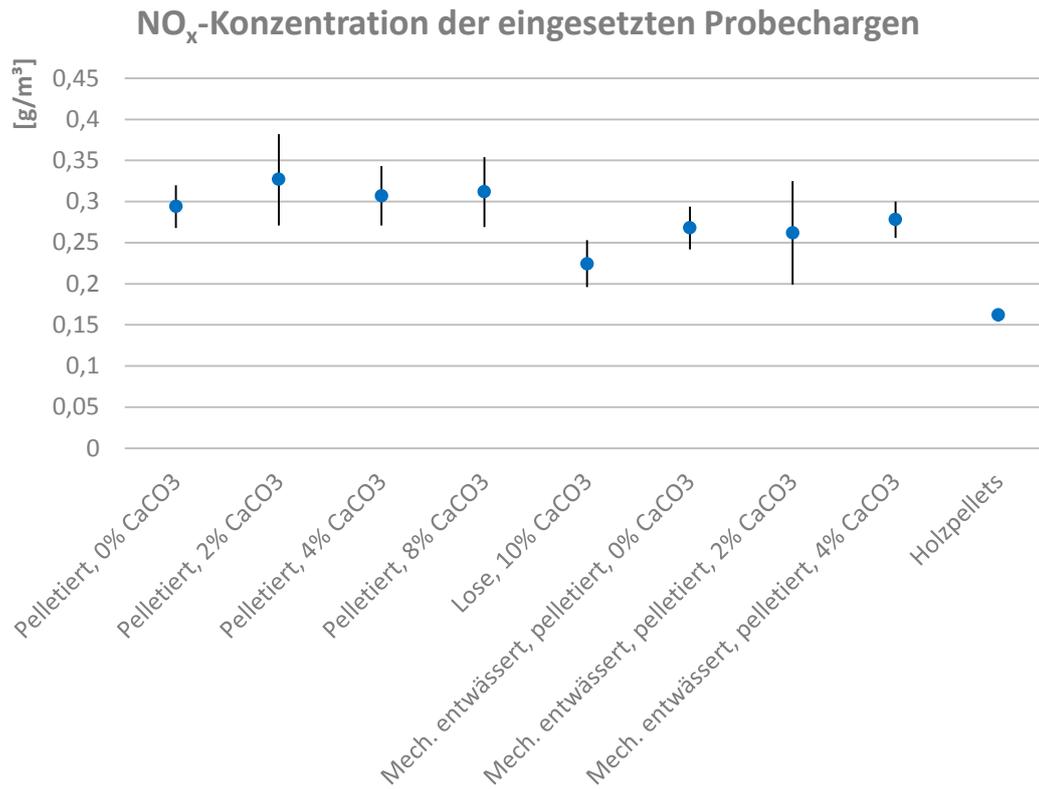


Abbildung 70: Ergebnisse der Hauptversuche für die NO_x-Emissionen bei der Verbrennung der Probechargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m³, atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

Die NH₃- Emission verschlechterte sich mit zunehmendem CaCO₃-Anteil. Dies zeigt Abbildung 71.

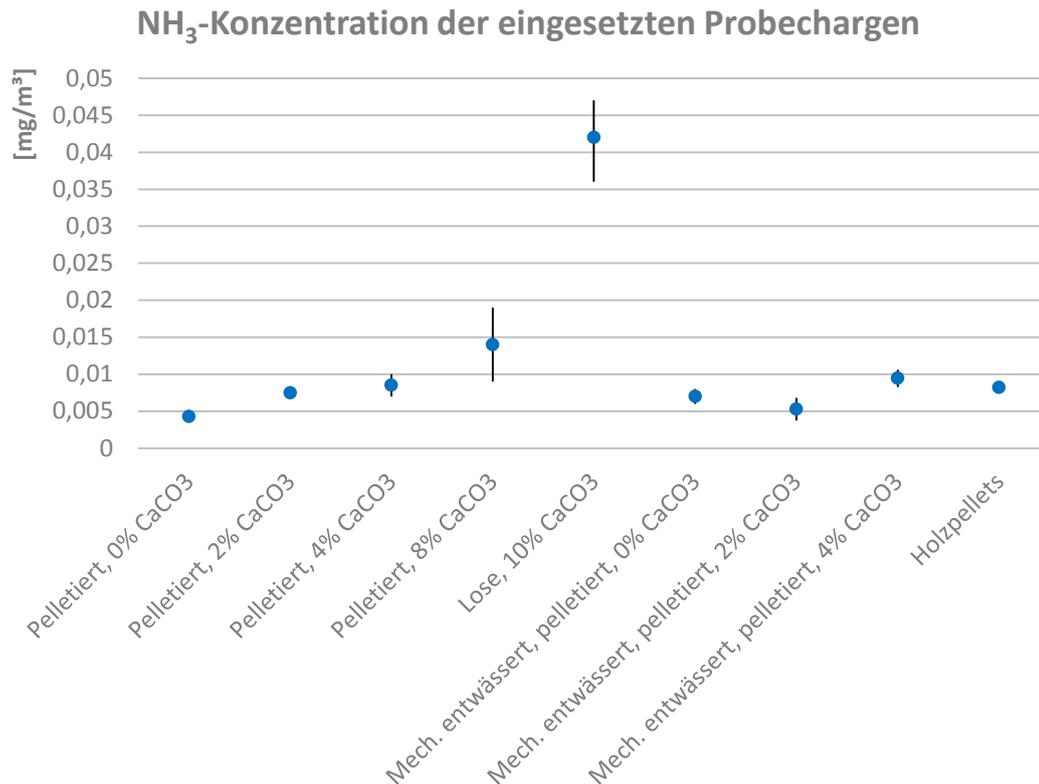


Abbildung 71: Ergebnisse der Hauptversuche für die NH₃-Emissionen bei der Verbrennung der Probechargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m³, atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.

4.2.3 Staubmessung

Aus den in Kapitel 3.11 genannten Gründen war die Anzahl der Staubmessungen auf zwei begrenzt. Um eine Verbesserung der Emissionseigenschaften zu untersuchen, wurde je eine Messfahrt mit pelletiertem Pferdemit im Rohzustand und mit mechanisch entwässertem, pelletiertem und mit zwei Prozent Additiv (CaCO₃) versetztem Pferdemit gefahren. Die Ergebnisse aus diesen Messfahrten sind in Abbildung 72 dargestellt.

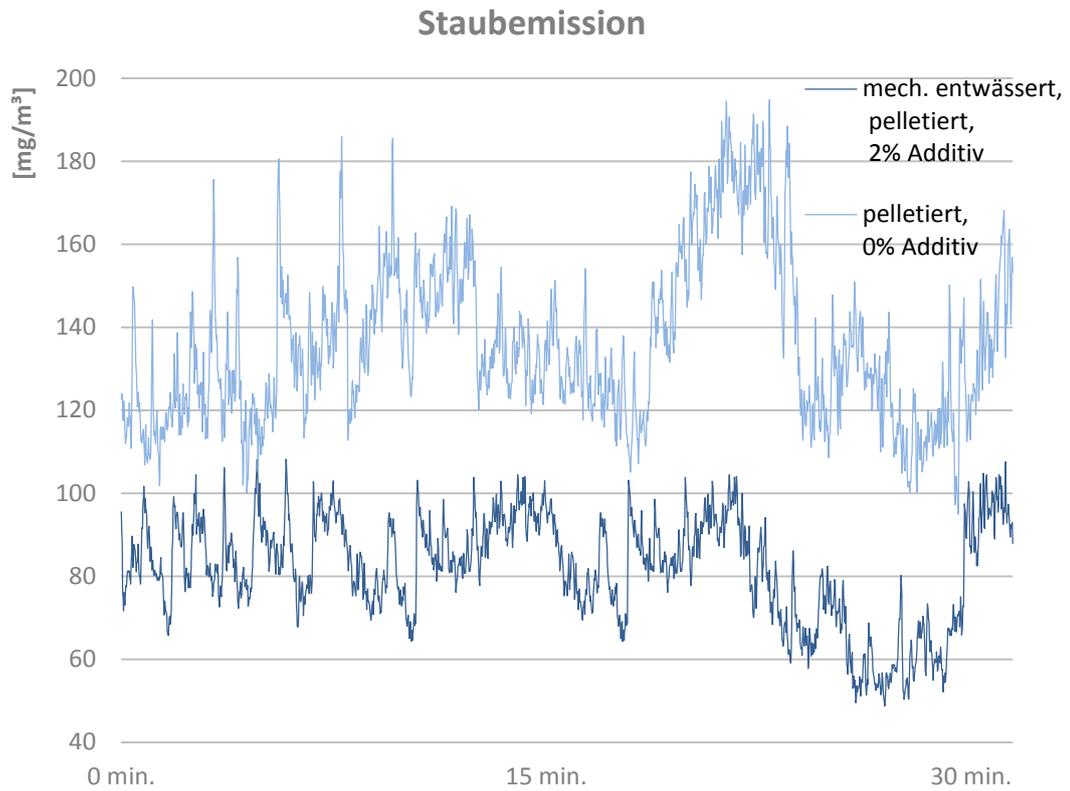


Abbildung 72: Staubemission bei der Verbrennung von mechanisch entwässertem, pelletiertem Pferdemist mit 2 % Additiv (CaCO_3) und pelletiertem Pferdemist mit 0 % Additiv in mg/m^3 .

5 Ergebnisdiskussion

In diesem Kapitel werden die oben dargestellten Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Studien verglichen und diskutiert. Da es nur wenige Daten aus anderen Arbeiten zur Pferdemitverbrennung gibt, werden zusätzlich Forschungsergebnisse von Untersuchungen mit Heu, Stroh, Gärrest und Traubentrester herangezogen.

Die vorliegenden Daten für den Energieeinsatz bei der Pelletierung von halmgutartiger Biomasse sind als ungenügend und nicht ausreichend belastbar einzustufen. Deshalb wird hier Holz, insbesondere Sägespäne, als Vergleich herangezogen.

5.1 Mechanische Aufbereitung

Bei der Produktion von Holzpellets ist ein mechanisches Entwässern der Sägespäne nicht sinnvoll, da der Wassergehalt deutlich unter dem von Pferdemit liegt. Ausgepresstes Wasser wird durch das Holz, wie von einem Schwamm, wieder aufgesogen. Dies macht ein mechanisches Auspressen unwirtschaftlich. Daher wird dieser Prozessschritt nur in der Gesamtenergiebilanz berücksichtigt. Eine Vorzerkleinerung ist bei Sägespänen ebenfalls nicht notwendig und findet somit ebenfalls erst bei der Gesamtbilanz Berücksichtigung.

5.1.1 Wirkung der mechanischen Vorentwässerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Möglichkeit der Absenkung der Störstoffgehalte, im speziellen Chlor, Schwefel, Stickstoff und Kalium, untersucht. Der Prozess sollte möglichst einfach gehalten werden. Darum wurde ein einfaches Auspressen mittels Schneckenpresse gewählt. Die Vorversuche fanden mit einer hydraulischen Werkstattpresse statt. Ein ähnliches, jedoch umfangreicher gestaltetes Verfahren ist das in Kapitel 2.6.2 vorgestellte florafuel-Verfahren. Dieses wird im Folgenden zum Vergleich herangezogen. Abbildung 73 zeigt die prozentuale

Absenkungen von Cl, S, N und Ka mittels Schneckenpresse und Handpresse für Pferdemist und mittels florafuel-Verfahren für Laub und Grasschnitt [94]. Die angegebene Absenkung ergibt sich dabei aus Gleichung (5-1).

$$\Delta S = \frac{S_{RM} - S_{AM}}{S_{RM}} \quad (5-1)$$

mit:

ΔS	Störstoffabsenkung in Prozent
S_{RM}	Störstoffgehalt Rohmaterial in Masse-%
S_{AM}	Störstoffgehalt aufbereitetes Material in Masse-%

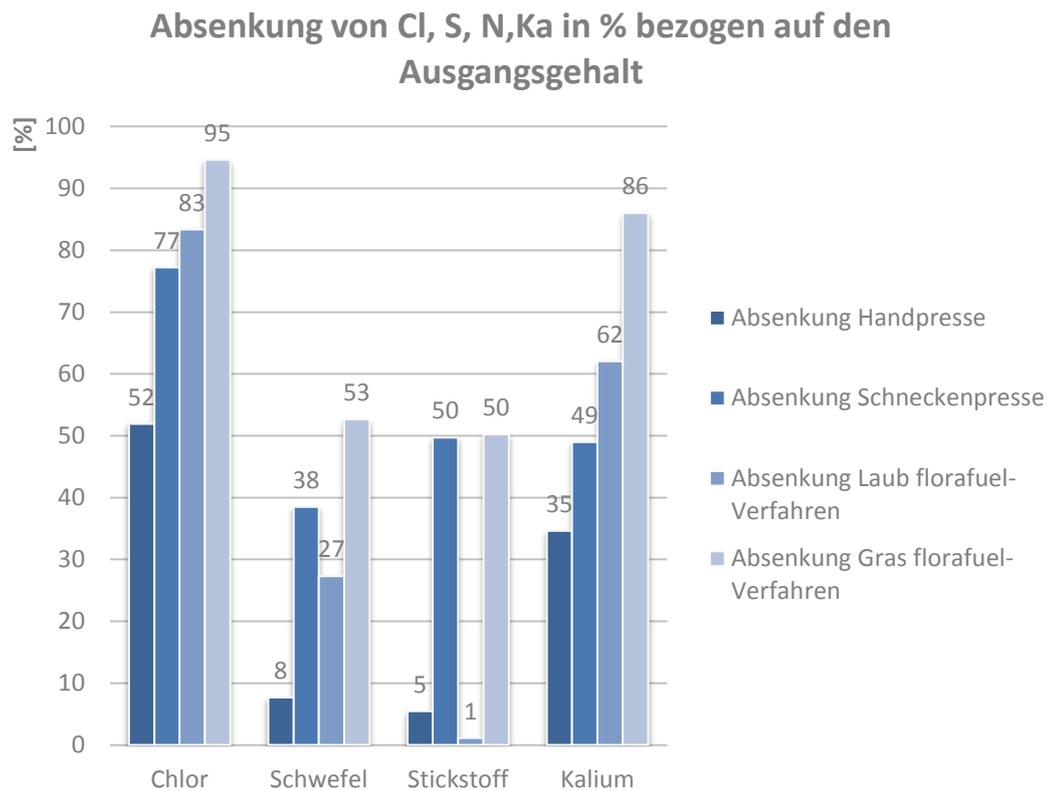


Abbildung 73: Absenkung der für die Verbrennung relevanten Störstoffe Cl, S, N und K für Pferdemist mittels mechanischer Entwässerung durch Hand- und Schneckenpresse und für Laub und Gras mittels florafuel-Verfahren in %, bezogen auf den jeweiligen Ausgangsgehalt des jeweiligen Rohmaterials, atro [94].

Wie der Abbildung 73 zu entnehmen ist die prozentuale Absenkung der Störstoffe durch das florafuel-Verfahren auf den ersten Blick wirkungsvoller. Zu

berücksichtigen sind jedoch die höheren Ausgangswerte der Störstoffe im Pferdemist. Diese sind zum Teil erheblich. Betrachtet man die absoluten Absenkungen der Störstoffe wie in Abbildung 75 dargestellt, ergibt sich ein anderes Bild. Abbildung 75 zeigt die jeweiligen Ausgangsgehalte der dargestellten Proben.

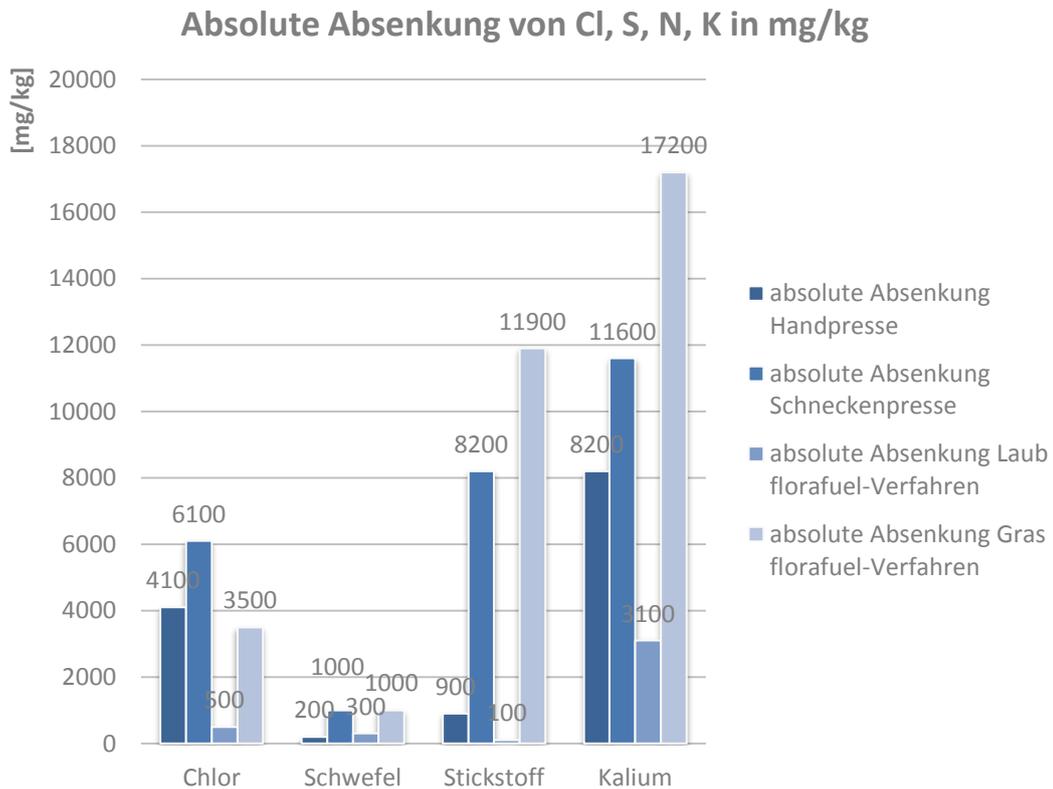


Abbildung 74: Absolute Absenkung von Cl, S, N, K für Pferdemist durch mechanisches Entwässern mit einer Hand- und Schneckenpresse, sowie von Laub und Grasschnitt durch das florafuel-Verfahren in mg/kg, TS [94].

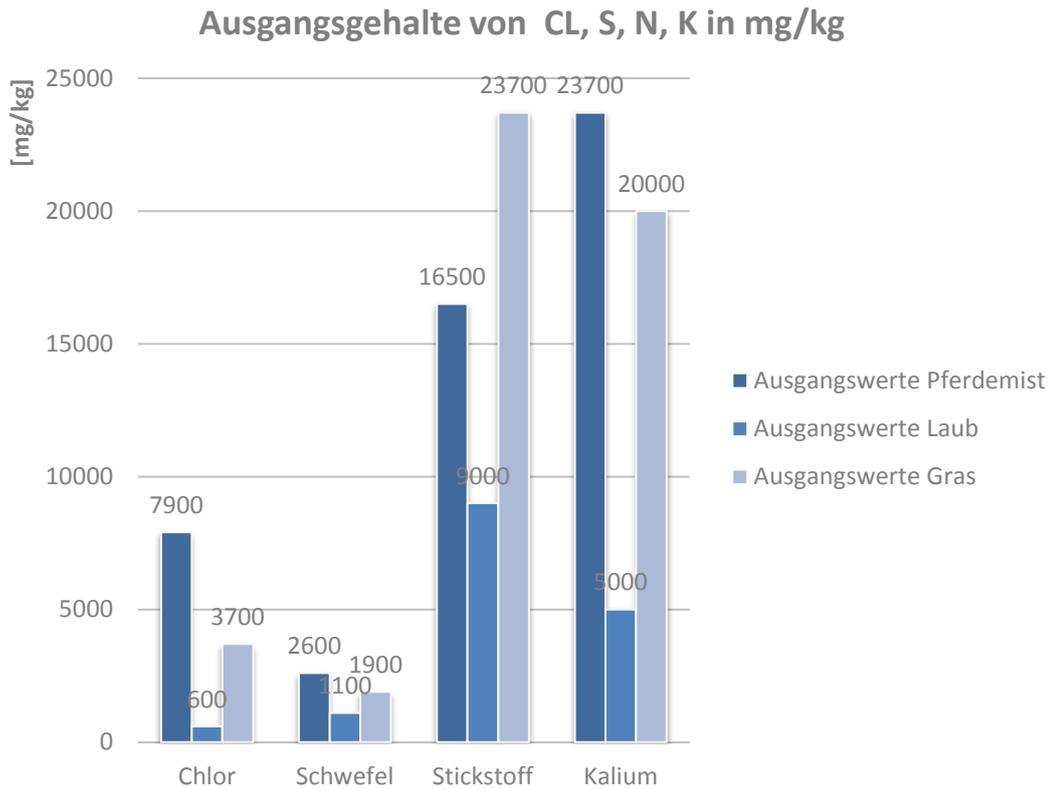


Abbildung 75: Ausgangsgehalte der Störstoffgehalte Cl, S, N und K von Pferdemit, Laub und Gras in mg/kg, TS [94].

Betrachtet man nun die Ausgangswerte und die absolute Absenkung der Störstoffe so ist zu sehen, dass bei Pferdemit das vereinfachte Verfahren zum Teil bessere oder zumindest gleichwertige Ergebnisse wie das florafuel-Verfahren erzielen kann. Dies gilt für Chlor und Schwefel im Vergleich mit Laub und Gras. Für Stickstoff und Kalium nur im Vergleich zu Laub. Bei Gras sind bei der Absenkung von Stickstoff und Kalium die mit dem florafuel-Verfahren erzielten Werte höher. Hier sind wiederum die Störstoffgehalte der Grasproben höher als die der Pferdemitproben. Dies lässt darauf schließen, dass mehr die Höhe der Konzentration der Störstoffe als das Verfahren zur Absenkung dieser ausschlaggebend ist.

Darüber hinaus Bedarf es bei dem florafuel-Verfahren eines größeren Anlagenaufwandes.

Dieser Sachverhalt erschwert eine aussagekräftige Einschätzung der Wirkungsweise des florafuel-Verfahrens beim Einsatz von Pferdemit. Zumal der Grad der Auswirkung vom Einsatzmaterial abhängt. Dies zeigen die unterschiedlichen Werte

für die Absenkung der Störstoffe bei Laub und Gras. Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch, dass die Störstoffgehalte von Pferdemist mit dem einfachen mechanischen Entwässern unter die von der Norm für nicht holzartige Brennstoffe [32] festgelegten Grenzwerte gesenkt werden können. Tabelle 28 zeigt die erzielten Werte für Pferdemist im Vergleich zu den in der Norm geforderten.

Tabelle 28: Vergleich Störstoffgehalte vor und nach dem mechanischen Entwässern im Vergleich mit den in der Norm festgelegten Grenzwerten für nicht holzartige Biomasse in Masse-%, TS [32].

	ungepresst [Masse-%]	Extruder [Masse-%]	DIN EN ISO 17225-6 [Masse-%]
Chlor	0,79	0,18	≤ 0,2
Schwefel	0,26	0,16	≤ 0,2
Stickstoff	1,65	0,83	≤ 1,5

Kalium ist in der Norm nicht aufgeführt, es gilt jedoch als Aerosolbildner und beeinflusst die Ascheerweichungstemperatur negativ. Aus diesem Grund ist grundsätzlich eine Absenkung im höchst möglichen Maße anzustreben. Wie in Kapitel 4 aufgezeigt, stellt der Ascheerweichungspunkt bei Pferdemist jedoch kein großes Problem dar. Also würde eine aufwändigere Aufbereitung für die Absenkung von Kalium nur im Falle einer entfallenden oder stark reduzierten Entstaubungsanlage zur Rauchgasaufbereitung Vorteile bringen. Da die Aschegehalte nach der Aufbereitung mit dem florafuel-Verfahren zwar stark reduziert aber dennoch mit bis zu 13,7 Masse-% [94] weiterhin sehr hoch sind, ist hier kein signifikanter Vorteil zu erwarten.

Könnten trotz der höheren Störstoffgehalte von Pferdemist im Vergleich zu Laub und Gras dieselben Endwerte nach der Aufbereitung mit dem florafuel-Verfahren wie bei Laub und Gras erzielt werden, würde dies eine enorme Verbesserung für die Verhinderung der Bildung schädlicher Emissionen und für die Verlängerung der Anlagenstandzeiten bedeuten. Aufgrund der großen Differenz der Ausgangsgehalte müsste dies jedoch genau untersucht werden.

5.1.2 Thermische Energie

Der Energiebedarf für die thermische Trocknung hängt im Wesentlichen vom Eingangswassergehalt und der Effizienz der Trocknungsanlage ab. Abbildung 76 zeigt den thermischen Energiebedarf für folgende Probenchargen und Eingangswassergehalte (w_{ein}):

- Pferdemist roh, $w_{\text{ein}} = 70 \%$
- Pferdemist vorzerkleinert, $w_{\text{ein}} = 70 \%$
- Pferdemist vorzerkleinert und mech. entwässert, $w_{\text{ein}} = 50 \%$
- Sägespäne laut Literatur [52], $w_{\text{ein}} = 55 \%$
- Sägespäne mit den Werten aus den Messfahrten an der Versuchsanlage, $w_{\text{ein}} = 55 \%$

Die Werte beziehen sich auf einen Niedertemperaturbandtrockner bei einem Ausgangswassergehalt von 11 %.

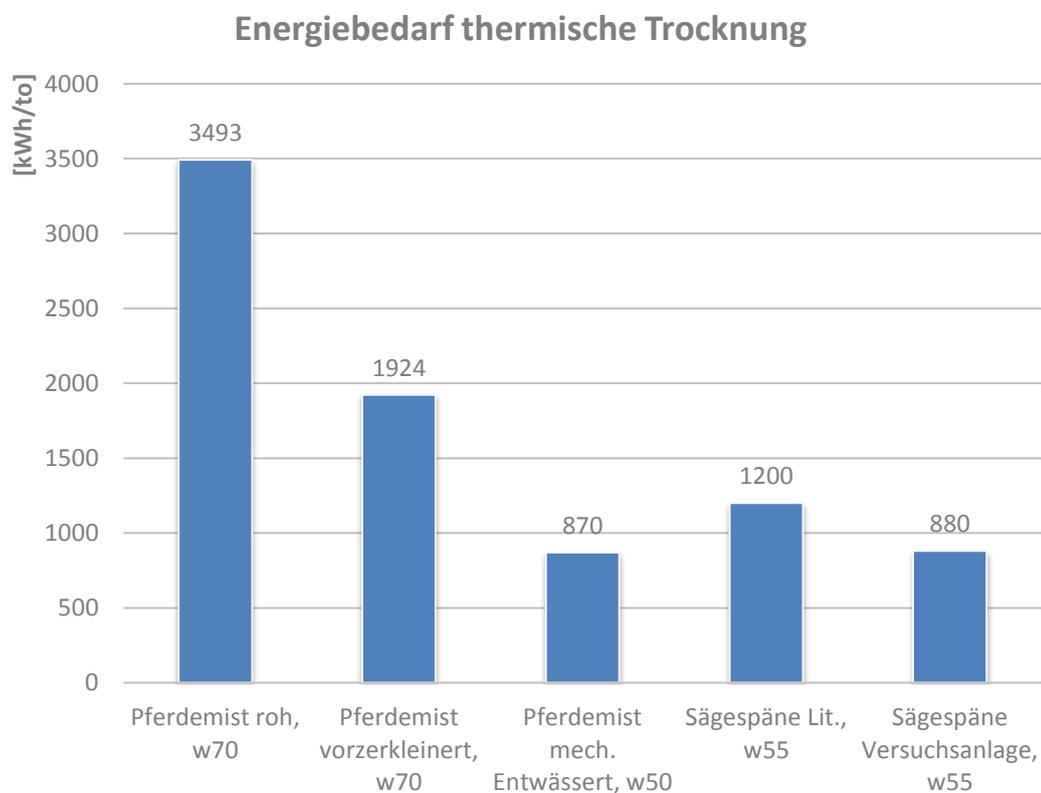


Abbildung 76: Thermischer Energiebedarf für die Trocknung von rohem Pferdemist vorzerkleinertem Pferdemist, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemist, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh/to Produkt am Trocknerausgang bei einem Ausgangswassergehalt von 11 %.

Es ist deutlich zu sehen, dass eine Vorzerkleinerung des Pferdemists sinnvoll ist. Die mechanische Vorentwässerung bringt ebenfalls eine große thermische Energieeinsparung. Ob diese den Einsatz der für die mechanische Entwässerung nötigen elektrischen Energie rechtfertigt, hängt davon ab, aus welcher Quelle die thermische Energie bezogen wird. Dies wird bei der Gesamtbilanz noch einmal detailliert diskutiert. Die benötigte thermische Energie zur Trocknung einer Tonne Endprodukt liegt damit auf dem Niveau von Sägespänen. Die Abweichung zwischen Literatur und Versuchswerten für Sägespäne ist mit dem Einsatz unterschiedlicher Bandtrocknerfabrikate zu erklären. Auf Nachfrage bestätigte die Stela Laxhuber GmbH die Werte der Versuchsanlage als durchaus in der Praxis üblich.

5.1.3 Elektrische Energie

Bei den hier angegebenen Werten sind alle elektrischen Aktoren zusammengefasst.

Diese umfassen:

- Mech. Entwässerung
- Vorzerkleinerung
- Trocknung
- Zerkleinerung nach Trocknung
- Pelletierung
- Kühlung
- Peripherie

In der Praxis sind die Anlagen auf volle Auslastung ausgelegt. Das bedeutet die einzelnen Anlagenkomponenten wie Trockner und Pelletpresse sind in ihrer Größe aufeinander abgestimmt. Dies schafft im Idealfall eine bestmögliche Energieeffizienz. Bei Probechargen mit unterschiedlichen Verdampfungsraten wie bei rohem und vorzerkleinertem Pferdemist müsste demnach der Trockner oder die Pelletpresse angepasst oder ausgetauscht werden. Dies würde jedoch in erheblichem Maße personelle und finanzielle Ressourcen verbrauchen.

Da der Versuchstrockner mit einem gleitend regulierbarem Gasbrenner ausgestattet ist, kann der Durchsatz durch die Regulierung der Trocknungstemperatur angepasst werden. Dies ermöglicht eine bestmögliche

Anlagenauslastung und somit belastbare Werte für die Auswertung. Die Abweichungen aufgrund der Temperaturerhöhung oder –senkung konnten durch die Überwachung der Aufsättigung der Abluft vernachlässigbar gering gehalten werden. Abbildung 77 zeigt die Ergebnisse für den elektrischen Energiebedarf. Die Werte aus der Literatur stammen von [52].

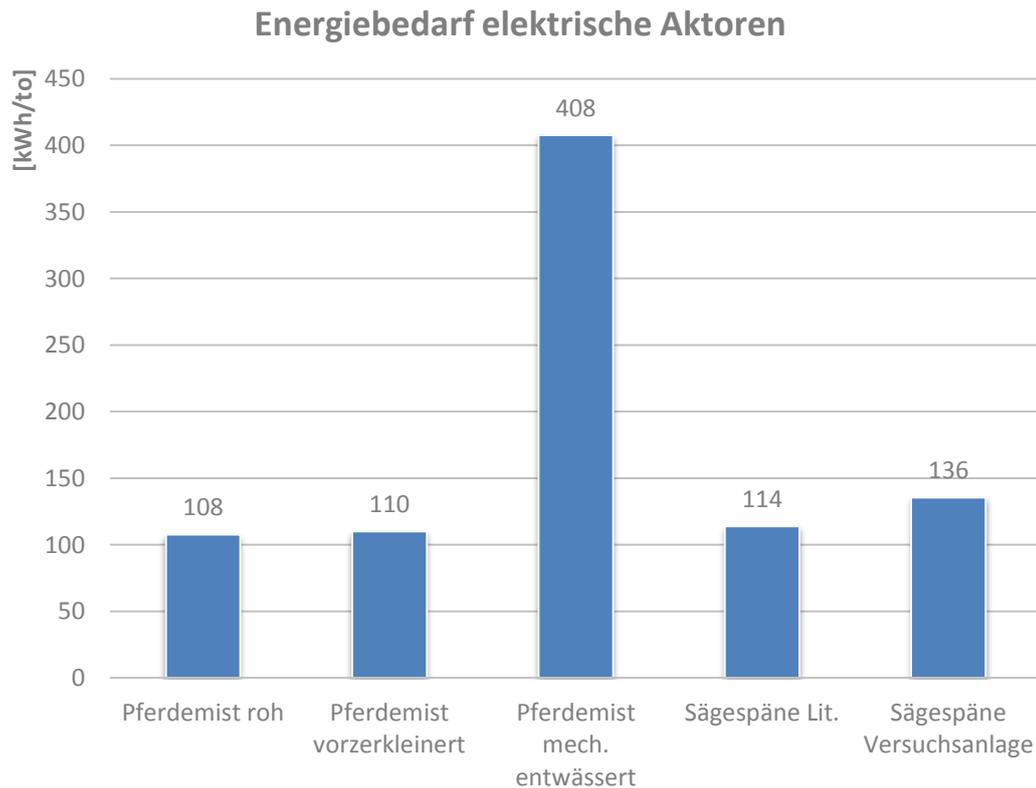


Abbildung 77: Elektrischer Energiebedarf für die Produktion einer Tonne Pellets aus rohem Pferdemit, vorzerkleinertem Pferdemit, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemit, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh.

In der Abbildung 77 ist der im vorhergehenden Kapitel erwähnte Bedarf an elektrischer Energie bei der mechanischen Vorentwässerung deutlich zu sehen. Der Mehrverbrauch an elektrischer Energie bei der Erzeugung von Holzpellets im Vergleich zu den in der Literatur aufgeführten Werten rührt von der kleinen Bauweise der Pelletpresse. Große Pressen mit mehreren Tonnen Durchsatz bieten hier eine bessere Effizienz [52]. Somit scheint der reine Pelletierungsprozess von Pferdemit effizienter als der von Sägespänen. Es ist jedoch zu beachten, dass die notwendige Erhöhung der Schüttdichte durch ein höheres Verdichtungsverhältnis das Ergebnis bereinigen wird. Die Energiebedarfe der Prozesse sind sonst ähnlich.

5.1.4 Gesamtenergiebedarf

Im Folgenden werden die Gesamtenergiebedarfe für die oben aufgeführten Probechargen gegenübergestellt. Abbildung 78 zeigt die Gesamtenergiebedarfe, welche sich aus thermischer und elektrischer Energie zusammensetzen.

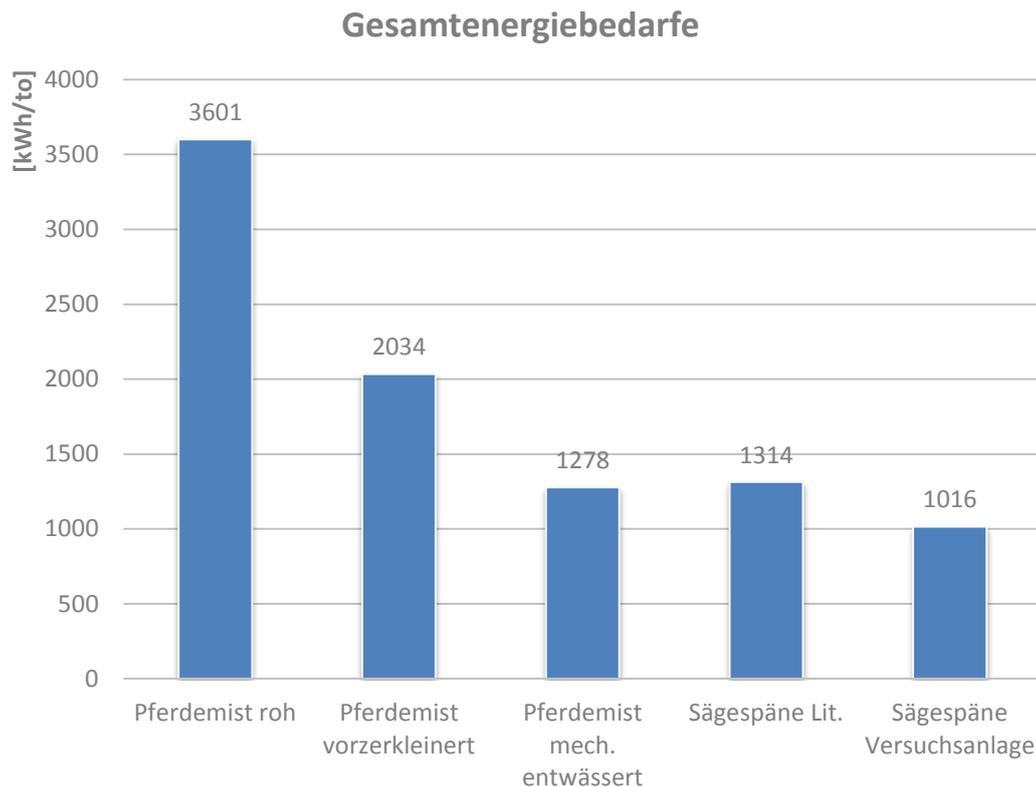


Abbildung 78: Gesamtenergiebedarfe für die Produktion einer Tonne Pellets aus rohem Pferdemist, vorzerkleinertem Pferdemist, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemist, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh.

Bei der Betrachtung der Gesamtenergiebedarfe zeigt sich, dass sich Pferdemist nur mit hohem Energieaufwand aufbereiten lässt. Entweder es muss sehr viel thermische Energie aufgewendet werden oder es muss sehr viel elektrische Energie eingesetzt werden. Der Einsatz elektrischer Energie senkt zwar den Gesamtenergiebedarf, jedoch ist elektrische Energie die hochwertigste und teuerste Energieform. Somit könnten die Produktionskosten mit der mechanischen Entwässerung höher ausfallen, als mit einer rein thermischen Trocknung. Dem gegenüber steht ein verminderter Durchsatz bei begrenzt verfügbaren Wärmemengen. Somit ist die Wahl des eingesetzten Verfahrens sowohl abhängig

von der Wirtschaftlichkeit als auch von der Verfügbarkeit der nutzbaren Wärme. Kann Abwärme genutzt werden, könnte so ein wirtschaftliches Szenario entstehen. Abbildung 79 zeigt die prozentuale Aufteilung der thermischen und elektrischen Energiebedarfe für die einzelnen Prozessvarianten und Einsatzstoffe. Darüber hinaus zeigt die Abbildung den energetischen Nutzen, das Verhältnis von Energieinhalt (H_i = Energieinhalt) der produzierten Pellets und der eingesetzten Produktionsenergie. Für Pferdemist wird dabei mit einem mittleren Heizwert von 4072 kWh/to, für die auf der Versuchsanlage produzierten Holzpellets mit 4700 kWh/to und für die Holzpellets aus der Literatur mit 4900 kWh/to gerechnet. Der Unterschied bei den Heizwerten der Holzpellets basiert auf dem Einsatz von rindenhaltigen Sägespänen bei der Produktion der Pellets auf der Forschungsanlage. Der sehr niedrige Heizwert der Pferdemistpellets ist Bestandteil der Diskussion in Kapitel 5.2.

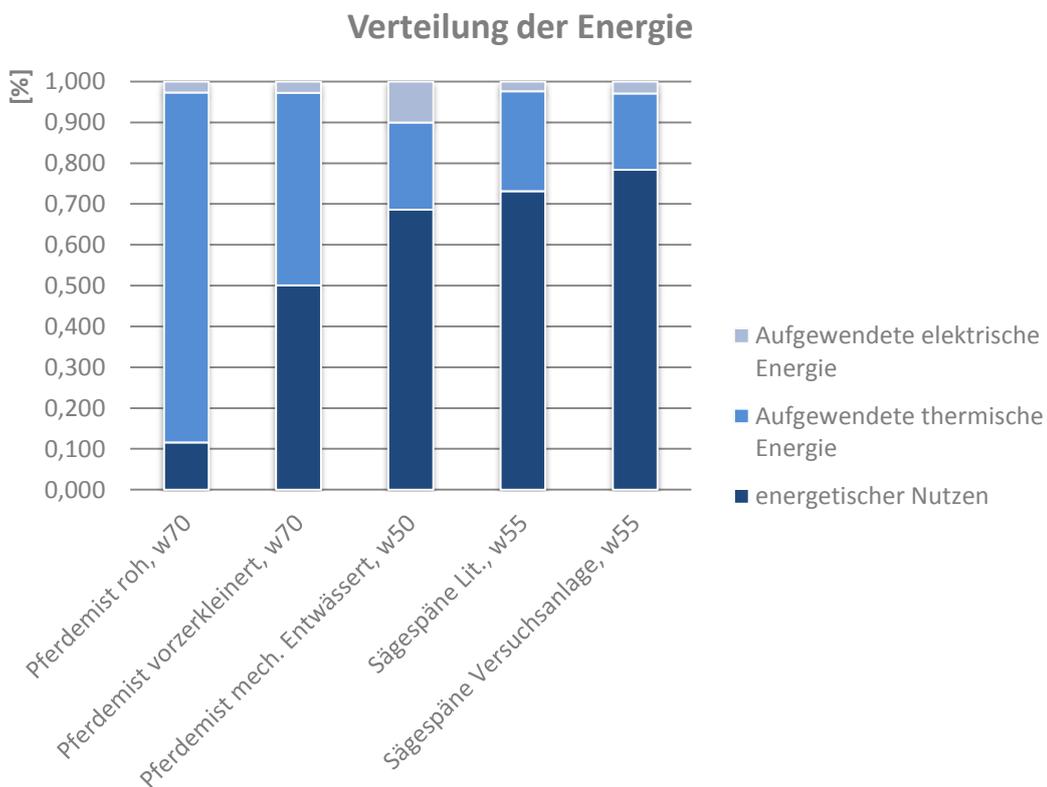


Abbildung 79: Aufteilung der in den Pellets enthaltenen Energie in die Anteile für die Produktion benötigte thermische und elektrische Energie und der verbleibende energetische Nutzen in %.

Die Abbildung 79 zeigt deutlich den Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie beim Einsatz einer mechanischen Vorentwässerung. Ebenso zeigt es die unabdingbare Notwendigkeit einer Vorzerkleinerung. Auf den ersten Blick wirken die Werte für den Energiebedarf zur Produktion von Holzpellets mit rund zwanzig Prozent etwas hoch. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass der Hauptanteil des Energiebedarfs durch die thermische Trocknung entsteht. Hier wird von einem hohen Eingangswassergehalt von 55 % ausgegangen. Dieser hat wiederum hohe Werte für den thermischen Energiebedarf zur Folge. In der Praxis spricht man häufig von 40 – 50 % Eingangswassergehalt. Damit werden die bekannten Energiebedarfe von 12 – 17 % für Pelletproduktion bezogen auf den Energieinhalt der Pellets erreicht.

Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Einsatz einer sehr kleinen Schneckenpresse zur mechanischen Vorentwässerung. Eine größere Presse könnte hier eine Verbesserung der Energieeffizienz bringen. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse bleibt der signifikant höhere Energiebedarf für die Aufbereitung von Pferdemist im Vergleich zu Sägespänen festzuhalten. Dies ist dem durchschnittlich 15 – 20 % höheren Eingangswassergehalt zuzuschreiben.

5.2 Brennstoffeigenschaften

In diesem Kapitel werden die maßgeblichen Brennstoffeigenschaften diskutiert. Es werden verschiedene Studien aufgeführt, da nur wenige vorliegende Arbeiten das gesamte Spektrum der in dieser Arbeit untersuchten Bereiche abdecken. Die anspruchsvollen Biomassen wurden zum Teil nur begleitend zu den Hauptprojekten untersucht. Teilweise wurden auch nur Auszüge der ermittelten Werte veröffentlicht. Dies gilt insbesondere für die vorliegenden Untersuchungen in denen Pferdemist analysiert wurde. Die angegebenen Werte stammen aus folgenden Studien:

- Pferdemist TFZ: Pferdemistpellets in einer Kleinfeuerung – Ein Brennstoffvergleich [24].

- Pferdemit ÖKL: Pferdemit als Brennstoff in Biomassefeuerungen. ÖKL-Merkblatt Nr. 95 1.Auflage [27].
- Heu TLL: Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die thermische Verwertung [95]
- Heu WM: Reduction of CO₂-emissions by using biomass in combustion and digestion plants [96]
- Gras FFV: Brennstoffkonditionierung durch mechanische Aufbereitung Eigenschaften von Gras- und Laubbrennstoff aus dem florafuel-Verfahren [94]
- Stroh FNR: Leitfaden feste Biomassebrennstoffe [97]. (Weizenstroh)
- Stroh TLL: Stroh als Brennstoff: Einfluss der Strohqualität auf den Anlagenbetrieb und Grundlagen eines Brennstoff-Qualitätsmanagements [98]. (Winterweichweizen, Batis)
- Traubentrester DBFZ: Thermische Nutzung von Traubentresterpellets in Kleinfeuerungsanlagen <100 kW [99]
- Gärrest DBFZ: Beurteilung der thermischen Nutzung von Biomassepellets aus Gärresten [100]

5.2.1 Elementarzusammensetzung

Die Darstellung der Elementarzusammensetzung dient in erster Linie dem Verständnis der in den folgenden Kapiteln diskutierten Brennstoffeigenschaften. Diese resultieren aus der elementaren Zusammensetzung der Biomassen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über die Unterschiede der Zusammensetzungen und deren Verhältnisse erforderlich. Die Abbildung 80 bis Abbildung 88 zeigen die in Bezug auf die Brennstoffeigenschaften wichtigsten Elementgehalte von Pferdemit im Vergleich zu anderen Biomassen.

Abbildung 80 zeigt die Calciumgehalte der Pferdemitproben und der Proben der Vergleichsstudien.

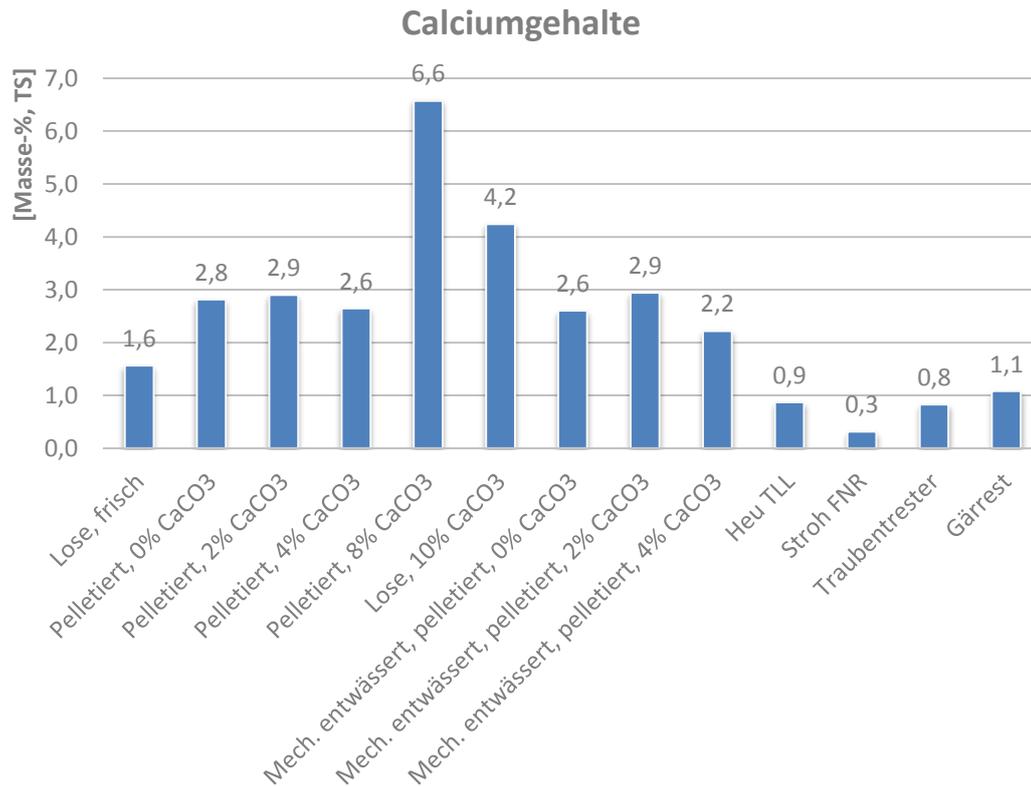


Abbildung 80: Vergleich der Calciumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [97], [99], [100].

Abbildung 80 zeigt die im Vergleich mit den Biomasseproben aus den Vergleichsstudien hohen Konzentrationen von Calcium in den Pferdemistproben. Dies gilt auch für die Pferdemistproben welche nicht zusätzlich mit Kalk versetzt wurden. Der Calciumgehalt in Weidegras, Heu und anderen Pflanzen wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Zum einen gibt es Unterschiede bei den Pflanzenarten, so haben Kräuter einen höheren Calciumgehalt als Weidegras [101]. Den deutlich größeren Einfluss hat jedoch die Schnittfolge. Der erste Schnitt weist dabei geringere Calciumkonzentrationen auf als die darauf folgenden Schnitte. Der unterschied kann hier bis zu 34 % betragen [102]. Einen weiteren erheblichen Einfluss hat der Zeitpunkt des ersten Schnittes. Ein früher erster Schnitt weist hier bis zu 22 % höhere Calciumgehalte auf als ein später Schnitt [103]. Dies erklärt die Schwankungen der Calciumgehalte in den oben gezeigten Proben. In Abbildung 81 sind die Kaliumgehalte der untersuchten Pferdemistproben im Vergleich mit den Werten der Vergleichsstudien zu sehen.

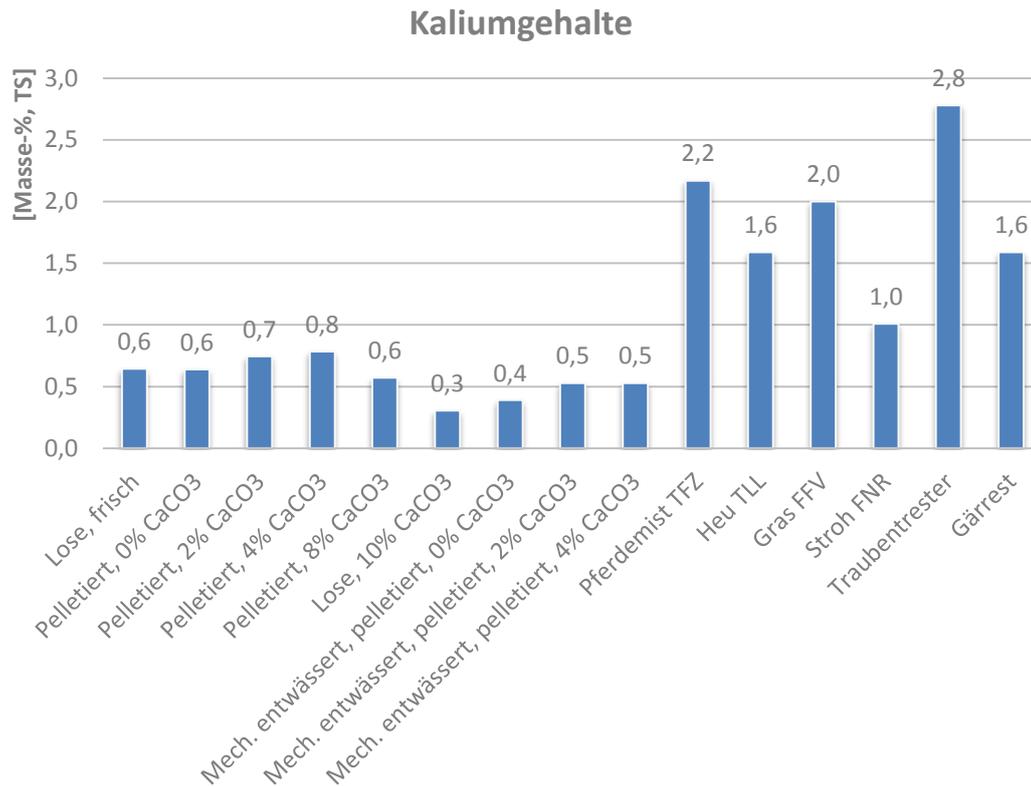


Abbildung 81: Vergleich der Kaliumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemit mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [95], [97], [99], [100].

Auch bei den Kaliumgehalten sind signifikante Unterschiede zu den Ergebnissen der Vergleichsstudien zu erkennen. Besonders auffällig ist die große Differenz zwischen den in dieser Arbeit untersuchten und der durch das TFZ untersuchten Pferdemitproben. Mögliche Ursachen für diese Differenzen liegen auch hier am Schnitzeitpunkt an der Art des Bodens auf dem die Pflanzen wachsen und an der Düngung. Bei einem frühen ersten Schnitt zeigen sich auch für Kalium erhöhte Werte. Die Schwankungen betragen hier bis zu 22 % [103]. Bezüglich der Böden besitzen Schwarzerden oder Lössböden hohe Kaliumgehalte, was sich auch in den Pflanzen widerspiegelt. In sandigen Böden hingegen ist nur wenig Kalium vorhanden [104]. Eine Düngung mit kaliumhaltigem Dünger oder eine Nährstoffrückführung durch das Ausbringen von Mist, wirkt sich deutlich auf den Kaliumgehalt aus. In den Untersuchungen von [102] stieg der Kaliumgehalt im Gras nach der Düngung um 34 % an.

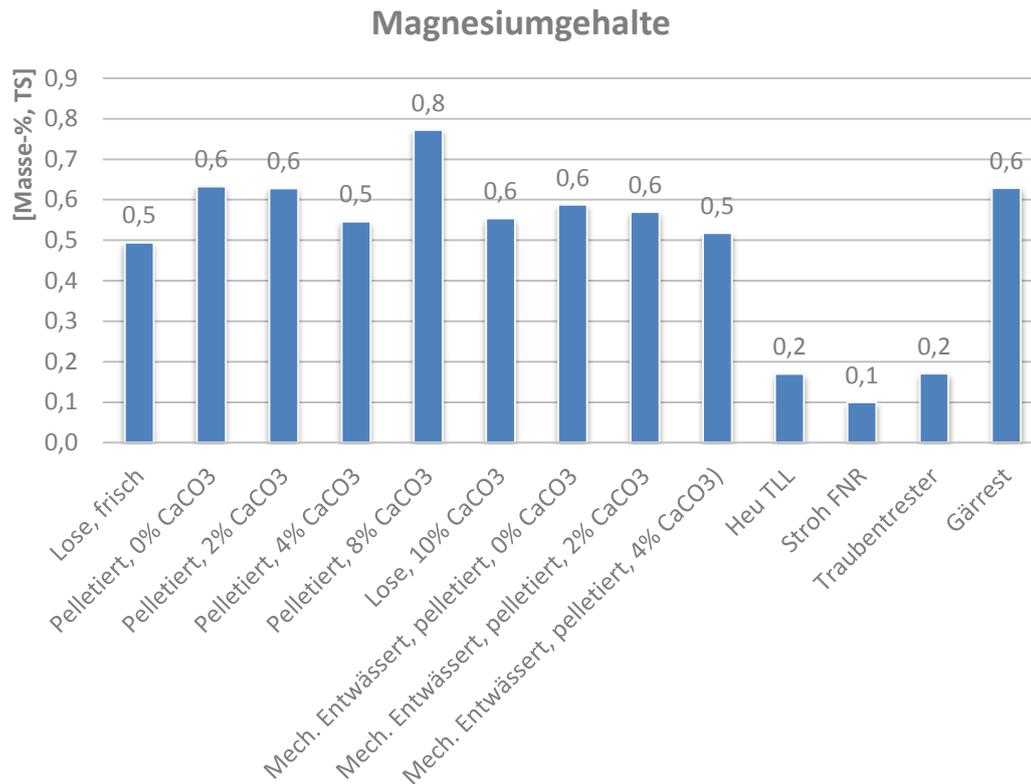


Abbildung 82: Vergleich der Magnesiumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [97], [99], [100].

Abbildung 82 zeigt die Magnesiumkonzentrationen der verglichenen Biomassen. Hier fällt die Differenz zwischen den Proben geringer aus. Auch für Magnesium gilt, je mehr davon im Boden gespeichert ist, desto höher ist auch der Anteil in der Pflanze [104]. Die Beschaffenheit der Pflanze spielt für den Magnesiumanteil eine beachtliche Rolle. Strohige Biomasse mit hohem Rohfaseranteil weist geringere Werte auf als rohfaserarmeres Heu. Laut [102] sind hier Unterschiede von bis zu 34 % möglich. Dies bestätigt sich auch durch die geringen Magnesiumkonzentrationen der Probe „Stroh FNR“ im oben gezeigten Diagramm.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Konzentrationen der Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O₂), Stickstoff (N) und Schwefel (S). Diese sind ausschlaggebend für den Brennwert der Biomasse. Stickstoff- und Schwefelgehalt haben zudem Einfluss auf die umweltschädlichen Emissionen NO_x und SO₂.

In Abbildung 83 sind die Kohlenstoffgehalte gegenüber gestellt.

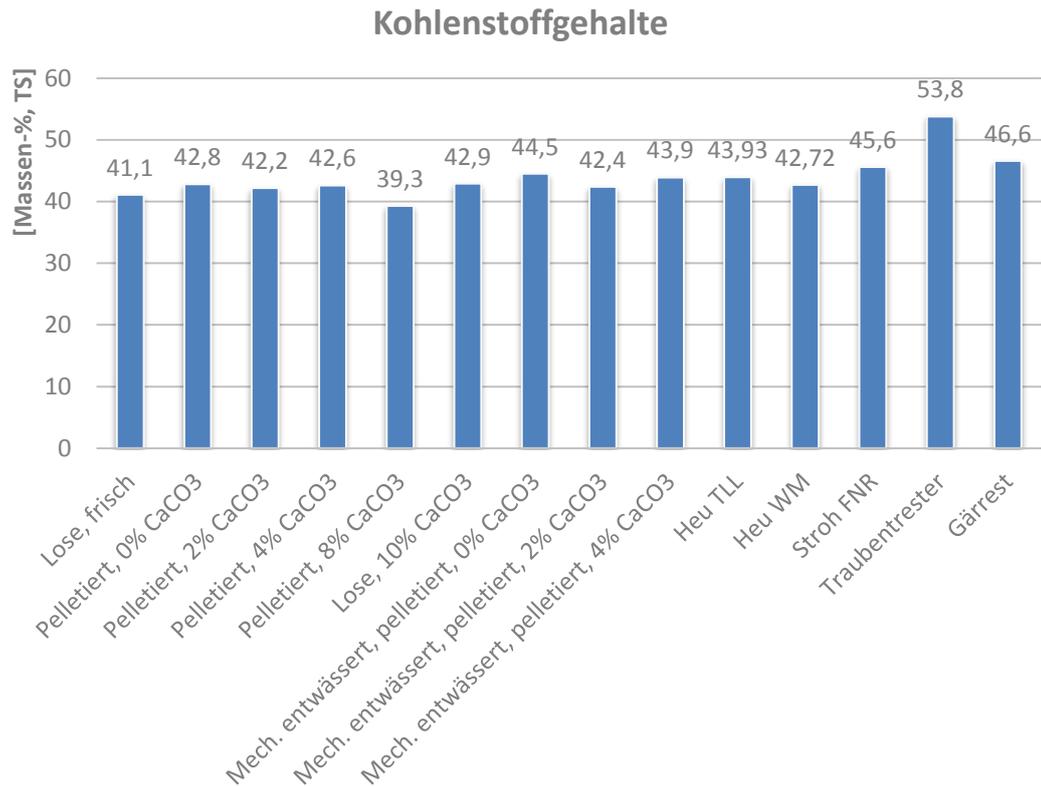


Abbildung 83: Vergleich der Kohlenstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].

Die Ergebnisse der Analysen bezüglich des Kohlenstoffgehalts zeigen keine Auffälligkeiten. Die Werte liegen alle in den allgemein bekannten Bereichen für die jeweiligen Biomassen. Die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte resultieren aus den verschiedenen Pflanzenstrukturen. Diese setzen sich aus Cellulose, Hemicellulosen, Proteinen und bei holzigen und krautigen Pflanzen aus Lignin zusammen. Cellulose, Hemicellulosen und Lignin sind Moleküle aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Sie übernehmen die Stützfunktion in der Pflanze. Cellulose und Hemicellulosen, auch Kohlenhydrate genannt haben den größten Anteil an der Pflanzensubstanz. Dieser Anteil liegt je nach Pflanze bei bis zu 90 % der Trockensubstanz. Aus diesem Grund haben stabile Pflanzen wie Bäume, aber auch Stroh, tendenziell einen höheren Kohlenstoffanteil [105] [29]. Gras hat aufgrund seiner flexiblen Struktur einen geringeren Cellulosegehalt und somit auch einen geringeren Kohlenstoffgehalt. Für den erhöhten Kohlenstoffgehalt des Traubentrestlers kann der enthaltene Fruchtzucker eine Erklärung liefern.

Fructozucker besteht aus Kohlenstoffmolekülen und gehört zu den Kohlenhydraten [105].

In Abbildung 84 sind die Wasserstoffgehalte der Pferdemistproben und der in den Vergleichsstudien untersuchten Biomasseproben zu sehen.

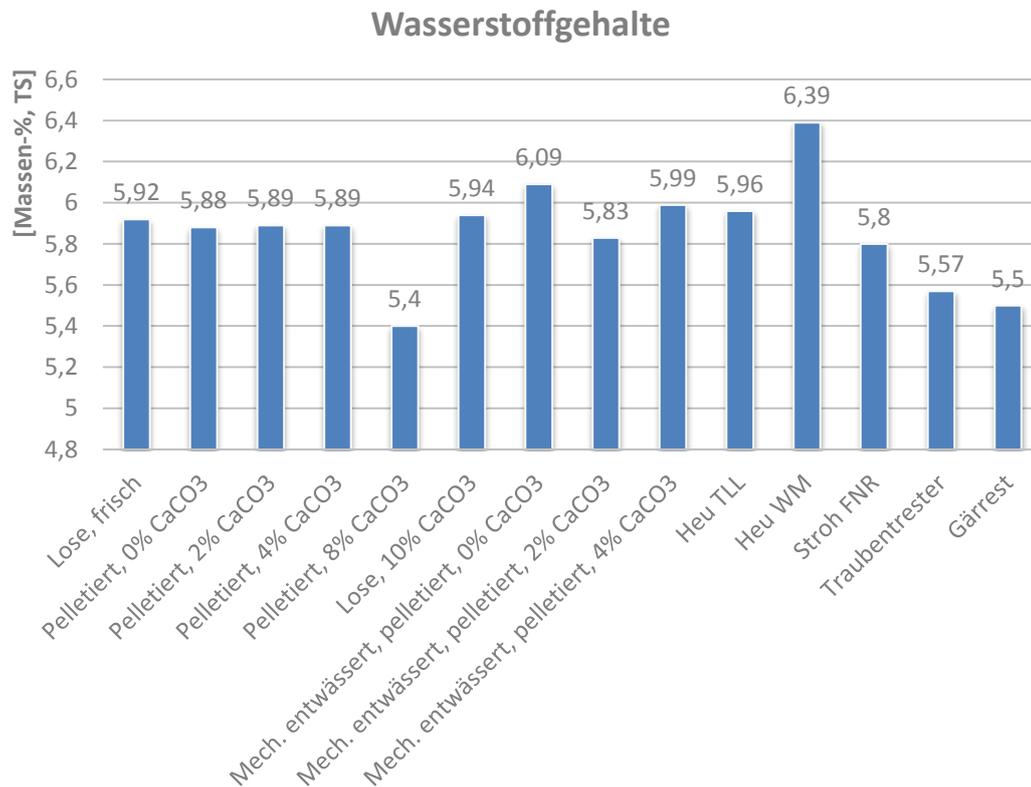


Abbildung 84: Vergleich der Wasserstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].

Laut [29] liegt der durchschnittliche Wasserstoffgehalt von Biomasse bei 6 % der Trockenmasse. Hier gibt es keine Auffälligkeiten in den Ergebnissen der untersuchten Pferdemistproben sowie in den Ergebnissen der Vergleichsstudien. Der Wasserstoff entsteht bei der Photosynthese und wird zur Bildung der Kohlenhydrate (Cellulose, Hemicellulose) benötigt. Somit hängt die Konzentration ebenfalls von der Pflanzenstruktur ab [105].

Abbildung 85 zeigt die Sauerstoffgehalte der verglichenen Biomassen.

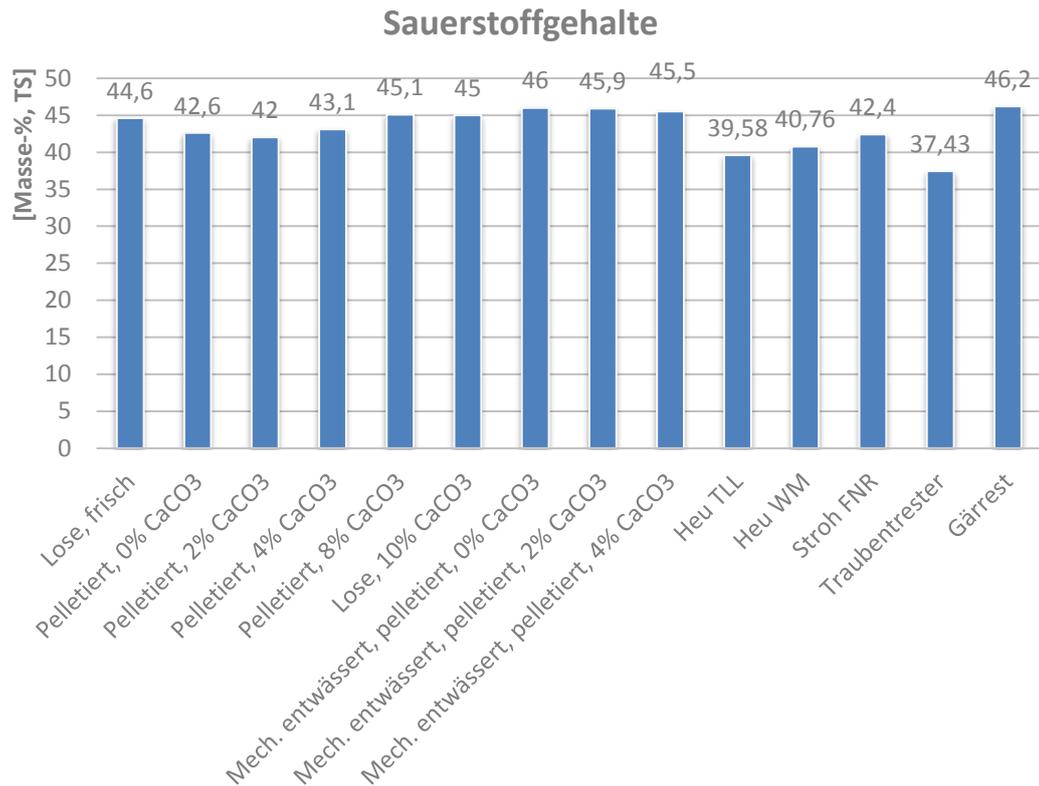


Abbildung 85: Vergleich der Sauerstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].

Auch der Sauerstoffgehalt wird maßgeblich von der Pflanzenstruktur beeinflusst, da auch dieser ein Bestandteil der Kohlenhydrate ist. Damit gelten hier dieselben Bedingungen wie bei den Kohlenstoff- und Sauerstoffanteilen [105].

Die Folgenden Abbildungen zeigen die für die Entstehung von umweltschädlichen Emissionen verantwortlichen Elemente Stickstoff, Schwefel und Chlor.

In Abbildung 86 sind die Stickstoffgehalte aufgeführt.

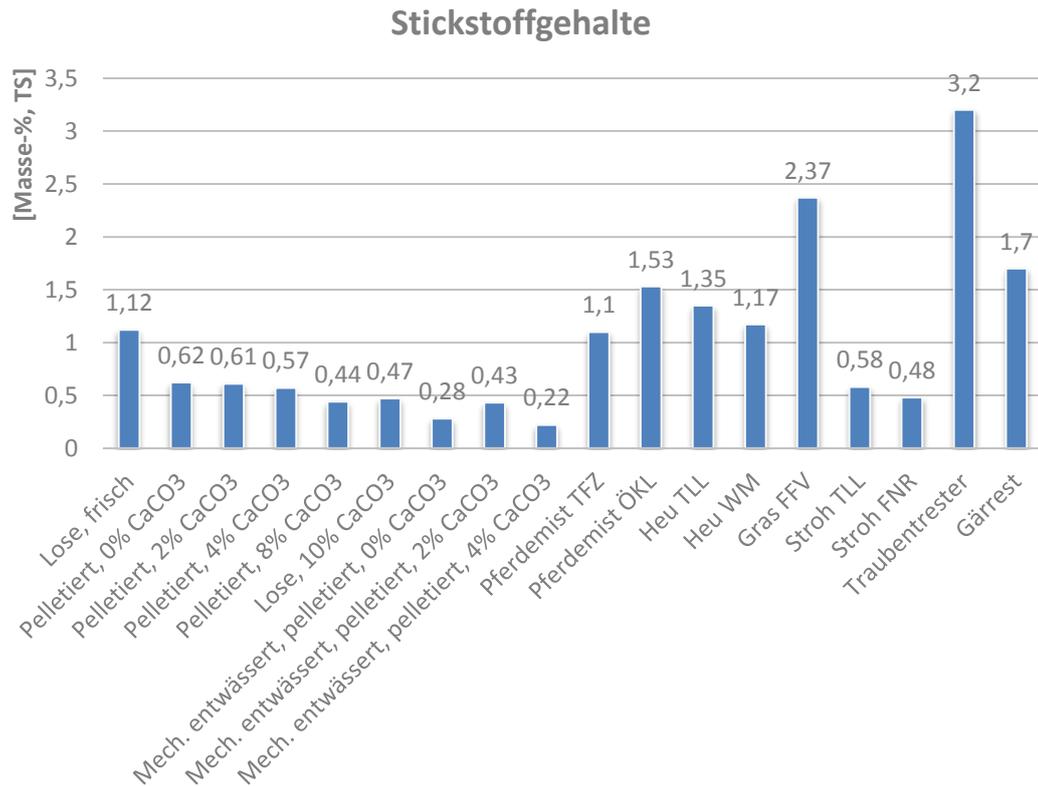


Abbildung 86: Vergleich der Stickstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].

Die oben aufgeführten Stickstoffgehalte der verglichenen Biomasseproben weisen deutliche Unterschiede auf. Der Stickstoffgehalt ist von verschiedenen Faktoren abhängig. So wirkt sich Pflanzen-/Fruchtart, Bodenart, die Witterung aber auch die Art der Bewirtschaftung auf die Konzentration von Stickstoff im Boden aus. Der größte Einfluss bei landwirtschaftlich genutzten Flächen ist jedoch durch die Düngung zu beobachten [104].

Bei Stroh war laut [29] pflanzlich bedingt eine geringere Stickstoffkonzentration zu erwarten. Die hohen Werte für Gärrest und Traubentrester sind auf eine intensive Düngung der Böden für eine optimale Ertragsausbeute zurückzuführen. Da bei den Probenchargen der Firma florafuel Grasschnitt aus Grünanlagen und Parks zum Einsatz kam, kann hier ebenfalls die Düngung dieser Flächen mit Stickstoff die Ursache der hohen Konzentrationen sein. Dies kann aber nicht abschließend geklärt werden, da keine Informationen über Düngung der entsprechenden Flächen vorliegen.

Der Unterschied der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Probe „lose frisch“ und den Pferdemist Proben des ÖKL und TFZ ist gering und kann auf eine unterschiedliche Bodenzusammensetzung und Messtoleranzen zurückgeführt werden. Einen weiteren Einfluss könnte die Zusammensetzung des Pferdemists durch unterschiedliche Einstreuanteile haben. Da aber keine Angaben in den betreffenden Studien zu der genauen Zusammensetzung gemacht wurden, kann hier keine abschließende Klärung stattfinden. Bei den aufbereiteten Chargen zeigen die Aufbereitungsschritte eine positive Auswirkung auf die Störstoffgehalte. Bei der Pelletierung ohne vorheriges mechanisches Entwässern konnte nicht mit einer Reduktion des Stickstoffgehalts gerechnet werden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass der im Wasser gelöste Stickstoff mit dem Wasserdampf bei der Trocknung ausgetragen wird. Dies kann aber nur durch Analysen der Trocknerabluft eindeutig nachgewiesen werden.

Bei den mechanisch entwässerten Proben ist der gewünschte Effekt der Stickstoff-Absenkung zu sehen.

Abbildung 87 zeigt einen Vergleich der Schwefelgehalte.

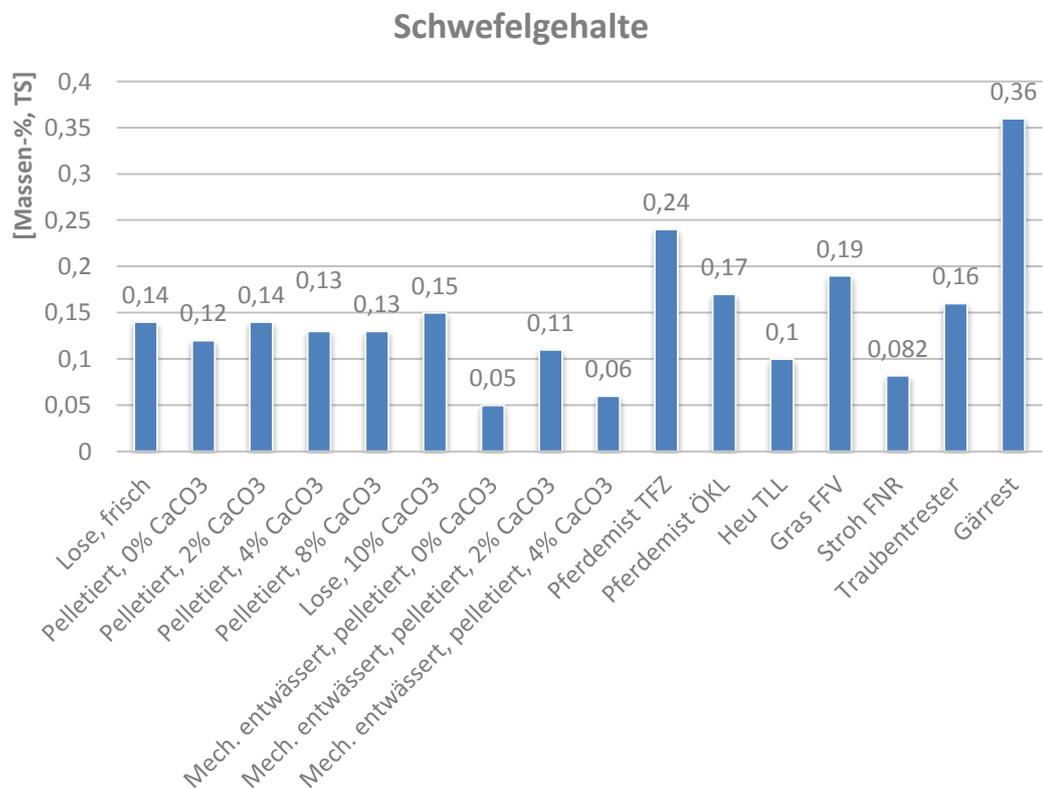


Abbildung 87: Vergleich der Schwefelgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].

Der Bedarf an Schwefel wird hauptsächlich aus den von der Industrie verursachten Immissionen, welche in den Boden eingetragen werden, gedeckt. Aufgrund der verbesserten Rauchgasreinigungssysteme der Industrie ist diese Schwefel-Quelle rückläufig. So können deutliche Unterschiede der Schwefelgehalte der Böden je nach ihrer Entfernung zu Industrieanlagen gemessen werden. Dies wirkt sich direkt auf den Schwefelgehalt in den Pflanzen aus. Vielerorts wird dies durch S-Düngung ausgeglichen [104]. Die Düngung findet allerdings hauptsächlich auf Ackerflächen und weniger auf Grünlandflächen statt.

Dies liefert eine Erklärung für die Schwankungen der Schwefelgehalte. Im Vergleich der Pferdemitproben kann hier, wie auch bei den Stickstoffgehalten ein höherer Einstreuanteil, speziell wenn es sich um Sägespäne handelt, einen positiven Einfluss auf den Schwefelgehalt haben. Zu sehen ist ebenfalls die positive Auswirkung des mechanischen Entwässerns auf den Schwefelgehalt.

Der Vergleich der Chlorgehalte ist in Abbildung 88 dargestellt.

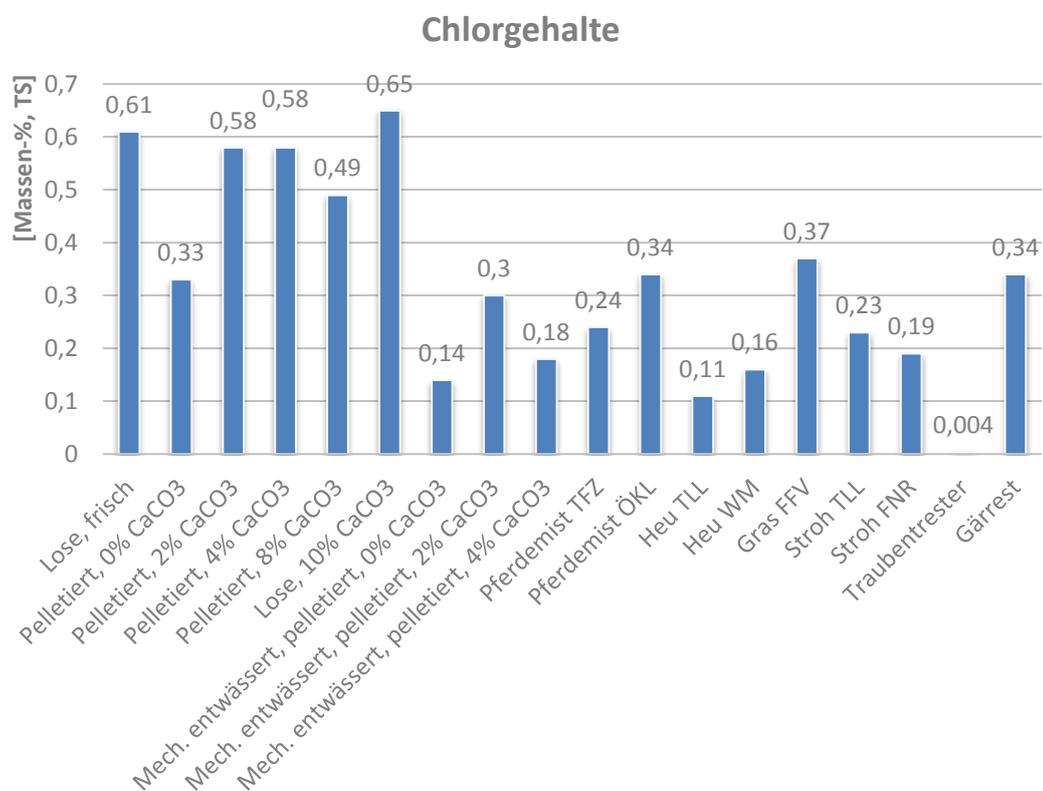


Abbildung 88: Vergleich der Chlorgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemit mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].

Der Chlorgehalt ist sehr stark von der Pflanzenart und von den Pflanzenteilen selbst abhängig. So gibt es große Unterschiede zwischen den verschiedenen Strohsorten. So liegen die Mittelwerte von Hafer-, Raps- und Gerstenstroh bei 0,537 % der Trockensubstanz. Bei Roggen-, Triticale- und Winterweizenstroh hingegen bei 0,227 % der Trockensubstanz [106]. Der Chlorgehalt von Weizen- und Triticalekörnern liegt nach [29] bei 0,04 – 0,07 % der Trockensubstanz.

Beeinflusst wird der Chlorgehalt ebenfalls durch den Erntezeitpunkt, die Düngung, die Standortwahl und eine mögliche Zwischenlagerung auf dem Feld.

Der Erntezeitpunkt hat hierbei den größten Einfluss, da die Pflanzen bis zur Ernte Chlor aufnehmen. Ein Zwischenlagern auf dem Feld kann hauptsächlich bei Stroh einen positiven Effekt haben, wenn das Stroh 14 Tage auf dem Feld belassen und in dieser Zeit ein oder mehrmals eingeregnet wird [107]. Der Erntezeitpunkt sollte beachtet werden, da die Pflanzen bei entsprechendem Angebot und Zeit Chlor auch über ihren eigentlichen Bedarf hinaus anreichern [106]. Aus diesem Grund sollte auch eine übermäßige Düngung mit Chlor vermieden werden. Variierende Standorte und damit auch unterschiedliche Chlorgehalte der dort vorzufindenden Böden haben ebenfalls erheblichen Einfluss auf den Chlorgehalt der Pflanzen. So ist der dargestellte Chlorgehalt von Gras ein Mittelwert von drei Graschargen, welche von unterschiedlichen Standorten stammen. Bei diesen Chargen variierte der Chlorgehalt um den Faktor 3 [94].

Dies erklärt die Unterschiede der Chlorgehalte der unterschiedlichen Biomassen. Die Unterschiede zwischen den in dieser Arbeit untersuchten Pferdemistproben und den Proben des TFZ und ÖKL können mit den oben aufgeführten Gründen in Verbindung gebracht werden. Darüber hinaus spielt auch hier wieder die Zusammensetzung der Mistproben eine große Rolle. Der Querschnitt der eigenen Versuche zeigt die positive Auswirkung der mechanischen Entwässerung auf den Chlorgehalt.

5.2.2 Wassergehalt

In Abbildung 89 sind Wassergehalte unterschiedlicher Biomassen, welche zur Pelletproduktion eingesetzt werden oder eingesetzt werden könnten, aufgeführt. Die Werte beziehen sich auf den Wassergehalt der analysierten Proben.

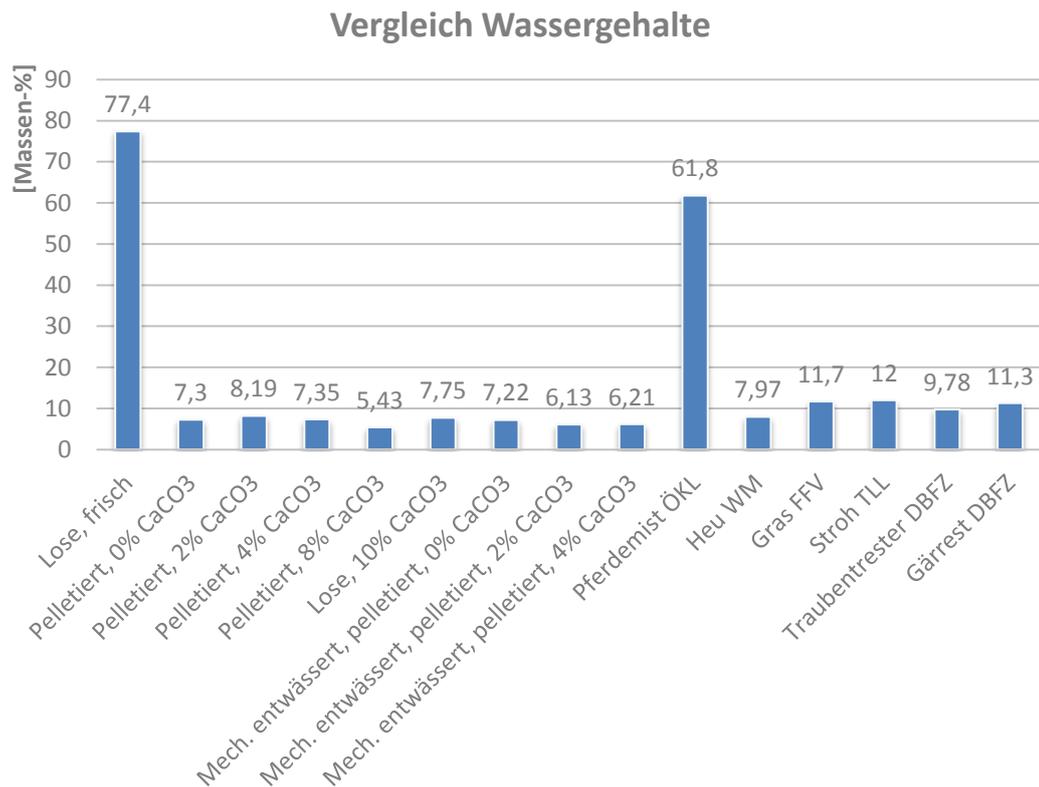


Abbildung 89: Vergleich der Wassergehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-% [27], [96], [94], [98] [99], [100].

Die Abbildung zeigt den hohen Wassergehalt von Pferdemist. Dieser entsteht durch das Durchlaufen des Verdauungstraktes des Pferdes. Der Unterschied zwischen dem Wassergehalt der Probe „Lose frisch“ und dem Wassergehalt der ÖKL-Studie kann mehrere Ursachen haben. So führt ein höherer Anteil an Einstreu zur Absenkung des Wassergehaltes. Die Probenchargen für die hier vorliegende Arbeit hatten einen Einstreugehalt von lediglich 3 – 5 %. Es sind jedoch durchaus Betriebe zu finden, welche Einstreuanteile von bis zu 40 % und mehr aufweisen. Dies wird in der Studie auch beschrieben, jedoch wird nicht genannt, welcher Anteil in den untersuchten Proben zu finden war [27]. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Jahreszeit, zu welcher

die Proben von den Höfen geholt werden und ob die Boxen und Ausläufe der Pferde überdacht sind. Hierzu liegen ebenfalls keine Angaben vor. Die Differenz liegt jedoch in einem Bereich, der auch im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der genannten Einflussfaktoren vorzufinden war. Die Proben für die Hauptversuche wurden alle im Herbst entnommen und stellen somit das „worst-case“-Szenario dar. Ein Vergleich des Wassergehaltes unterschiedlicher Biomassen fällt schwer. So wird Heu oder Stroh auf dem Feld getrocknet und liegt dann schon mit einem geringem Wassergehalt für die Pelletierung vor. Dies bedeutet jedoch nicht, dass hier keine Aufbereitung und somit Energie in den Rohstoff investiert wurde. So muss etwa Heu gemäht und gewendet werden. Dies ist bei einer eventuellen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

5.2.3 Heizwert

Der Heizwertwert ist eine der entscheidenden Größen für die Eignung einer Biomasse als Brennstoff. Der Heizwert hängt von der elementaren Zusammensetzung des Brennstoffs und dem Wassergehalt ab.

Abbildung 90 zeigt die Heizwerte verschiedener Biomassen im Vergleich. Es wird jeweils der Heizwertwert (H_i) bezogen auf die Trockensubstanz [kgTS] dargestellt.

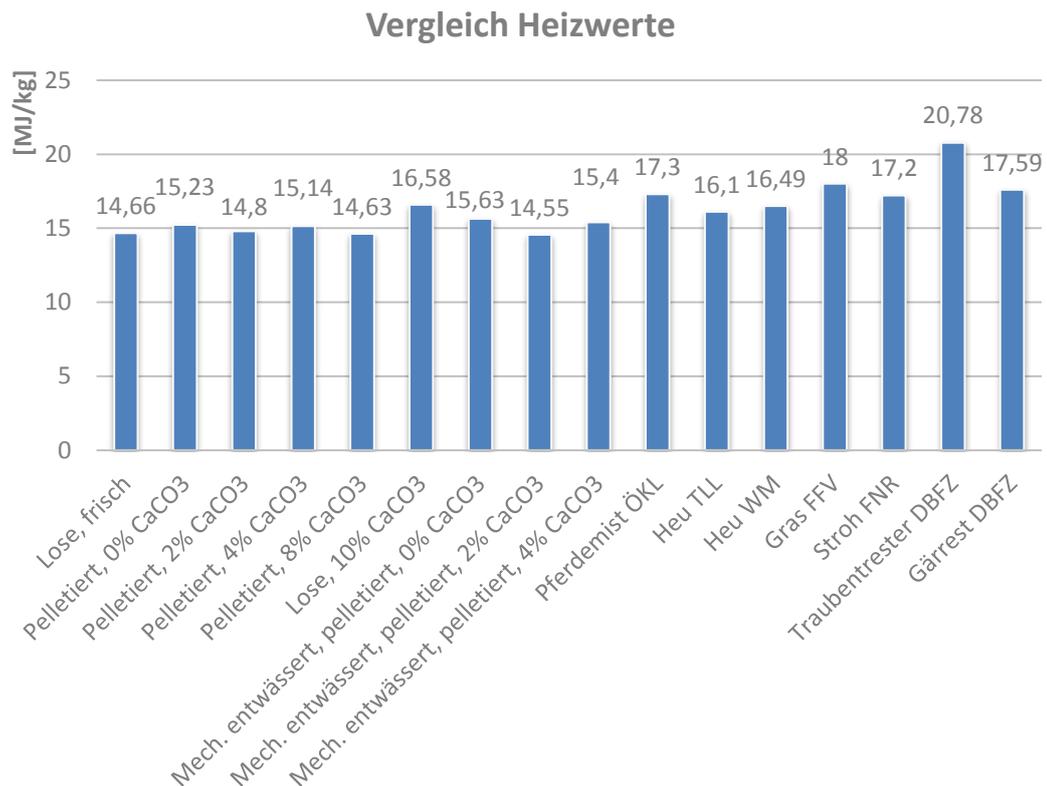


Abbildung 90: Vergleich der Heizwerte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemit mit verschiedenen Biomassen [27], [95] [96], [94], [97], [99], [100].

Die hier durchgeführten Untersuchungen ergaben für Pferdemit einen im Durchschnitt geringeren Heizwert im Vergleich zu anderen Biomassen. Ebenso ist bei den untersuchten Proben kein Trend zur Reduktion des Brennwertes durch die Zugabe von Kalk und somit der Erhöhung des Bestandteils mineralischer Elemente zu erkennen. In den Vorversuchen wurden teilweise deutlich höhere Heizwerte von bis zu 17 MJ/kg gemessen. Da auch bei der Bestimmung des Brennwertes und dem daraus berechneten Heizwert nur geringe Mengen Probenmaterial untersucht werden können und somit keine ausgewogene Probenzusammensetzung gewährleistet ist, sind Schwankungen in den Ergebnissen die Folge. Im Rahmen der Messfahrten wurde deutlich, dass der Grad durch Verunreinigungen bei Pferdemit sehr stark variiert. Dies gilt besonders für Verunreinigungen durch Sand. Hier waren die Verunreinigungen teilweise mit bloßem Auge sichtbar, vgl. hierzu Abbildung 20. Somit war der Anteil an mineralischen Stoffen durch äußere Störfaktoren deutlich erhöht. Dies wirkte sich wiederum direkt auf die Analyseergebnisse aus.

Der Anteil der gesamten mineralischen Stoffe kann leider nicht verglichen werden, da in den Veröffentlichungen der aufgeführten Studien keine Elementaranalysen

mit allen mineralischen Elementen aufgeführt sind. Dies hätte den Einfluss dieser Störgröße endgültig geklärt.

Die erneute starke Abweichung des Wertes der ÖKL-Studie stärkt die Annahme eines hohen Einstreuanteils in Form von Sägespänen in den Proben.

Der etwas höhere Heizwert von Gras ist durch das vollständige Entfernen von mineralischen Verunreinigungen wie Sand und Erde durch das florafuel-Verfahren zu erwarten gewesen. Darüber hinaus werden die wasserlöslichen mineralischen Bestandteile der Pflanzenstruktur ebenfalls durch das Verfahren ausgewaschen [38].

Stroh, Traubentrester und Gärrest haben bedingt durch ihren hohen Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffanteil ebenfalls einen höheren Heizwert, vgl. hierzu auch Gleichung (3-1).

Was den Vergleich der Heizwerte zusätzlich erschwert ist die teilweise ungenaue Angabe des Wassergehalts in den Vergleichsstudien. Die in Abbildung 89 aufgeführten Wassergehalte beziehen auf Durchschnittswerte aus mehreren Messungen. Dadurch ist eine Umrechnung auf einen Referenzwassergehalt oder den Brennwert nicht sinnvoll. Da die Ergebnisse lediglich eine geringe Aussagekraft hätten.

5.2.4 Aschegehalt und Ascheerweichungstemperatur

Für einen störungsfreien Betrieb müssen Biomassefeuerungen mit ausreichenden Ascheaustragsvorrichtungen versehen sein. Darüber hinaus stellt ein großer Ascheanfall unter Umständen ein Entsorgungsproblem dar.

Kenntnis über die zu erwartenden Ascheerweichungstemperaturen ermöglicht die Anpassung der Feuerungsraumtemperaturen, um Betriebsstörungen zu verhindern. Abbildung 91 zeigt die Aschegehalte unterschiedlicher Biomassen. In Abbildung 92 sind die zugehörigen Ascheerweichungstemperaturen dargestellt.

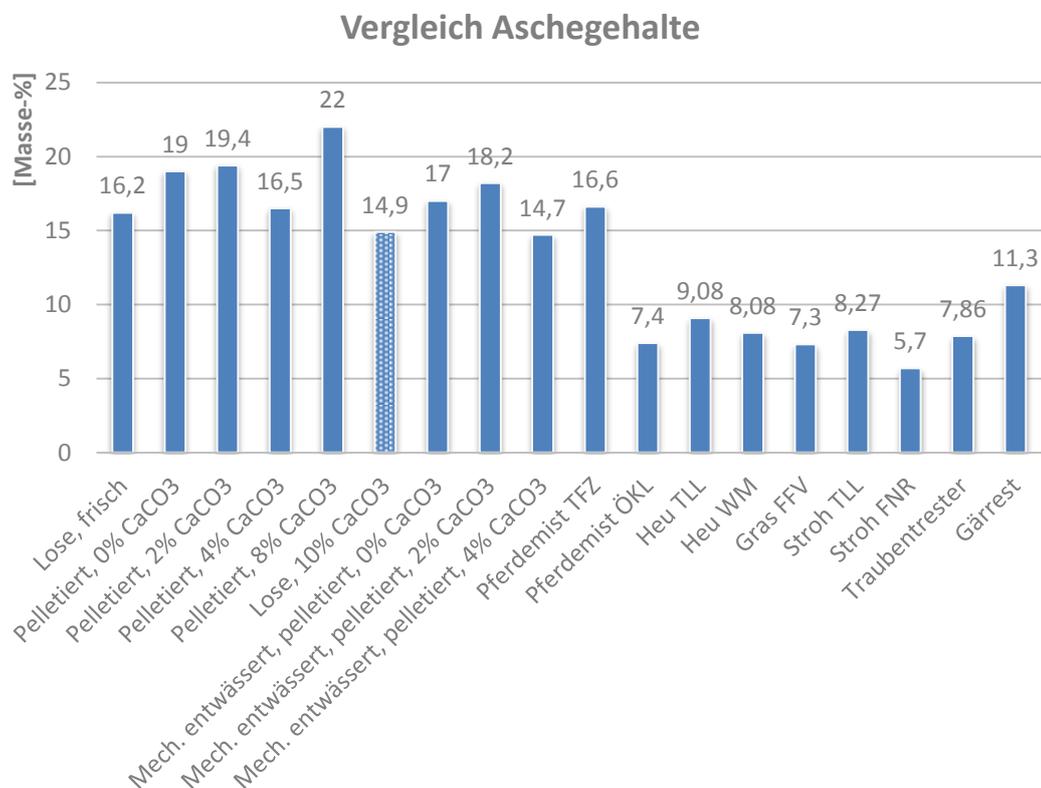


Abbildung 91: Vergleich der Aschegehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-% [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].

Es ist ein deutlich erhöhter Aschegehalt von Pferdemist im Vergleich zu den anderen Biomassen zu erkennen. Dies ist durch die Elementarzusammensetzung der Biomassen zu erklären. Hier wirken sich die geringen Gehalte der mineralischen Bestandteile der zum Vergleich herangezogenen Biomassen positiv aus.

Die große Differenz zwischen den Werten der ÖKL-Studie und der restlichen für Pferdemist aufgeführten Werte zeigt nun sehr deutlich, dass es sich hier um eine variierende Probenzusammensetzung handeln muss. Dies wird durch eine in der Schweiz erstellte Studie bestätigt. Hier wurden Pferdemistproben mit einem maximalen Anteil Pferdemist von 15 % verbrannt. Die Aschegehalte lagen dabei im Durchschnitt bei 8,3 % [22].

Der niedrige Aschegehalt bei der Probencharge mit 10 % Calciumcarbonat ist durch den hohen Austrag an Asche bei der Verbrennung des losen Materials im Feuerungsversuchsstand zu erklären. Eine Messung der Partikelbeladung des Rauchgases war nicht mehr möglich, da der Messbereich des Messgerätes überschritten war. Nach der Messfahrt waren Ablagerungen auf dem Dach neben dem Rauchgassystem zu sehen. Da der eingesetzte Kessel für Hackschnitzel und Pellets konstruiert ist, und damit auch die Luftzufuhr dementsprechend positioniert ist, war mit diesem Problem zu rechnen. Jedoch war eine Pelletierung mit so hohem Calciumcarbonatanteil, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, nicht mehr möglich.

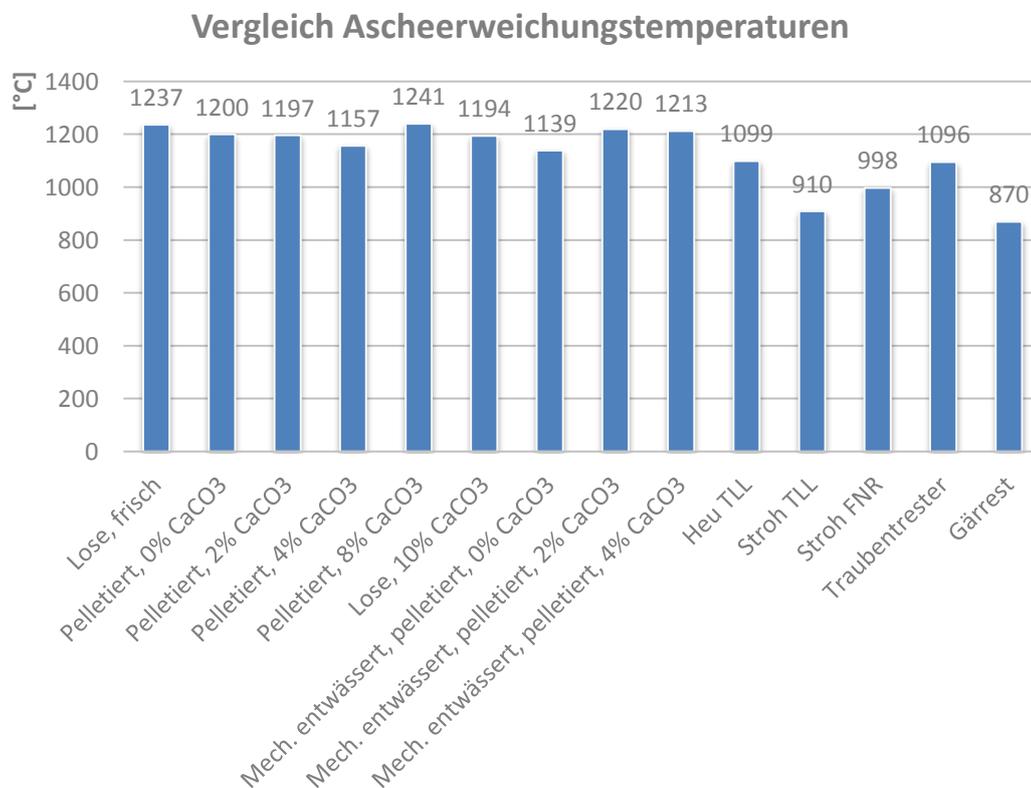


Abbildung 92: Vergleich der Ascheerweichungstemperaturen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in °C [95], [98], [97], [99], [100].

In Bezug auf die Ascheerweichungstemperatur wirken sich nun der geringe Calcium-Gehalt sowie der hohe Kaliumgehalt von Stroh und Gärrest negativ aus. Dieser Zusammenhang zeigt sich in Gleichung (2-74).

Die Auswirkungen durch die Zugabe von Calciumcarbonat in die Pferdemistpellets sind gering. Dies deckt sich mit den in Kapitel 2.7.3 dargestellten Ergebnissen der Vorversuche. Hier war eine maximale Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur von 1185 °C auf 1280 °C möglich. Dies stellt die Grenzen der Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur mit Calciumcarbonat dar. Dies wird durch eine Studie der Technischen Universität Dresden bekräftigt, bei der mit Hilfe des Einsatzes von Calciumcarbonat eine Ascheerweichungstemperatur von > 1200 °C erreicht wurden. Untersucht wurden hierbei stark cellulosehaltige Biomassebrennstoffe [108]. Die Werte liegen somit im selben Bereich. Allgemein sind die Ascheerweichungstemperaturen nicht bedenklich und für eine praxistaugliche Biomassefeuerung ausreichend.

5.3 Emissionen

Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen haben entscheidenden Einfluss auf die Investitionskosten einer Feuerungsanlage. Müssen die Rauchgase aufbereitet werden, kann dies zur Unwirtschaftlichkeit eines Anlagenkonzepts führen. Darüber hinaus hängt die Genehmigung zum Betrieb einer Feuerungsstätte davon ab, ob die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden können. Damit ist das Emissionsverhalten eines Brennstoffes von großer Bedeutung. Abbildung 93 bis Abbildung 99 zeigen die Emissionswerte für die untersuchten Pferdemistchargen im Vergleich zu den Emissionen anderer Biomassebrennstoffe.

Die Emissionen hängen hauptsächlich von der Elementarzusammensetzung der eingesetzten Biomasse ab. Einen weiteren beachtlichen Einfluss auf die Emissionen hat die eingesetzte Feuerungstechnik. Hier gibt es große Unterschiede im Aufbau und der Funktionsweise. Um den Einfluss der Feuerung zu verdeutlichen, sind in den folgenden Abbildungen zusätzlich die Untersuchungen mit Traubentrester des DBFZ mit zwei Feuerungstypen dargestellt. Kessel A ist mit einem automatischen

Vorschubrost versehen. Kessel B hingegen ist mit einem Tunnelbrenner ausgestattet. Sind in den Abbildung 93 Abbildung 94 keine Werte zu erkennen, sind die Werte aufgrund der geringen Konzentration nicht darstellbar.

In Abbildung 93 sind die Kohlenmonoxidemissionen dargestellt.

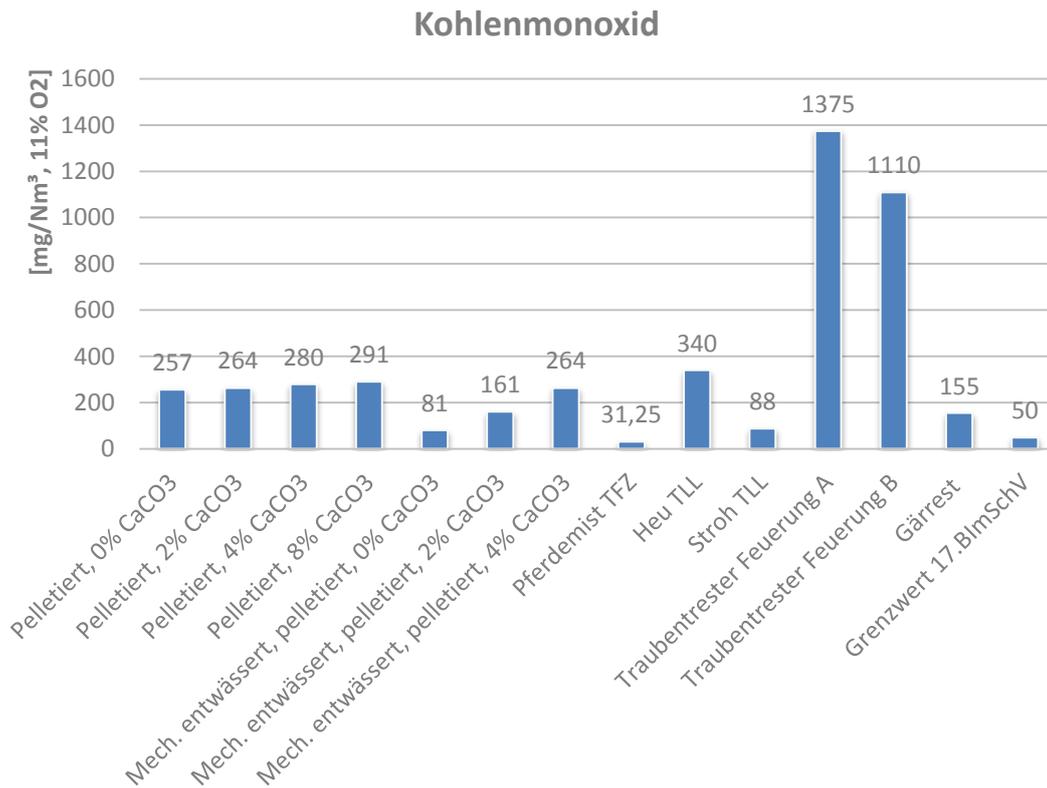


Abbildung 93: Vergleich der Kohlenmonoxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [24], [95], [98], [99], [100], [70].

Eine hohe Kohlenmonoxid-Emission lässt auf eine unvollständige Verbrennung schließen. Dies lässt sich hauptsächlich durch das Feuerungssystem positiv beeinflussen. Eine Verbesserung kann über die Wahl eines anderen Systems oder über die Optimierung des bestehenden Systems erfolgen. Die CO-Werte von Pferdemist TFZ und Stroh TLL wurden auf Vorschubrostfeuerungen erzielt. Diese Feuerungstechnik scheint sich für halmgutartige Biomassen gut zu eignen. Bei Traubentrester funktioniert diese Technik nicht zufriedenstellend. Die vorgeschriebenen Grenzwerte konnten nur bei den Versuchen des TFZ mit Pferdemist auf einem Vorschubrost eingehalten werden.

Die Ergebnisse zeigen deutlich die negative Auswirkung der Zugabe von mineralischen Zuschlagstoffen zu Pferdemist auf die Qualität der Verbrennung. Die mechanische Entwässerung verbessert diese hingegen. Dies ist mit dem Absenken der mineralischen Bestandteile durch das Auspressen zu erklären.

Die Stickoxidemissionen sind in Abbildung 94 dargestellt.

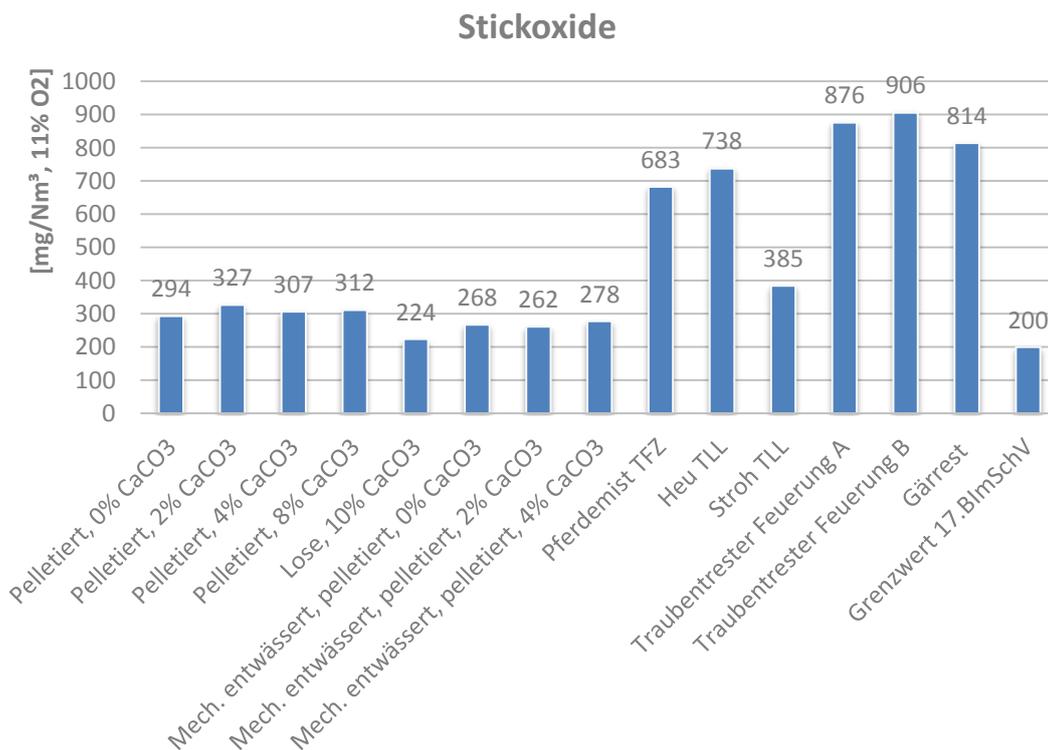


Abbildung 94: Vergleich der Stickoxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [24], [95], [98], [99], [100], [70].

Da keine der in den dargestellten Studien eingesetzten Feuerungen eine Brennraumtemperatur von über 1400 °C erreicht, ist die Stickoxidkonzentration hauptsächlich von dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff abhängig. Die im Vergleich niedrigen Stickstoffgehalte der eingesetzten Pferdemistproben und der Strohcharge spiegeln sich in den Stickoxid-Emissionen wieder.

Verwunderlich ist der hohe Wert der Messfahrt des TFZ mit Pferdemist. Die Werte der Elementargehalte lassen hier einen geringeren Wert erwarten. Die verfügbaren

Daten der Versuchsreihen lassen keine weiteren Schlussfolgerungen auf die Gründe für diesen Sachverhalt zu.

Die Ergebnisse der Traubentresterchargen stützen die Aussage des geringen Einflusses des Feuerungssystems auf die Stickoxid-Emissionen. Bei keiner der aufgeführten Messfahrten konnten die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden.

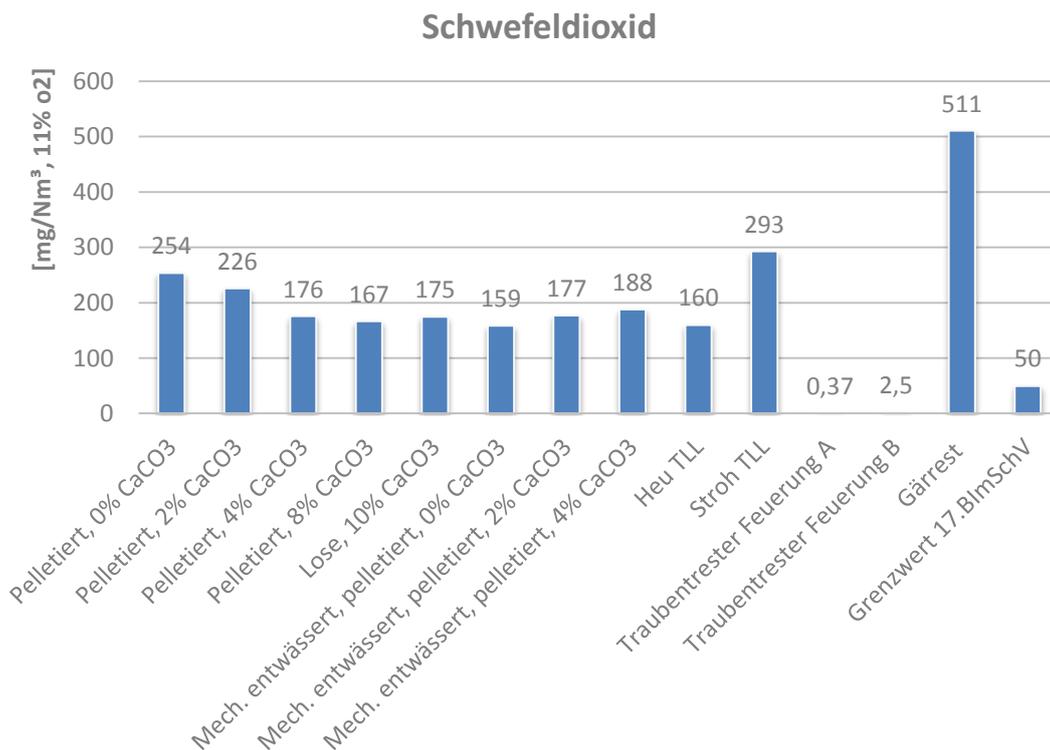


Abbildung 95: Vergleich der Schwefeldioxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemit mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [95], [98], [99], [100], [70].

Die in Abbildung 95 aufgeführten Ergebnisse der Schwefeldioxid-Messung zeigen einige Auffälligkeiten. Der Einfluss der Zugabe von Kalk bei den untersuchten Pferdemitproben ist gering. Der niedrige Schwefelgehalt der mechanisch entwässerten Proben wirkt sich nicht auf die Schwefeldioxid-Emission aus. Die Werte für die Schwefeldioxid-Emissionen bei den Versuchen mit Traubentrester sind sehr gering.

Aufgrund der Elementaranalysen und dem Sachverhalt, dass die SO₂-Emissionen maßgeblich von dem Schwefelgehalt im Brennstoff abhängen waren, die Ergebnisse so nicht zu erwarten [29], [99]. Eine mögliche Erklärung liefert [109]. Hiernach

werden bei Stroh lediglich 40 – 55 % des Schwefels in die im Kessel verbleibende Asche eingebunden. Bei Hackschnitzel sind es hingegen bis zu 70 %. Ausschlaggebend hierfür ist der Calciumgehalt. Der in Abbildung 80 dargestellte niedrige Calciumgehalt spricht damit für eine geringe Schwefel-Einbindung in die Asche. Dies hat eine hohe SO_2 -Konzentration im Rauchgas zur Folge. Dies wiederum begünstigt die Sulfatisierung von Erdalkali- und Alkalichloriden. Diese neigen zum Niederschlag auf Feinstaubpartikeln und werden mit diesen ausgetragen. Dadurch sinkt die Konzentration der gasförmigen Schwefeldioxid-Emissionen [110]. Dies deckt sich mit min Abbildung 99 dargestellten Vergleich der Staub-Emissionen. Sind niedrige SO_2 -Emissionen vorhanden, ist eine hohe Staubemission zu erkennen.

Abbildung 96 zeigt die Chlorwasserstoffemissionen von Pferdemist im Vergleich mit Heu, Traubentrester und Gärrest.

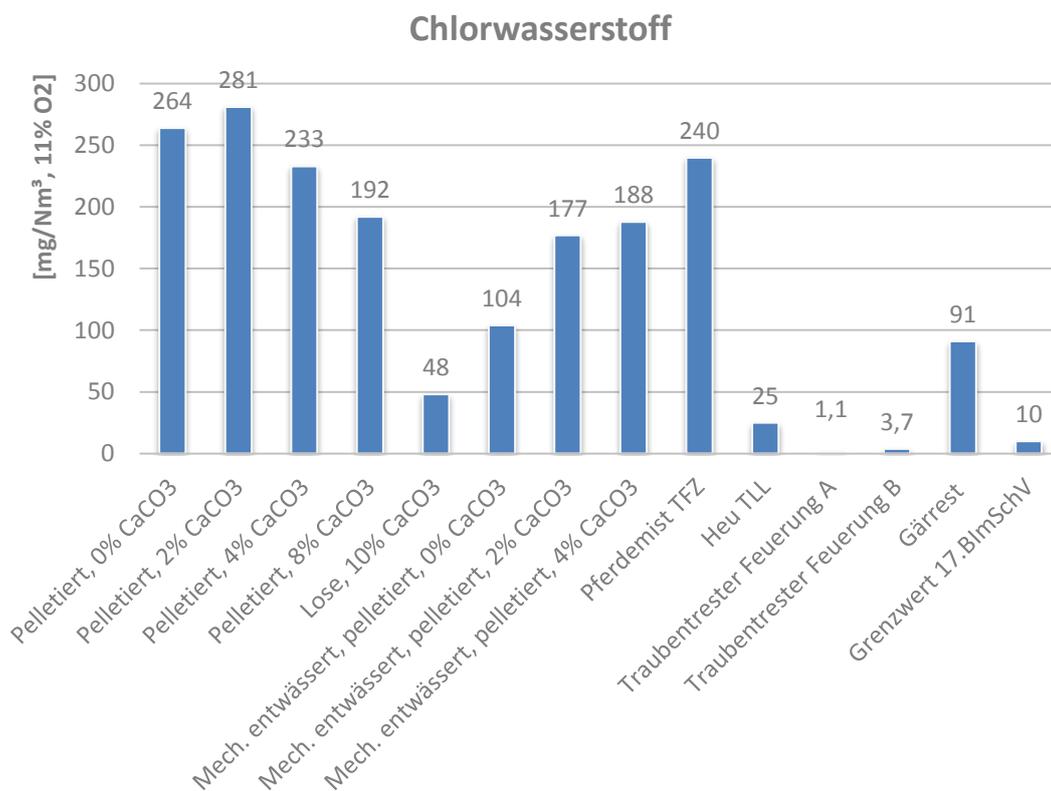


Abbildung 96: Vergleich der Chlorwasserstoffemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm^3 , 11 % O_2 , [24], [95], [98], [99], [100], [70].

Die Werte für Chlorwasserstoff entsprechen den Erwartungen aufgrund der brennstoffspezifischen Zusammensetzungen. Dabei sind die hohen

Chlorwasserstoffkonzentrationen von Pferdemist als besonders bedenklich anzusehen. Diese Konzentrationen führen zu erheblichem Anlagenverschleiß durch Korrosion. Dies wurde bei den Messfahrten im Rahmen dieser Arbeit deutlich. Nach ca. 300 Betriebsstunden versagte das Rauchgassystem aufgrund von Korrosionsschäden.

Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen die Korrosionsschäden am Rauchgassystem.



Abbildung 97: Korrosion Rauchgassystem durch HCL-Emission.



Abbildung 98: Löcher im Rauchgassystem durch Korrosion aufgrund der HCL-Emission.

Eine verkürzte Standzeit war aufgrund des Einsatzes eines Standard V2A Systems zu erwarten. Jedoch wurde ein solch hoher Verschleiß nicht erwartet. Die hohe Konzentration an Chlorwasserstoff führt zu einer Senkung des Taupunkts der Salzsäure [111]. Und verursachte letztendlich die Korrosionsschäden.

Die Zugabe von Kalk zeigt bei der Verminderung der Chlorwasserstoff-Emissionen eine größere Wirkung als bei den Schwefeldioxid-Emissionen. Jedoch ist eine signifikante Absenkung der Emission erst ab einem sehr hohen Kalkanteil von 8 - 10 % zu beobachten.

Wie bei den Schwefeldioxid-Emissionen sind auch bei den Chlorwasserstoffen die Auswirkungen eines niedrigen Störstoffgehalts im Brennstoff geringer als erwartet. Da HCl nach [109] den selben Einflüssen unterliegt wie SO_2 oder direkt an der Sulfatisierung beteiligt ist, liegt auch hier ein Austrag über die Feinstaub-Emission bei hohen HCl-Konzentrationen nahe. Darüber hinaus deuten die massiven Korrosionsschäden auf ein Kondensieren eines Teils des HCl-Gases bei hohen Konzentrationen hin. Diese Umstände würden die HCL-Emission über das Rauchgas verringern. Die Messung würde damit einen Teil des eigentlich entstandenen Chlorwasserstoffs erfassen.

Um die gesetzlichen Grenzwerte einzuhalten, müssten Anlagen zur Verbrennung von Pferdemist, Heu und Gärrest über eine entsprechende Rauchgasaufbereitung verfügen.

Die Staubkonzentrationen im Rauchgas der verglichenen Biomassen ist in Abbildung 99 zu sehen.

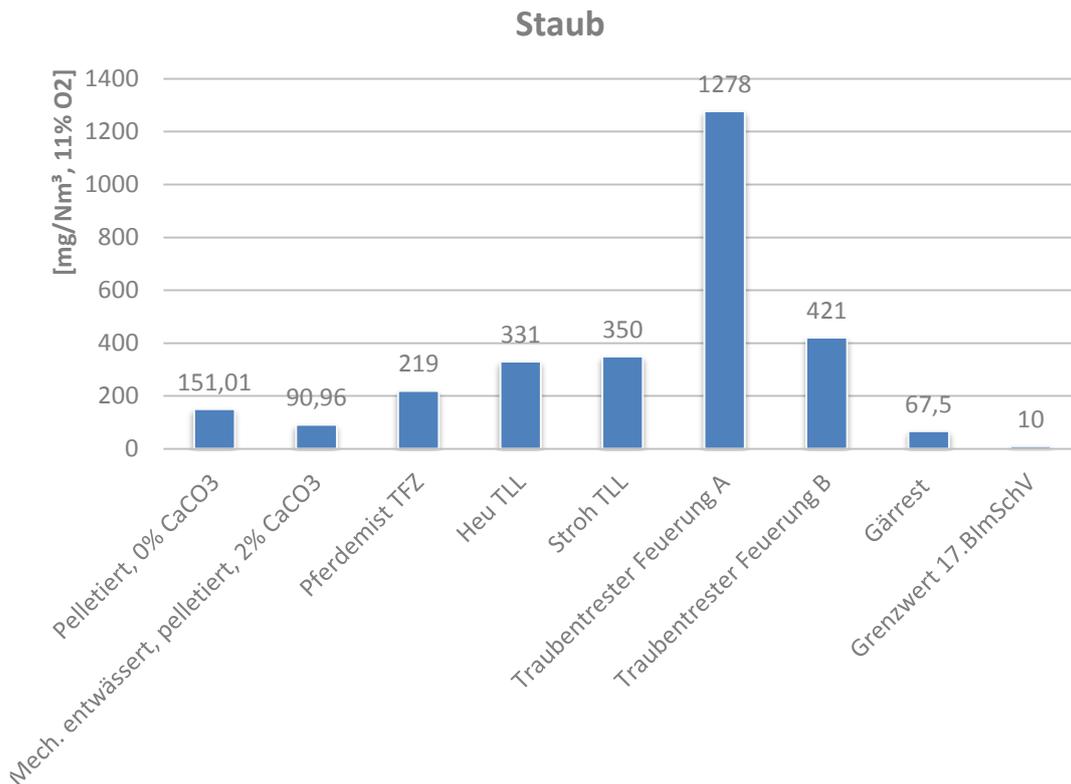


Abbildung 99: Vergleich der Staubemissionen verschiedener Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [24], [95], [98], [99], [100], [70].

Die Staubemissionen können durch ein passendes Feuerungssystem und eine entsprechende Konditionierung des Brennstoffs positiv beeinflusst werden. So konnten die Staubemissionen beim Einsatz von losem Pferdemist in dem im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Kessel nicht gemessen werden, da der Messbereich des Messsystems überschritten wurde. Wurde jedoch pelletierter Pferdemist eingesetzt, wurden im Vergleich zu anderen Biomassen durchaus positive Werte erzielt. Die mechanische Vorentwässerung brachte hier weitere leichte Verbesserungen.

Der Einfluss der Feuerung wird auch hier deutlich durch die Untersuchungen des DBFZ mit Traubentrester. Kessel B zeigt ein signifikant besseres Ergebnis als Kessel A.

Keine der aufgeführten Biomassen kann die Grenzwerte einhalten. Auch hier müssten Maßnahmen zur Rauchgasaufbereitung getroffen werden.

6 Fazit und Ausblick

Das hohe Aufkommen und das Entsorgungsproblem vieler Höfe machen Pferdemist grundsätzlich zu einem interessanten Biomasseenergieträger [5], [12]. Ist der Pferdemist getrocknet, entsprechen die physikalischen und mechanischen Brennstoffeigenschaften den Anforderungen der Norm [32]. Problematisch hingegen sind die hohen Störstoffgehalte und der hohe Wassergehalt. Der hohe Wassergehalt bedingt einen sehr hohen Energieeinsatz zur Trocknung des Pferdemists. Hier stellt sich die Frage, ob eine Aufbereitung wirtschaftlich umgesetzt werden kann. Kann für die Entsorgung des Pferdemists eine Gebühr erhoben werden, könnte die thermische Verwertung von Pferdemist ökonomisch sinnvoll sein.

Die Störstoffgehalte können durch eine einfache mechanische Aufbereitung signifikant abgesenkt werden. Die Restgehalte sind jedoch immer noch zu hoch um den Brennstoff ohne Rauchgasaufbereitung einsetzen zu können. Die gesetzlichen Grenzwerte der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung können zum Großteil ohne weitere Rauchgasbehandlung nicht eingehalten werden. So liegt der Wert des im Abgas enthaltenen Chlorwasserstoffs um das 25-fache über dem erlaubten Grenzwert. Dies bedingt eine aufwendige Rauchgasaufbereitung. Die Zugabe von Kalk beeinflusste das Emissionsverhalten zwar weiter positiv konnte aber das Problem der Grenzwertüberschreitung der umweltschädlichen Emissionen nicht vollständig lösen. Nach [112] sind zufriedenstellende Emissionsminderungsraten bei der Trocken - Absorption nur bei einer Wirbelschichtfeuerung zu erzielen. Demnach führen selbst hohe stöchiometrische Überschüsse an Kalk nur zu geringen Emissionsminderungsgraden. Wirksamer ist hier das Eindüsen einer Kalklösung in das Rauchgas. Dies stellt jedoch eine wesentlich aufwendigere und kostenintensivere Variante dar. Gleiches gilt für die Staubemissionen. Auch hier konnte zwar eine signifikante Verbesserung der Partikelemission durch das mechanische Aufbereitungsverfahren erreicht werden, jedoch wurden die Grenzwerte immer noch deutlich überschritten. Eine Entstaubung des Rauchgases wäre hier weiter unumgänglich.

Die benötigten Verfahren zur Rauchgasaufbereitung sind auf dem Markt verfügbar und technisch erprobt. Sie werden seit Jahrzehnten in der Kraftwerkstechnik eingesetzt. Die Anschaffung und die Instandhaltung dieser Anlagen bringen allerdings einen hohen finanziellen Aufwand mit sich. Dies ist bei einer Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Einsatz von Pferdemit als Brennstoff zu berücksichtigen. Als weitere Folge der hohen Schadstoffbelastung sind Korrosionsschäden in den rauchgasführenden Anlagenkomponenten der Kraftwerke zu erwarten [113]. Diesen ist wiederum mit kostenintensiven Maßnahmen entgegenzuwirken [114]. Damit ist eine technische Umsetzung der Verbrennung von Pferdemit machbar, jedoch die Wirtschaftlichkeit fraglich. Ist die Wirtschaftlichkeit gegeben, bietet Pferdemit ein hohes Potenzial die bisher eingesetzten Energieträger sinnvoll zu ergänzen. Dies bezieht sich jedoch nur auf Kraftwerke. Der Einsatz von Pferdemit in Kleinfeuerungsanlagen ist durch die gesetzliche Einstufung von Pferdemit nicht möglich, da diese nur eine Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen vorsieht. Darüber hinaus sind die umfangreichen Maßnahmen zur Emissions- und Korrosionsminderung in einem kleinen Leistungsbereich ökonomisch nicht sinnvoll.

Auf Grundlage der in dieser Arbeit erarbeiteten und in Kapitel 4 und 5 dargestellten Erkenntnisse und Daten ergeben sich Fragestellungen, welche weiterer Untersuchungen bedürfen.

So erscheint es sinnvoll den Einfluss verschiedener Feuerungssysteme auf die Emissionen bei der Verbrennung von Pferdemit zu untersuchen. Die Ergebnisse anderer Studien zeigen bei den dort eingesetzten Brennstoffen einen deutlichen Einfluss der Feuerungstechnik. Eine Wirbelschichtfeuerung welche in keiner der oben aufgeführten Studien eingesetzt wurde, könnte hier eine weitere interessante Alternative sein. Diese könnte weitere positive Effekte auf die Emissionsbildung haben [29].

Im Bereich der mechanischen Aufbereitung würden Untersuchungen mit einer Schneckenpresse im industriellen Maßstab weitere Erkenntnisse über den Energiebedarf für das mechanische Entwässern bringen. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Presse liefert hier lediglich erste Anhaltspunkte.

Die beim mechanischen Entwässern und der Verbrennung anfallenden Reststoffe Presssaft und Asche, bedürfen einer fachgerechten Entsorgung. Hier würde die Kenntnis über die Zusammensetzung der Reststoffe Überlegungen zur weiteren Verwertung oder notwendigen Entsorgung ermöglichen. Bei der Asche ist eine Verwertung als Dünger denkbar. Der Presssaft könnte darüber hinaus auch als Gärsubstrat für Biogasanlagen in Frage kommen.

Die Rauchgasanalyse sollte auf das Erfassen von Dioxinen (PCDD/PCDF) ausgeweitet werden. Hier könnten zusätzliche Rauchgasaufbereitungsmaßnahmen erforderlich sein. Der hohe Chlorgehalt könnte eine Dioxinbildung begünstigen.

Sind diese Fragestellungen geklärt, ist die wirtschaftliche Machbarkeit zu prüfen.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt Aufschluss über die Einsatzmöglichkeit von Pferdemist als Energieträger zur thermischen Verwertung. Dabei wurde nicht nur die Eignung des Rohmists untersucht, sondern auch der Ansatz, die Brennstoffeigenschaften durch ein einfaches mechanisches Aufbereitungsverfahren zu verbessern. Dieses Verfahren besteht aus Zerkleinerung, mechanischer Entwässerung, thermischer Trocknung und Pelletierung des Pferdemists. Darüber hinaus wurde die Zugabe von Kalk (CaCO_3) zur Emissionsminderung und Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur untersucht. Um die Auswirkungen der Aufbereitung und der Zugabe von Kalk zu quantifizieren wurden die Probenchargen zum Einen Laboranalysen unterzogen und zum Anderen auf einem Feuerungsversuchsstand mit einer thermischen Leistung von 100 kW verbrannt. Bei den Laboranalysen wurden Elementarzusammensetzung, Anteil an Spurenelementen, Brennwert, Ascheerweichungstemperatur, Aschegehalt, flüchtige Bestandteile und Wassergehalt gemessen. Auf dem Feuerungsversuchsstand wurden Emissionsverhalten, Verschlackung und Ascheanfall untersucht. Die Anlage zur Aufbereitung des Pferdemists wurde im industrienahen Maßstab aufgebaut und lieferte somit Daten, welche direkt für einen möglichen Industrieprozess angewendet werden können. So konnte der Energiebedarf für die Produktion mechanisch aufbereiteter Pferdemistpellets bestimmt und mit dem Produktionsprozess von Holzpellets verglichen werden.

Der Vergleich der auf der Forschungsanlage hergestellten Holz- und Pferdemistpellets zeigt einen erhöhten Energiebedarf für die Produktion von Pferdemistpellets. Der Grund hierfür liegt in dem deutlich höheren durchschnittlichen Wassergehalt von Pferdemist (66 %) im Vergleich zu Sägespänen (55 %) [52]. Daraus resultiert ein wesentlich höherer Bedarf an thermischer Energie für den Prozessschritt der Trocknung. Durch eine Vorzerkleinerung konnte eine signifikante Effizienzsteigerung des Trocknungsprozesses erreicht werden. Hier konnte der Bedarf an thermischer Energie um 46 % gesenkt werden.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den in der Arbeit aufgeführten und zusammengetragenen Vorarbeiten und Vergleichsstudien sowie umfangreichen Vorversuchen und Laboranalysen, wurde ein besonderes Augenmerk auf das Absenken der Gehalte von Chlor (Cl), Schwefel (S), Stickstoff (N) und Kalium (K) gelegt. Diese Störstoffe bereiten bei der Verbrennung Probleme bezüglich der Entstehung umweltschädlicher Emissionen und der Absenkung der Ascheerweichungstemperatur [21], [22], [24], [27].

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Absenkung der Störstoffgehalte sind durchweg positiv. Hier konnten mit der einfachen mechanischen Entwässerung hohe Absenkungsraten erreicht werden. Der Chlorgehalt (Massenanteil) konnte so um 77 %, der Schwefelgehalt um 38 %, der Stickstoffgehalt um 50 % und der Kaliumgehalt um 49 % gesenkt werden. Zusätzlich wurde durch das Entwässern die Staubemission reduziert. Ohne mechanische Entwässerung lag die Staubemission bei 151 mg/Nm³ bei vorgeschalteter mechanischer Entwässerung bei 91 mg/Nm³.

Der Einsatz von Calciumcarbonat brachte nur bei hohen Anteilen von 8 – 10 % eine deutliche Verbesserung der Emissionswerte. Hier konnte hauptsächlich die Chlorwasserstoff-Emission positiv beeinflusst werden. Der Heizwert wurde weder von der mechanischen Entwässerung noch durch die Zugabe von Kalk wesentlich beeinflusst. Die Hauptversuche zeigten jedoch einen in Bezug auf die in den Vergleichsstudien [24], [27], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100] dargestellten Biomassen geringeren Heizwert von durchschnittlich 15,2 MJ/kg.

Bei der Verbrennung deuteten hohe Kohlenmonoxid-Werte auf eine unvollständige Verbrennung hin. Dies konnte für die Verbrennung von pelletiertem Pferdemist im Laufe der Messfahrten, durch Anpassung der Verbrennungsparameter verbessert werden. Die hohe Qualität der Verbrennung der Vergleichsstudie des TFZ [24], in der eine Feuerung mit Vorschubrost zum Einsatz kam, konnte jedoch nicht erreicht werden. Dies deutet darauf hin, dass das gewählte Feuerungssystem mit Aschekette für diesen Brennstoff nicht ideal geeignet ist. Eine Wirbelschichtfeuerung könnte hier einer Verbesserung bringen. Aufbauend auf den hier erzielten Ergebnissen sollte weitergehend untersucht werden, welche Auswirkungen alternative Feuerungssysteme auf die Verbrennungsqualität und die Emissionsbildung haben.

Eine Verbrennung in Kleinf Feuerungsanlagen für den Hausgebrauch ist Aufgrund der momentanen gesetzlichen Einstufung von Pferdemist als Abfall nicht erlaubt.

Trotz der Aufbereitungsmaßnahmen konnten die zulässigen Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV [70] nicht eingehalten werden. Ein Einsatz in Biomassekraftwerken könnte aufgrund der hohen Verfügbarkeit unter Einsatz einer zusätzlichen Rauchgasaufbereitung aber durchaus interessant sein.

8 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Durchschnittliche Substratzusammensetzung 2012 für Biogasanlagen [15]	10
Abbildung 2:	Methanerträge verschiedener Substrate, in Nm ³ /t oTS [17], [18], [19].	11
Abbildung 3:	Heizwert von Holz in MJ/kg in Bezug auf den Wassergehalt in %	18
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des florafuel - Verfahrens. [39].....	27
Abbildung 5:	Ablaufdiagramm Scheffler - Verfahren [40].....	28
Abbildung 6:	Vereinfachtes Verfahrensflißbild NMT - Verfahren [41].....	29
Abbildung 7:	Beispiel für den Aufbau einer Pelletierlinie mit einer Ringmatrizenpresse [46].....	32
Abbildung 8:	Energieaufwand zur Trocknung von einer Tonne Sägespäne in Abhängigkeit des Eingangswassergehalts und Trocknung auf 12 % Ausgangswassergehalt. Angaben bezogen auf die Produktion einer Tonne trockenen Materials bei Sommerbetrieb und 10 °C Umgebungstemperatur.	35
Abbildung 9:	Energiebedarf für die Produktion einer Tonne Pellets bei einem Eingangswassergehalt von 55% [50] [52].....	43
Abbildung 10:	Anteile der für die Produktionsschritte eingesetzten und der verbleibenden Nutzbaren Energie von Holzpellets bei einem Eingangswassergehalt von 55% [50], [52].....	44
Abbildung 11:	Vergleich des Energiebedarfs in kWh für die Produktion von einer Tonne Holzpellets bei 55 % und 45 % Eingangswassergehalt [50], [52].	44
Abbildung 12:	Verhältnis der nutzbaren zur für die Produktion benötigten Energie für Holzpellets bei 55 % und 45 % Eingangswassergehalt bei einem Energieinhalt der Pellets von 4900 kWh/to [50], [52].	45
Abbildung 13:	Ablauf des Verbrennungsprozesses [29].....	49
Abbildung 14:	Ascheerweichungstemperaturen verschiedener Biomassebrennstoffe in °C [29], [54].	68

Abbildung 15:	Fließschema Pelletierlinie FH-Rosenheim.....	74
Abbildung 16:	Pelletierlinie der Hochschule Rosenheim.....	75
Abbildung 17:	Schneckenpresse zur mechanischen Entwässerung des Pferdemists.....	76
Abbildung 18:	Verunreinigung durch einen Stein.....	77
Abbildung 19:	Verunreinigung durch einen Ast.....	77
Abbildung 20:	Verunreinigung durch groben Sand.	77
Abbildung 21:	Konfiguration des eingesetzten Gartenhäckslers im Auslieferungszustand [74].	78
Abbildung 22:	Modifizierter Gartenhäckslers mit Räumern unter dem Kombimesser und ausgebauter Längenbegrenzungsscheibe.	78
Abbildung 23:	Frischer Rohmist bei der Anlieferung.....	79
Abbildung 24:	Mist nach der Vorzerkleinerung.	79
Abbildung 25:	Funktionsprinzip der eingesetzten Schneckenpresse [75].	80
Abbildung 26:	Aufbau und Funktion eines Niedertemperaturbandrockners [76].	80
Abbildung 27:	CAD-Modell des eingesetzten Bandrockners [77].	81
Abbildung 28:	Beispiel für den eingesetzten Hammermühlen Typ [78].	82
Abbildung 29:	Funktionsprinzip einer Ringmatrizenpresse [29].	83
Abbildung 30:	Schema der eingesetzten Pelletierung mit Kühlung und Rückführung des Feinanteils.	84
Abbildung 31:	Funktionsschema des eingesetzten Feuerungssystems [81].	86
Abbildung 32:	Beispiel für ein Absorptionsspektrum.	88
Abbildung 33:	Beispiel für eine quantitativen Mehrkomponentenanalyse von Calcmet [82].	89
Abbildung 34:	Rauchgasmesssystem der Hochschule Rosenheim mit FT-IR.	90
Abbildung 35:	Messprinzip FW 100 der Firma Sick [83].	92
Abbildung 36:	Thermischer Energiebedarf in kWh für die Verdampfung pro kg Wasser bei der thermischen Trocknung von Pferdemist beim Einsatz von unterschiedlichen Aufgabesystemen und Vorzerkleinerung.	100

Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der in den Laboren der Technischen Universität München und der Hochschule Rosenheim gemessenen Wassergehalte, n=204.....	105
Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Stickstoffgehalte, n=123.	106
Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Schwefelgehalte, n=123.....	107
Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Rohrdorfer Zementwerke Gebr. Wiesböck GmbH gemessenen Chlorgehalte, n=31.	108
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Kaliumgehalte, n=221.	109
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Calciumgehalte, n=225.....	110
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der im Labor der Technischen Universität München gemessenen Magnesiumgehalte, n=216.	111
Abbildung 44: In Vorversuchen ermittelte Aschegehalte der eingesetzten Probenchargen unter Labor- bzw. praxisnahen Bedingungen [93].....	112
Abbildung 45: Anteil der flüchtigen Bestandteile der untersuchten Probenchargen in Masse-%, atro.	113
Abbildung 46: Heizwert H_i der untersuchten Probechargen in MJ/kg, atro.	114
Abbildung 47: Aschegehalte der untersuchten Probechargen unter Labor und Versuchsstand in Masse-%, atro.	115
Abbildung 48: Laborergebnisse für die Ascheerweichungstemperaturen für die untersuchten Probenchargen in °C.	116
Abbildung 49: Kohlenstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.....	117
Abbildung 50: Wasserstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.....	118
Abbildung 51: Sauerstoffgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.....	119
Abbildung 52: Calciumgehalte der der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.....	120

Abbildung 53:	Kaliumgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.	121
Abbildung 54:	Magnesiumgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.	122
Abbildung 55:	Stickstoffgehalte der untersuchten Probechargen in Masse-%, atro.	123
Abbildung 56:	Schwefelgehalte der untersuchten Probenchargen in Masse-%, atro.	124
Abbildung 57:	Chlorgehalte der untersuchten Probenchargen in Masse-%, atro.	125
Abbildung 58:	Wassergehalte der untersuchten Probenchargen in Massen-%, atro.	126
Abbildung 59:	Zinkgehalte der untersuchten Probenchargen in mg/kg, atro.	127
Abbildung 60:	Quecksilbergehalte der untersuchten Probenchargen in mg/kg, atro.	128
Abbildung 61:	Chromgehalte der untersuchten Probenchargen in mg/kg, atro, die Werte der nicht dargestellten Probenchargen lagen unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens.	129
Abbildung 62:	Kupfergehalte der untersuchten Probenchargen in mg/kg, atro, die Werte der nicht dargestellten Probenchargen lagen unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens.	130
Abbildung 63:	Bei Feuerungsversuchstand ermittelte CO-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m ³ , atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	131
Abbildung 64:	Am Feuerungsversuchstand ermittelte SO ₂ -Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m ³ , atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	132
Abbildung 65:	Am Feuerungsversuchstand ermittelte NO _x -Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m ³ , atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	133

Abbildung 66:	Am Feuerungsversuchsstand ermittelte HCl-Emissionen bei der Verbrennung der Pferdemit-Probechargen in g/m^3 , atro [54]. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.....	134
Abbildung 67:	Ergebnisse der Hauptversuche für die CO-Emissionen bei der Verbrennung der Probenchargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	135
Abbildung 68:	Ergebnisse der Hauptversuche für die SO ₂ -Emissionen bei der Verbrennung der Probenchargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	136
Abbildung 69:	Ergebnisse der Hauptversuche für die HCl-Emissionen bei der Verbrennung der Probenchargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	137
Abbildung 70:	Ergebnisse der Hauptversuche für die NO _x -Emissionen bei der Verbrennung der Probenchargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	138
Abbildung 71:	Ergebnisse der Hauptversuche für die NH ₃ -Emissionen bei der Verbrennung der Probenchargen auf dem Feuerungsversuchsstand in g/m^3 , atro. Die Striche kennzeichnen den Wertebereich Min – Max, die Punkte den Durchschnittswert.	139
Abbildung 72:	Staubemission bei der Verbrennung von mechanisch entwässertem, pelletiertem Pferdemit mit 2 % Additiv (CaCO ₃) und pelletiertem Pferdemit mit 0 % Additiv in mg/m^3	140
Abbildung 73:	Absenkung der für die Verbrennung relevanten Störstoffe Cl, S, N und K für Pferdemit mittels mechanischer Entwässerung durch Hand- und Schneckenpresse und für Laub und Gras mittels florafuel-Verfahren in %, bezogen auf den jeweiligen Ausgangsgehalt des jeweiligen Rohmaterials, atro [94].	142

Abbildung 74:	Absolute Absenkung von Cl, S, N, K für Pferdemist durch mechanisches Entwässern mit einer Hand- und Schneckenpresse, sowie von Laub und Grasschnitt durch das florafuel-Verfahren in mg/kg, TS [94].	143
Abbildung 75:	Ausgangsgehalte der Störstoffgehalte Cl, S, N und K von Pferdemist, Laub und Gras in mg/kg, TS [94].	144
Abbildung 76:	Thermischer Energiebedarf für die Trocknung von rohem Pferdemist vorzerkleinertem Pferdemist, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemist, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh/to Produkt am Trocknerausgang bei einem Ausgangswassergehalt von 11 %. ...	146
Abbildung 77:	Elektrischer Energiebedarf für die Produktion einer Tonne Pellets aus rohem Pferdemist, vorzerkleinertem Pferdemist, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemist, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh.....	148
Abbildung 78:	Gesamtenergiebedarfe für die Produktion einer Tonne Pellets aus rohem Pferdemist, vorzerkleinertem Pferdemist, vorzerkleinertem und mech. entwässertem Pferdemist, Sägespänen mit den Werten nach [52] und Sägespänen mit den an der Versuchsanlage erzielten Werten in kWh.....	149
Abbildung 79:	Aufteilung der in den Pellets enthaltenen Energie in die Anteile für die Produktion benötigte thermische und elektrische Energie und der verbleibende energetische Nutzen in %.....	150
Abbildung 80:	Vergleich der Calciumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [97], [99], [100].	153
Abbildung 81:	Vergleich der Kaliumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [95], [97], [99], [100].	154
Abbildung 82:	Vergleich der Magnesiumgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [97], [99], [100].	155
Abbildung 83:	Vergleich der Kohlenstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].	156

Abbildung 84: Vergleich der Wasserstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].....	157
Abbildung 85: Vergleich der Sauerstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [95], [96], [97], [99], [100].....	158
Abbildung 86: Vergleich der Stickstoffgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].....	159
Abbildung 87: Vergleich der Schwefelgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].....	160
Abbildung 88: Vergleich der Chlorgehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-%, TS, [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].....	161
Abbildung 89: Vergleich der Wassergehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-% [27], [96], [94], [98] [99], [100].	163
Abbildung 90: Vergleich der Heizwerte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen [27], [95] [96], [94], [97], [99], [100].	165
Abbildung 91: Vergleich der Aschegehalte von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in Massen-% [24], [27], [95], [96], [94], [98], [97], [99], [100].....	167
Abbildung 92: Vergleich der Ascheerweichungstemperaturen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in °C [95], [98], [97], [99], [100].	168
Abbildung 93: Vergleich der Kohlenmonoxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm ³ , 11 % O ₂ , [24], [95], [98], [99], [100], [70].	170
Abbildung 94: Vergleich der Stickoxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm ³ , 11 % O ₂ , [24], [95], [98], [99], [100], [70].	171
Abbildung 95: Vergleich der Schwefeldioxidemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm ³ , 11 % O ₂ , [95], [98], [99], [100], [70].....	172

Abbildung 96: Vergleich der Chlorwasserstoffemissionen von unterschiedlich aufbereitetem Pferdemist mit verschiedenen Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [24], [95], [98], [99], [100], [70].173

Abbildung 97: Korrosion Rauchgassystem durch HCL-Emission.174

Abbildung 98: Löcher im Rauchgassystem durch Korrosion aufgrund der HCL-Emission.174

Abbildung 99: Vergleich der Staubemissionen verschiedener Biomassen in mg/Nm³, 11 % O₂, [24], [95], [98], [99], [100], [70].175

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Pferdebestandszahlen in den Bundesländern und in Deutschland nach telefonischer Auskunft der Tierseuchenkassen, Stand 2015.....	6
Tabelle 2:	Auszug Nährstoffgehalte organischer Dünger zum Zeitpunkt der Ausbringung [13]	8
Tabelle 3:	Brennstoffeigenschaften von Pferdemist	14
Tabelle 4:	Emissionswerte bei der Pferdemistverbrennung.	14
Tabelle 5:	Brennstofftechnische Eigenschaften und ihre Auswirkungen [29].	16
Tabelle 6:	Physikalisch - mechanische Eigenschaften [29].	20
Tabelle 7:	Die wichtigsten Brennstoffelemente und deren Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften [29].	22
Tabelle 8:	Typische Elementgehalte von Biomasse-Brennstoffen im Vergleich zu Steinkohle [29]. Angaben in % der Trockenmasse.	25
Tabelle 9:	Absenkung der Störstoffgehalte durch den Einsatz des florafuel - Verfahrens [38].	26
Tabelle 10:	Physikalische Anforderungen an Brennstoffpellets nach Norm [43], [32].	33
Tabelle 11:	Grenzwerte für Haupt- und Spurenelemente nach Norm [43], [32].	34
Tabelle 12:	Ergebnisse der Ascheschmelzversuche von Pferdemist mit unterschiedlichen Anteilen CaCO_3 zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens [54].	47
Tabelle 13:	Reaktionen in der Vergasungsstufe [29].	51
Tabelle 14:	Reaktionen in der Oxidationsstufe [29].	52
Tabelle 15:	Auszug der wichtigsten Emissionen, deren Auswirkung auf die Umwelt und durch was sie beeinflusst werden [55].	54
Tabelle 16:	Die drei Arten der Entstehung von Stickoxiden und ihre Haupteinflussgrößen [55].	55
Tabelle 17:	Dichten der wesentlichen Rauchgasbestandteile [58].	63

Tabelle 18: Ascheerweichungstemperaturen verschiedener Biomassebrennstoffe in °C [29], [54].	68
Tabelle 19: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für Anlagen mit weniger als 50 MW Feuerungswärmeleistung [70].	70
Tabelle 20: Eingesetzte Sensoren zur Temperaturmessung bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage.....	95
Tabelle 21: Eingesetzte Sensoren und Verfahren zur Bestimmung von Wassergehalt und Feuchte bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage und im Versuchslabor.	95
Tabelle 22: Eingesetzte Sensoren und Verfahren zur Bestimmung von Luftgeschwindigkeit, Aschegehalt und -erweichung und Heizwert bei den Messfahrten auf der Forschungsanlage und im Versuchslabor.	95
Tabelle 23: Störstoffanteile mit und ohne mechanisches Auspressen (atro, Durchschnittswerte) [92].	98
Tabelle 24: Durchschnittliche physikalische Eigenschaften der erzeugten Pferdemitpellets im Vergleich mit Normwerten [43], [32]......	101
Tabelle 25: Benötigter Energieeinsatz für die Produktion von Pferdemitpellets und Holzpellets auf der Forschungsanlage in kWh/to, im Vergleich zu den Literaturwerten von [52]......	103
Tabelle 26: Durchschnittswerte der Vorversuche für die Elementarzusammensetzung von Pferdemit [93]......	104
Tabelle 27: In den Vorversuchen ermittelte durchschnittliche Werte für Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt und Ascherweichungstemperatur [54].	104
Tabelle 28: Vergleich Störstoffgehalte vor und nach dem mechanischen Entwässern im Vergleich mit den in der Norm festgelegten Grenzwerten für nicht holzartige Biomasse in Masse-%, TS [32]......	145

10 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), „Energiestudie 2025 - Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energiestoffen,“ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2015.
- [2] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), „Basisdaten Bioenergie,“ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), August 2016. [Online]. Available: <http://www.fnr.de/basisdaten/bioenergie/bioenergie.html>. [Zugriff am 19 Oktober 2016].
- [3] C.A.R.M.E.N. e.V., „Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln - der Energieholz-Index,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte/226-preisentwicklung-bei-waldhackschnitzeln-der-energieholz-index>. [Zugriff am 6 10 2016].
- [4] J. Ponitka, V. Lenz und D. Thrän, „Energetische Holznutzung,“ in *Forschungs Report - Internationales Jahr der Wälder 2011*, Berlin, Senat Bundesforschung-Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011, pp. 20 - 23.
- [5] U. Geuder, „Wohin mit dem Pferdemit? Ein Blick auf Mengen, Qualitäten und Absatzwege,“ in *Unendlich statt unwägbare - erneuerbare Energien für die Zukunft. Tagungsband, 19. C.A.R.M.E.N.-Symposium, 11. und 12. Juli 2011, Straubing*, Straubing, 2011.
- [6] E. Boll, *Pferdemist als Wirtschaftsdünger*, Futterkamp: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 2011.
- [7] Statistisches Bundesamt, „Rund 150 000 Ziegen und 460 000 Einhufer in Deutschland,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundTierischeErzeugung/AktuellSonstigeNutztiere.html>. [Zugriff am 14 10 2015].
- [8] Bayerische Tierseuchenkasse, *Satzung der Bayerischen Tierseuchenkasse (Anstaltssatzung)*, 2014.
- [9] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetz zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen (Tiergesundheitsgesetz - TierGesG)*, Juris gmbH, 2015.

- [10] Kaiser, Interviewee, *Pferdebestandszahlen Bayern*. [Interview]. 14 Oktober 2015.
- [11] J. Raupp und M. Elsässer, *Düngewirksamkeit von Pferdemist*, Gomadingen-Marbach: Kompetenzzentrum Pferd Baden-Württemberg, 2011.
- [12] C. Uhl, „Businessplan: "Biomassepellets aus Pferdemist",“ Rosenheim, 2009.
- [13] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, „Nährstoffgehalte organischer Dünger zum Zeitpunkt der Ausbringung,“ Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Freising, 2013.
- [14] D. L. F. M. T. P. M. S. Anke Döpke, *Umwelt Bundesamt Presseinformation Nr. 55/2008*.
- [15] N. Rensberg, C. Hennig, K. Naumann, E. Billig, P. Sauter, J. Daniel_Gromke, A. Krautz, C. Weiser, G. Reinhold und T. Graf, „Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse,“ Deutsches BiomasseForschungszentrum gemeinützige GmbH, Leipzig, 2012.
- [16] R. Diermann, „Pferdemist in Biogasanlagen,“ VDI Nachrichten, Düsseldorf, 2013.
- [17] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), „Leitfaden Biogas Von der Gewinnung zur Nutzung,“ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 2013.
- [18] H. Oechsner, M. Mönch-Tegeder und J. Frey, „Endbericht- Weiterentwicklung von Technologien zur effizienten Nutzung von Pferdemist als biogener Reststoff und Test im Praxisbetrieb,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2014.
- [19] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, „Ökonomik regenerative Energie,“ 5 10 2016. [Online]. Available: http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=51%2C&anker0=substratanker#substratanker. [Zugriff am 5 10 2016].
- [20] Bioflamme GmbH, „Feuchte Biomasse (Mist),“ 2015. [Online]. Available: http://www.bioflamme.de/produkte/biomasse-heizung/feuchte_biomasse_mist.html. [Zugriff am 5 10 2016].
- [21] A. Rubick, „Pferde Revue-Praxis, Haltung&Fütterung,“ 20 12 2010. [Online]. Available: <http://www.pferderevue.at/?+Lizenz+zum+Brennen+&id=2500%2C4820974%2C%2C%2CY2Q9Nzg%3D>. [Zugriff am 5 10 2016].

- [22] R. Bühler, Hersener, Jean-Louis und A. Jenni, „Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen - Verbrennungsversuche Frühjahr 2005,“ Bundesamt für Energie, CH-Maschwanden, 2005.
- [23] P. Turowski, H. Hartmann, P. Roßmann und E. Rist, „Verfahren zur Herstellung von Sekundär-Brennstoffen aus getrockneter Biomasse und Verwendung der selben,“ Technologie und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2009.
- [24] H. Hartmann, *Pferdemistpellets in einer Kleinfeuerung, Ein Brennstoffvergleich*, Straubing: Technologie und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 2011.
- [25] A. Rubick, „Lizenz zum Brennen,“ Pferderevue, 2009.
- [26] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM S 1030: 2008 01 01. Tiereinstreu aus nachwachsenden Rohstoffen - Anforderungen, Prüfbestimmungen und Klassifizierung*, Wien: ON-Norm, 2008.
- [27] ÖKL_Arbeitskreis Energie, *Pferdemist als Brennstoff in Biomassefeuerungen. ÖKL-Merkblatt Nr. 95 1.Auflage.*, Wien: Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, 2009.
- [28] S. Kiewewalter und C. Röhrich, *Herstellung und Nutzung von Brennstoffpellets aus landwirtschaftlicher Biomasse*, Leipzig: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2006.
- [29] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Herrmann, *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte Auflage*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2016.
- [30] S. Döring, *Pellets als Energieträger, Technologie und Anwendung*, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
- [31] F. Joos, *Technische Verbrennung - Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [32] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 17225-6: Biogenne Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [33] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 17829: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.

- [34] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 18846: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an Feingut in Mengen von Pellets*, Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [35] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 15149-1: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung - Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber*, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [36] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 15103: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte*, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [37] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 17831-1: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 1: Pellets*, Berlin: Beuth Verlag, 2013.
- [38] florafuel, [Online]. Available: <http://www.florafuel.de/de/florafuel-verfahren/einsatz-in-biomassehoefen/>. [Zugriff am 16 02 2016].
- [39] florafuel, [Online]. Available: <http://www.florafuel.de/de/florafuel-verfahren/das-florafuel-verfahren/>. [Zugriff am 16 02 2016].
- [40] D.-I. J. Götz, „Verwertung Nachwachsender Rohstoffe,“ GETprojekt GmbH & Co. KG, 2016. [Online]. Available: http://www.krimmelbein-ag.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/getproject_Bioenergie_Broschue-re.pdf. [Zugriff am 17 02 2016].
- [41] EcoEnergy Gesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH, „Entwicklung eines Verfahrens sowie Bau und Erprobung einer Container-Versuchsanlage zur Nassmechanischen Trennung von Biomasse und Inertstoffen einschließlich Erarbeitung von Möglichkeiten der Inertstoffverwertung, Abschlussbericht,“ EcoEnergy Gesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH, Walkenried, 2009.
- [42] Deutsches Institut für Normung e.V., *Din EN ISO 17225-1: Biogene Festbrennstoffe-Brennstoffspezifikationen und -klassen; Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [43] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 17225-2: Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil2: Klassifizierung von Holzpellets*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [44] N. Kaliyan und R. Morey, Factors affecting strength and durability of densified biomass products, Bd. 33, St.Paul: Biomass and Bioenergy, 2009, pp. 337 - 359.

- [45] V. C. Wenghoefer, „Entwicklung einer optimierten Produktion von Miscanthus-Mischpellets für Kleinfeuerungsanlagen,“ Reihnische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 2014.
- [46] Agentur für erneuerbare Energien, „Wie werden Holzpellets hergestellt?,“ DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH, 2017. [Online]. Available: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/wie-werden-holzpellets-hergestellt>. [Zugriff am 27 Februar 2017].
- [47] R. Samuelson, S. H. Larsson, M. Thyrel und T. A. Lestander, Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets, Bd. 99, Umea: Applied Energy, 2012, pp. 109 - 115.
- [48] A. Mersmann, M. Kind und J. Stichlmair, Thermische Verfahrenstechnik - Grundlagen und Methoden., Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2005.
- [49] A. Heindl, Praxishandbuch Bandtrocknung: Grundlagen, Anwendungen, Berechnungen, Berlin: Springer Verlag, 2016.
- [50] D. Weindler, Abschlussarbeit: „Regelung der Produktfeuchte von Biomasse an einem Bandtrockner,“ Rosenheim, 2015.
- [51] W. Wagner, J. R. Cooper, A. Dittmann, J. Kijima, H.-J. Kretzschmar, A. Kruse, R. Mareš, K. Oguchi, H. Sato, I. Stöcker, O. Šifner, Y. Takaishi, I. Tanishita, J. Trübenbach und T. Willkommen, „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam,“ *J. Eng. Gas Turbines & Power* 122, pp. 150 - 182, 2000.
- [52] I. Obernberger und G. Thek, Herstellung und energetische Nutzung von Pellets, Graz: Medienfabrik Graz GmbH, 2009.
- [53] H. Hartmann, K. Reisinger, K. Thuneke, A. Höldrich und P. Roßmann, *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*, Rostock: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2007.
- [54] G. Polz, Abschlussarbeit: „Optimierung der Brennstoffeigenschaften von anspruchsvoller Biomasse durch Zuschlagstoffe,“ Rosenheim, 2014.
- [55] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link und J. Fischer, Regenerative Energietechnik, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag , 2013.
- [56] BGBl, *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)*, 2015.

- [57] R. Marutzky und K. Seeger, Energie aus Holz und anderer Biomasse, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & CO, 1999.
- [58] H. Kuchling, Taschenbuch der Physik, München: Carl Hanser Verlag , 2004.
- [59] W. Geller, Thermodynamik für Maschinenbauer, Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [60] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN CEN/TS 15370-1: Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen*, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [61] H. Hartmann, T. Böhm und L. Maier, „Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - umrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten,“ Bayerisches Staatministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), München, 2000.
- [62] J. Buzek, *Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 Des europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte*, Straßburg: Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2009.
- [63] F. N. und V. H., *Richtlinie 2000/76/EG des europäischen Parlaments und des Rates über die Verbrennung von Abfällen*, Brüssel: Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2000.
- [64] Bundesgesetzblatt , *Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [65] Bundesgesetzblatt, *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [66] Bundesgesetzblatt, *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [67] Bundesgesetzblatt, *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [68] Bundesgesetzblatt, *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.

- [69] Bundesgesetzblatt, *Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen - 13. BImSchV*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [70] Bundesgesetzblatt, *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2013.
- [71] Bundesgesetzblatt, *Gesetz zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen (Tiergesundheitsgesetz - TierGesG)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [72] Bundesgesetzblatt, *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)*, Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [73] Eveline Lemke, *Antwort des Ministeriums für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz auf die kleine Anfrage 1474 über die Klassifizierung von Biomasse aus Pferdemist als Brennstoff. (Drucksache 16/2249)*, Mainz: Landtag Rheinland-Pfalz, 2013.
- [74] VIKING GmbH, *GE 355, GE 375 Gebrauchsanleitung*, Langkampfen / Kufstein: Viking GmbH, 2016.
- [75] T. von Bothmer, „Hochmoderne Rejektentwässerungsanlage zur Herstellung von Ersatzbrennstoff (EBS),“ *Papier + Technik*, 7 Februar 2011.
- [76] Stela Laxhuber GmbH, „Funktionsweise Niedertemperaturbandtrockner,“ Stela Laxhuber GmbH, Massing, 2012.
- [77] C. Uhl, „Entwicklung und Konstruktion eines Versuchsbandtrockners,“ Rosenheim, 2012.
- [78] East European Trade GmbH, „Pelletieren, Holz, Linie Pelletieren, 350 kg,“ [Online]. Available: <http://www.energiebio.de/pelletieren/pelletierenholzlinie350kg.html>. [Zugriff am 21 Oktober 2016].
- [79] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 14774-1: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren*, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [80] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 51900-1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe, Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren*, Berlin: Beuth Verlag, 2000.

- [81] Heizomat Gerätebau-Energiesysteme GmbH, „Produkte, RHK-AK, RHK-AK100,“ [Online]. Available: http://www.heizomat.de/int/biomasseheizung.php?id=rhk_ak&lang=DEU. [Zugriff am 21 Oktober 2016].
- [82] Instruments, Temet, „GASMET DX4000N FT-IR Gas Analysator tragbar; Bedienungsanleitung Hardware,“ Ansyco GmbH, Karlsruhe, 2006.
- [83] SICK MAIHACK GmbH, *Betriebsanleitung FW 100 Staubkonzentrationsmessgerät*, Reute: SICK MAIHACK GmbH Germany, 2009.
- [84] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 14775: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes*, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [85] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 60751:2009-05: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren*, Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [86] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 60584-1: Thermoelemente - Teil1: Thermospannungen und Grenzabweichungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [87] E+E Elektronik, „Datenblatt EE31,“ E+E Elektronik, [Online]. Available: http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee31/Datenblatt_EE31.pdf. [Zugriff am 31 Mai 2016].
- [88] IMKO GmbH, *Bedienungsanleitung SONO-GS1*, Ettlingen: IMKO Micromodultechnik GmbH, 2014.
- [89] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 14774-2: Feste Biobrennstoffe- Bestimmung des Wassergehalts-Ofentrocknung-Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser-Vereinfachtes Verfahren*, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [90] PCE Instruments GmbH, *Technische Daten Feinwaage*, Meschede: PCE Instruments GmbH, 2010.
- [91] E+E Elektronik, „Datenblatt EE 75,“ [Online]. Available: http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee75/Datenblatt_EE75.pdf. [Zugriff am 2 Juni 2016].
- [92] J.-D. Schlecht, Abschlussarbeit: „Auswirkung der mechanischen Vortrocknung auf die Brennstoffeigenschaften von Pferdemit,“ Rosenheim, 2014.

- [93] G. Polz, Abschlussarbeit: „Untersuchung des Einflusses von emissionsmindernden Additiven bei der thermischen Verwertung von Pferdemist,“ Rosenheim, 2015.
- [94] D. a. h. S. M. Schlederer, „Brennstoffkonditionierung durch mechanische Aufbereitung Eigenschaften von Gras- und Laubbrennstoff aus dem florafuel-Verfahren,“ in *Forschungskolloquium Bioenergie*, Straubing, 2015.
- [95] H. Hochberg, K. Gödeke, T. Hering, S. Florian, L. Yulia, H. Elisabet und U. Jäger, „Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die thermische Verwertung,“ Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 2011.
- [96] G. Hoffmann, D. Schingnitz, A. Schnapke und B. Bilitewski, „Reduction of CO₂-emissions by using biomass in combustion and digestion plants,“ *Waste Management* 30, pp. 893-901, 8 Januar 2010.
- [97] L. Eltrop und e. al., „Leitfaden feste Biobrennstoffe,“ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow, 2014.
- [98] T. Hering, „Stroh als Brennstoff: Einfluss der Strohqualität auf den Anlagenbetrieb und Grundlagen eines Brennstoff-Qualitätsmanagements,“ in *Mitteldeutscher Bioenergietag 05.11.15 "Heizen mit Stroh - Wertschöpfung für Landwirtschaft und Kommunen*, Jena, 2015.
- [99] T. Zeng, S. Lang, A. Schneider, J. von Sonntag, T. Ulbrich und L. Volker, „Thermische Nutzung von Traubentresterpellets in Kleinfeuerungsanlagen <100 kW,“ Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ, Leipzig, 2012.
- [100] T. Zeng, D. Büchner, J. Bischoff und A. Schneider, „Beurteilung der thermischen Nutzung von Biomassepellets aus Gärresten,“ Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ, Leipzig, 2012.
- [101] M. Coenen und I. Vervuert, *Pferdefütterung*; 5.Auflage, Stuttgart: Enke Verlag, 2014.
- [102] F. Möllmann, *Analysen und Abschätzung des Mineralstoffgehaltes in Heuproben aus oberbayerischen Pferdehaltungsbetrieben*, München: Fakultät der LMU München, Diss. med. vet., 2007.
- [103] K. Schmalzer und G. Barthelmes, „Chemische Zusammensetzung und Vergärbarkeit von Grünlandaufwüchsen bei unterschiedlicher Schnittnutzung,“ in *59. Jahrestagung der AGGF in Aulendorf (2015), Tagungsband, 140 – 143*, Aulendorf, 2015.

- [104] Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, „Umsetzung der Düngeverordnung; Hinweise und Richtwerte für die Praxis,“ Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, 2007.
- [105] H.-W. Heldt und B. Piechulla, Pflanzenbiochemie; 5. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [106] A. Vetter, „Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung,“ in *Gülfower Fachgespräche: Band 17; Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse*, Tautenhain, 2001.
- [107] V. Zeller, C. Weiser, F. Reinicke, K. Wiegmann, K. Hennenberg, D. Thrän, A. Vetter, B. Wagner, P. Deumelandt, M. Zeymer, B. Bürzle, P. Adler, J. Pnitka, J. Postel, F. Müller-Langer, S. Rönsch, A. Gröngroft, C. Kirsten, N. Weller und M. Schenker, „Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung,“ Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum (DBFZ), Leipzig, 2012.
- [108] D. Bernhardt, M. Pohl, K. Gebauer, S. Unz, M. Müller und M. Beckmann, „Biogene Reststoffe zur Nutzung als holzpelletäquivalente Brennstoffe,“ *Erneuerbare Energien - Band 6*, pp. 57 - 70, 2011.
- [109] I. Obernberger, T. Brunner und G. Bärnthaler, „Chemical properties of solid biofuels—significance and impact,“ *Biomass & Bioenergy 30*, pp. 973 - 982, 20 September 2006.
- [110] P. Glarborg, „Hidden interactions—Trace species governing combustion and emissions,“ *Proceedings of the Combustion Institute*, pp. 77-98, Januar 2007.
- [111] Y.-H. Kiang, „Predicting dewpoints of acid gases,“ *Chemical Engineering 88*, p. 127 ff., März 1981.
- [112] K. Strauß, Kraftwerkstechnik - zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [113] M. Pohl, D. Bernhardt, S. Ncube und M. Beckmann, „Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe,“ in *DepoTech 2010 "Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten"*, Loeben, 2010.
- [114] DECHEMA e.V., Karl-Winnacker-Institut, „Entwicklung korrosionsbeständiger Schichten für Verankerungssysteme von feuerfesten Auskleidungen für aggressive Hochtemperaturumgebung,“ DECHEMA e.V., Frankfurt am Main, 2011.

- [116] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN CEN/TS 15370-1: Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen*, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [117] P. von Böckh und S. Matthias, *Technische Thermodynamik*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.