



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Bioprodukttechnologie
WS 2012

Der Einfluss der Substrate auf die Nährstoffzusammensetzung des Gärrestes in Biogasanlagen

Verfasser:

Erik Thürke

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Heralt Schöne

Dipl. Ing. Aldo Arndt

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2012-0017-4

Neubrandenburg, 21.02.2012

abstract

The main objective of the operation of biogas plants is the production of biogas. But there is also digested residue resulting after the anaerobic digestion. The nutrient content of these residues may vary by using different compositions of the feedstock. To reveal the differences of the nutrient content the digested residues need to be differentiated into categories. The aim of this paper is to find comprehensible categories of the feedstock and to expose the different nutrient contents of these categories. There is also expected a correlation between dry matter content and nutrient content in digested residues.

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt	1
abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen	5
1. Einleitung	7
2. Biogasprozess	8
2.1 Die vier Stufen des Abbauprozesses	8
2.1.1 Hydrolyse	8
2.1.2 Versäuerungsphase	9
2.1.3 Essigsäurebildung	9
2.1.4 Methanbildung	9
2.1.5 Methanausbeute	9
2.2 Weitere Parameter	10
2.2.1 Einfluss des pH-Wertes	10
2.2.2 Einfluss der Temperatur	11
2.2.3 Einfluss verschiedener Verfahren	11
3. Die Substrate	14
3.1 Der Einfluss auf den Gasertrag	14
3.2 Der Einfluss auf die Methanausbeuten	15
3.3 Die Zusammensetzung der Hauptinhaltsstoffe	17
3.4 Ansprüche der Mikroorganismen	19
3.5 Substratwahl	19
3.5.1 Die herkömmlichen Substrate	19
3.5.2 Weitere Substrate	22
3.6 Die Nährstoffzusammensetzung der Gärreste	22
3.6.1 Stickstoff	23
3.6.2 Phosphor, Kalium und Magnesium	24
3.6.3 Schwermetalle	24
3.7 Methoden zur Behandlung der Gärreste	24
3.7.1 Separieren	25
3.7.2 Eindampfen	26
3.8 Der Gärrest als Wirtschaftsdünger	27

4. Methode und Ergebnisse	29
4.1 Verwendung aller Gärrestdaten	30
4.2 Verwendung von Maissilage und Rindergülle	35
4.3 Verwendung von Maissilage ohne Gülle	40
4.4 Verwendung von Maissilage und Schweinegülle	46
5. Auswertung	48
5.1 Vergleich der Nährstoffgehalte	50
5.1.1 Substratkategorie: Alle Gärreste	50
5.1.2 Substratkategorie: Mais & Rind	50
5.1.3 Substratkategorie: Mais & Schwein	51
5.1.4 Substratkategorie: Nur Mais ohne Gülle	52
5.2 Vergleich des Nährstoffwertes	53
6. Zusammenfassung	55
7. Literaturverzeichnis	56
8. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen	57
Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit	59

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Symbol / Index	Bezeichnung	Einheit
V	Volumen	l, m ³
A	Fläche	m ² , ha
m	Masse	dt, kg
T	Temperatur	°C

Abkürzungen

LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
TM	Trockenmasse (siehe auch TS)
TS	Trockensubstanz
FM	Frischmasse
OTS	Organische Trockensubstanz
N	Stickstoff
NH ₄ ⁺	Ammoniumion
DüV	Düngeverordnung
DümV	Düngemittelverordnung
NO ₃ ⁻	Nitrat
P ₂ O ₅	Phosphoroxid
K ₂ O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid
S	Schwefel
C	Kohlenstoff
KAS	Kalk-Ammon-Salpeter
SSA	Schwefelsaurer Ammoniak
ASS	Ammonium-Sulfat-Salpeter
DAP	Diammon-Phosphat
MAP	Monoammon-Phosphat
TSP	Tripelsuper-Phosphat

Formeln

Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Korrelationskoeffizient:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

1. Einleitung

Wenn es um die Wahl eines geeigneten Substrats für Biogasanlagen geht, steht meistens die Methanausbeute im Vordergrund. Zu Recht, auf der einen Seite, da dies das offensichtliche Produkt ist, das beim Biogasprozess entsteht. Auf der anderen Seite fällt darüber hinaus jedoch der Gärrest an, der aufgrund der in ihm enthaltenen Nährstoffe einen nicht zu verachtenden ökonomischen Wert besitzt. Dieser Wert soll mit Hilfe von Nährstoffanalysen und dem Vergleich mit mineralischen Düngemitteln beurteilt werden. Es kann zusätzlich von Bedeutung sein, welche Substrate für die Vergärung in der Biogasanlage verwendet wurden.

Die verschiedenen Anteile beeinflussen vermutlich die Nährstoffgehalte im Gärrest. Wenn man auf die ungefähren Nährstoffgehalte der Gärreste pro m³ schließt, kann annähernd vorausgesagt werden, dass diese mit Zunahme der Trockensubstanz steigen werden. Kommt dann noch das Wissen über die verschiedenen Anteile der eingesetzten Substrate hinzu, sollte es möglich sein, das Nährstoffspektrum noch genauer voraus zu sagen. In jedem Fall ist es aber zu kurz gesprungen, einfach nur den Düngewert von Gülle auf Gärreste zu übertragen. Zur Ausarbeitung des statistischen Teils der Bachelorarbeit sollen die Nährstoffdeklarationen für Gärreste der LUFA Rostock der LMS herangezogen werden. Diese stammen aus Mecklenburg-Vorpommern und wurden von 2010 bis Anfang 2012 erstellt. Es handelt sich dabei um Nährstoffgehalte von untersuchten Gärresten mit ihren spezifischen Trockensubstanzgehalten. Eine prozentuale Zusammensetzung der Substrate, mit denen die Biogasanlage bewirtschaftet wurde, ist ebenfalls angegeben.

2. Biogasprozess

2.1 Die vier Stufen des Abbauprozesses

Der Biogasprozess kann in vier unterschiedliche Phasen eingeteilt werden. Diese Phasen sind die Hydrolyse, die Versäuerungsphase, die Essigsäurebildung oder auch Acetogenese und die Methanbildung oder Methanogenese.

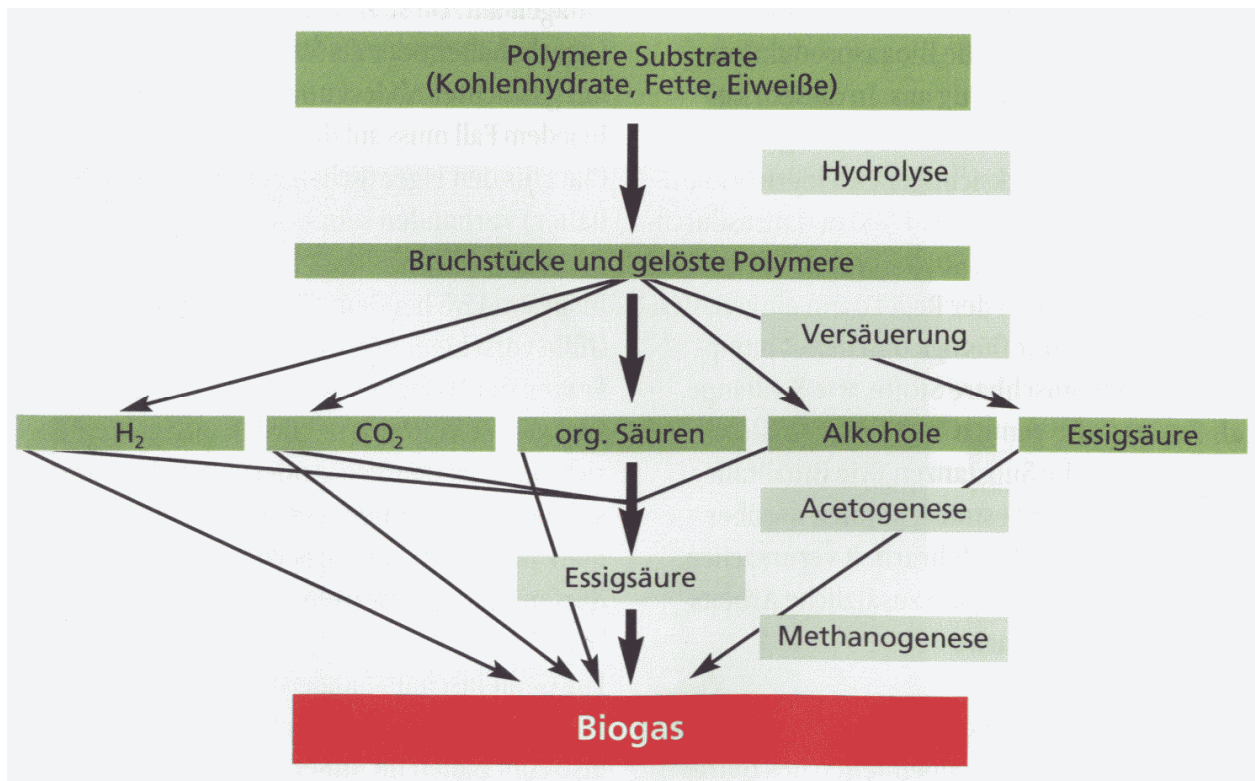


Abb. 1: Die vier Phasen der anaeroben Gärung (Gruber, 2004)

2.1.1 Hydrolyse

Aerobe Bakterien bauen organische Substanzen mit Hilfe von Enzymen ab. Aus den hochmolekularen Verbindungen Kohlenhydrate, Eiweiß, Fett und Zellulose werden dabei niedermolekulare Substanzen. Die hydrolytischen Bakterien spalten Polymere zu Monomeren auf. Dadurch werden diese organischen Verbindungen wasserlöslich. Die Enzyme die hierbei von den Bakterien produziert werden, sind Exoenzyme, die an der Außenseite der Bakterien haften. Der Abbauprozess wird von der Geschwindigkeit, mit der die extracellularen Enzyme die Verbindungen spalten, maßgeblich beeinflusst. Es sind Cellulasen, Amylasen, Lipasen und Proteasen die diesen Abbauprozess durchführen. Aerobe Bakterien, die die Hydrolyse

durchführen, benötigen nicht zwangsläufig eine flüssige Phase um zu überleben, Methanbakterien brauchen jedoch mindestens 50 % Wasseranteil in ihrer Umgebung (Schulz, 2007).

2.1.2 Versäuerungsphase

Säurebildende Bakterien verbrauchen den Restsauerstoff und wandeln die niedermolekularen Verbindungen in Fettsäuren um. Es entstehen dabei hauptsächlich kurzkettige Fettsäuren, niedermolekulare Alkohole, Kohlendioxid, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Ammoniak. Bei diesem Prozess wird der Restsauerstoff verbraucht und es entstehen anaerobe Bedingungen, die für die methanbildenden Bakterien notwendig sind (Schulz, 2007).

2.1.3 Essigsäurebildung

Als Ausgangsstoff für die Methanbildung benötigen die Methanbakterien Essigsäure. Diese wird von den Essigsäurebakterien produziert. Im Prozess der Essigsäurebildung entstehen aber auch Ameisensäure sowie Kohlendioxid und Wasserstoff. Es handelt sich bei den Essigsäurebakterien daher um wasserstoffreduzierende Bakterien. Diese sind empfindlich gegenüber starken Abweichungen ihrer optimalen Temperatur. Da aus der Essigsäure etwa 70 % des gesamten Methans entsteht, ist die Essigsäurebildung der geschwindigkeitsbestimmende Faktor der Methanbildung. Die Essigsäurebildung ist jedoch auch gleichzeitig die am langsamsten ablaufende Phase (Schulz, 2007).

2.1.4 Methanbildung

Methanbakterien bilden neben Methan noch Kohlendioxid und Wasser. Die Methanbildung erfolgt im pH-Bereich von 6,6 und 8 bei einem Optimum von pH 7 aus Essigsäure, Ameisensäure, Kohlenstoff und Wasserstoff. In dieser Phase entsteht 90 % des gesamten Methans, das in der Anlage produziert wird (Schulz, 2007).

2.1.5 Methanausbeuten

Zwar sollen die Methangasgewinnung und entsprechende Ausbeuten nicht das zentrale Thema dieser Arbeit sein, einige essenzielle Fragen müssen jedoch zuvor geklärt werden, um den

Zusammenhang zwischen den Nährstoffen und der Trockensubstanz besser aufzuzeigen. Da wäre zunächst die Gasausbeute genannt, die nur vergleichbar gemacht werden kann, wenn berücksichtigt wird, dass das Gas bei höheren Temperaturen eine Ausdehnung erfährt und dadurch der volumenbezogene Heizwert sinkt. Bei niedrigeren Temperaturen steigt somit der volumenbezogene Heizwert. Zusätzlich steigt dieser noch mit Zunahme des Luftdrucks, da auch dadurch mehr Gas pro Volumeneinheit vorhanden ist. Um einen aussagekräftigen Messwert zu erhalten, verwendet man demnach einen Normzustand und bezieht sich auf eine Temperatur von 0° C, einen Luftdruck von 1,01325 bar und eine relative Luftfeuchte von 0 %. Angegeben wird die Gasproduktionsrate in Norm-l oder Norm-m³ Methan pro kg oTS. Diese Angabe ist noch relativ jung und soll vergleichbare Messwerte für unterschiedliche Anlagen zulassen. Die älteren Angaben in m³ Biogas pro m³ Frischsubstrat oder pro kg TS gelten dagegen als relativ ungenau (Schulz, 2007).

Für die Qualität des Biogases zählt hauptsächlich der Methangehalt. Das brennbare Methan ist der Energieträger im Biogas. Das zusätzlich anfallende Kohlendioxid ist nutzlos und ein Volumenverschwender. Ein hoher Methangehalt im Biogas ist daher wünschenswert und wird am besten durch eine zweistufige Prozessführung realisiert. Dabei fällt während der aeroben Phase Gas an, das fast nur aus Kohlendioxid besteht. Es kann somit abgeleitet werden. In der zweiten Stufe entsteht wiederum ein Biogas mit bis über 80 % Methangehalt. Wird diese Methode nicht angewendet, so erhält man in der Regel ein Biogas mit schwankendem Methangehalt von 50 bis 75 %. Auch die Zusammensetzung des Substrats bestimmt den Methangehalt. Kohlenhydratreiche Substrate wie Maissilage ergeben dabei ein Gas mit durchschnittlich 53 % Methangehalt. Sind mehr Proteine und Fette im Substrat vorhanden, steigt dementsprechend der Methangehalt (Schulz, 2007).

2.2 Weitere Parameter

2.2.1. Einfluss des pH-Wertes

Schnell abbaubare Substrate führen zu einer Überfütterung der säurebildenden Bakterien. Dieser starke pH-Abfall verursacht eine Hemmung der anderen Bakterien. Der Gesamtprozess ist dadurch in Gefahr. Soll sich ein Fließgleichgewicht zwischen den angelieferten Nährstoffen und den Abbauprodukten entwickeln, so müssen alle Parameter in Bezug auf den Bakterienstoffwechsel berücksichtigt werden. Dabei ist zu bedenken, dass die Abbauprodukte einer bestimmten Bakteriengruppe die Nahrung für die folgende ist. Die einzelnen Phasen laufen

zusätzlich unterschiedlich lang ab. Die aeroben Bakterien verdoppeln ihre Masse bei optimaler Versorgung sehr schnell in 20 Minuten bis 10 Stunden, während einige der anaeroben Bakterien mehrere Tage dafür benötigen. Substrate haben aber auch Einfluss auf die Pufferung des pH-Wertes. Das bedeutet, dass bei steigender Versauerung, und dem damit verbundenen Anstieg der H^+ Konzentration, ein gewisser Teil der H^+ Ionen gebunden und somit der pH-Wert länger konstant gehalten werden kann. Eine puffernde Wirkung haben zum Beispiel Carbon- und Ammoniumpuffer. Dabei sind Hydrogencarbonat im sauren Bereich und Ammoniak im leicht alkalischen Bereich aktiv. In nachwachsenden Rohstoffen sind kaum puffernde Substanzen enthalten. Dadurch können diese eine erhöhte Versäuerung nur schlecht auffangen. Generell sollte man versuchen, stabile Faulprozesse zu erzielen, bei denen sich der pH-Wert von selbst einstellt. Ein pH-Wert von 7 ist als optimal zu bewerten, da dieser für fast alle Einzelprozesse des Biogasvorgangs gut geeignet ist (Schulz, 2007).

2.2.2 Einfluss der Temperatur

In jedem Betrieb mit Biogasanlage stellt sich nach einer gewissen Zeit ein bestimmter Temperaturbereich im Fermenter ein. Die meisten Biogasanlagen besitzen Temperaturen im mesophilen Bereich, also $25 - 45^\circ C$. Das liegt unter anderem auch an der höheren Empfindlichkeit der Bakterien beim Anstieg der Temperatur. Im mesophilen Bereich sind Schwankungen der Temperatur von $2 - 4^\circ C$ um den Mittelwert von den Bakterien gut zu vertragen. Im thermophilen Bereich, also über $45^\circ C$, sind Schwankungen nur noch zu ertragen, wenn diese nicht mehr als $1^\circ C$ um den Mittelwert von der durchschnittlichen Temperatur abweichen. Auch die Substrate können einen Einfluss auf die Temperatur des Fermenterraums haben. Jedoch nicht nur dadurch, dass große Mengen verdichteten oder sehr kalten Materials eingebracht werden. So kann zum Beispiel ein hoher oder ausschließlicher Anteil an nachwachsenden Rohstoffen im Substrat, Oxidationsreaktionen auslösen, die eine starke Wärmefreisetzung zur Folge haben. Dabei können höhere Temperaturen im Fermenterraum entstehen als sie von der Heizung vorgegeben wurden (Schulz, 2007).

2.2.3 Einfluss verschiedener Verfahren

In der Regel werden heute kontinuierliche Verfahren zu Biogasgewinnung eingesetzt. Hier wird mehrmals täglich Substrat zugesetzt und es kommt daher zu einer kontinuierlichen Gasbildung. Ein längerer Verbleib des Substrats ist nicht sinnvoll, da mit steigender Verweilzeit die

Gasausbeute, bezogen auf 1 kg zugeführte organische Substanz, nachlässt. Bei diesem Prozess wird also nie die gesamte organische Masse des Substrats abgebaut. Bei dem Batchverfahren durchläuft eine bestimmte Menge an Substrat nacheinander alle Biogasprozessphasen, bis nur noch schwer erreichbare Stoffe zur Verfügung stehen und ein weiterer Abbau der Substrate nicht mehr möglich ist. Die Kurve der täglich produzierten Menge an Biogas wird dabei größer und bis zu einem maximalen Scheitelpunkt ansteigen, dann jedoch wieder durch die täglich geringer werdende Menge an zur Verfügung stehenden abbaubaren Substanzen sinken. Meist wird das einstufige Verfahren mit räumlich und zeitlich nicht getrennten Abbauprozessen gewählt. Es gibt aber auch die Möglichkeit, für die Hydrolyse und Versäuerungsphase einen vom Fermenter getrennten Behälter zu nutzen. So können die für die Hydrolyse und Versäuerung benötigten Bakterien ihren optimalen pH-Wert beibehalten.

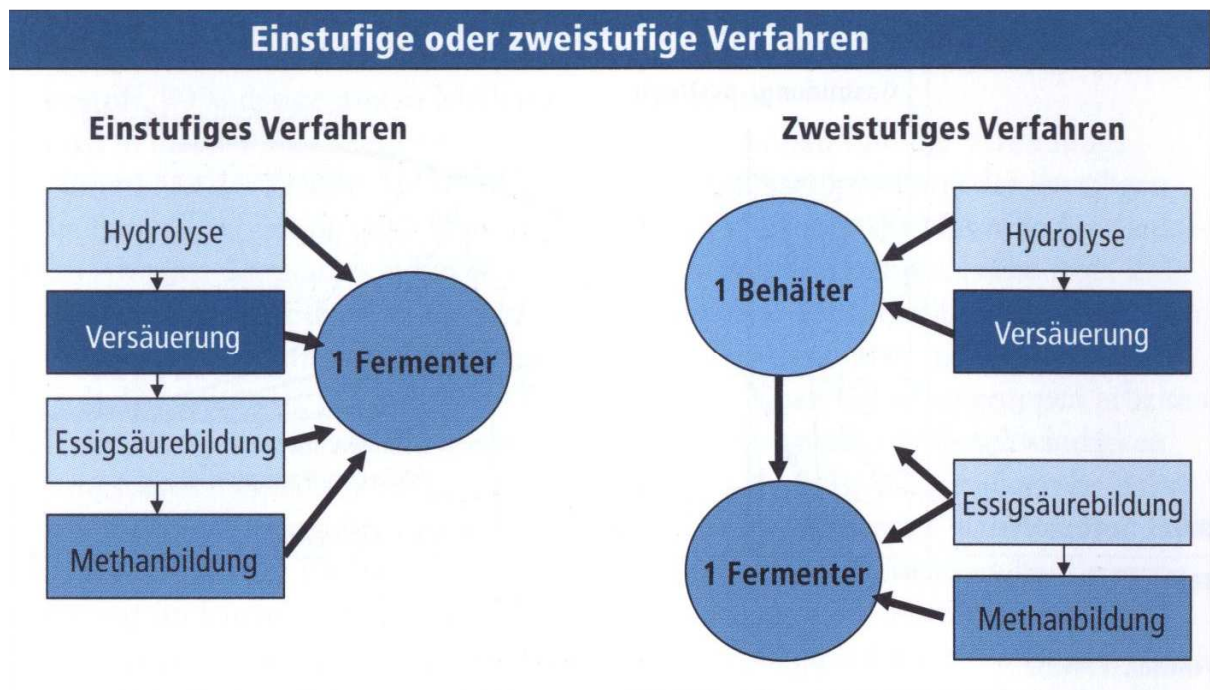


Abb. 2: Unterschied von ein- und zweistufigem Verfahren (Schulz, 2007)

Dieses Verfahren hat sich bis heute jedoch nicht im großen Maße durchsetzen können. Dabei ist besonders bei sich schnell abbaubaren Substraten eine Trennung der Phasen mit vielen Vorteilen verbunden. Der Nachteil der zusätzlichen Kosten für den zweiten Behälter kann nur durch die Verwendung spezieller Substrate ausgeglichen werden. Es gibt jedoch immer häufiger zwei hintereinander geschaltete Behälter. Dabei handelt es sich um zwei Fermenter, von denen der erste beheizt ist und die schnell abbaubare Substanz zu Gas umsetzt. Der zweite ist unbeheizt und setzt die schwerer abbaubare Substanz bei längerer Verweilzeit um (Schulz, 2007). Die landwirtschaftlichen Biogasanlagen, die von Einzelunternehmern geführt werden, sind durch die

steigende Zahl der Anlagen, die durch Genossenschaften und Personengesellschaften betrieben werden, prozentual zurückgegangen. Das hat auch mit den steigenden Investitionskosten neuer Anlagen zu tun, denn die neue Technologie, die in Fermentern, Gärrestlagern und Gasspeichern eingesetzt wird, lohnt sich vor allem, wenn gleich entsprechend größere Anlagen gebaut werden. Große Anlagen die mit Gülle betrieben werden, erreichen durch die Degression der Stromgestehungskosten die größte Wirtschaftlichkeit. Der enorme Güllebedarf ist jedoch nur bei entsprechender Massentierhaltung zu realisieren. Kleinere Anlagen können nur durch zusätzliche Förderung wirtschaftlich betrieben werden. Bei Anlagen, die mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden, lohnt sich der Bau ebenfalls nur bei entsprechender Größe und durch den NaWaRo-Bonus, da vor allem die Substratkosten sehr hoch sind (Staiß, 2007).

3 Die Substrate

3.1 Der Einfluss auf den Gasertrag

Neben der Technologie kann auch der Einsatz verschiedener Substrate die Investitionskosten beeinflussen. Dabei ist es besonders interessant, ob nachwachsende Rohstoffe oder Gülle eingesetzt werden. Die Gülle ergeben nämlich weniger Biogas bezogen auf die Masse und erzeugen auch kleinere Gärrestmengen. Diese können dann aber wiederum in kleineren Gärrestlagern verweilen (Staiß, 2007). Man kann aber auch noch zwischen den Wirtschaftsdüngern Rinder-, Hühner-, und Schweinegülle unterscheiden. Rindergülle ist zwar gut geeignet für die Vergärung in Biogasanlagen, jedoch ist die Gasausbeute im Vergleich zu Schweinegülle und Hühnerkot deutlich niedriger. Meist wird Gülle zur Vergärung verwendet aber auch Festmist. Dieser muss verdünnt werden, um eine bessere Pumpfähigkeit zu erzielen. Hühnerkot birgt dabei die unangenehme Eigenschaft, viel Kalk und Sand zu beinhalten. Diese sorgen für unerwünschte Sinkschichten im Fermenter und müssen daher speziellen Behandlungen unterworfen werden (Biskupek, 1998). Beim Einsatz von Maissilage wird bezogen auf die eingesetzte Masse mehr Biogas erzeugt und ein geringeres Volumen des Fermenters benötigt. Dafür muss aber für die größeren Mengen an benötigtem Substrat auch ein entsprechend größeres Gärrestlager gebaut werden (Staiß, 2007). Der Gasertrag pro Tonne Substrat kann also unterschiedlich hoch sein. Außerdem steht er im Zusammenhang mit der Trockensubstanz des Substrats. Getreidekörner haben aufgrund ihres hohen Trockensubstanzgehalts daher einen höheren Gasertrag pro Tonne als Maissilage. Diese wiederum besitzt einen höheren Gasertrag pro Tonne als Schlempe, die einen sehr hohen Wassergehalt haben, aus dem kein Gas entstehen kann. Aber nicht nur die Trockensubstanz des Substrats ist für den Gasertrag entscheidend. In der Trockensubstanz ist auch die organische Substanz vorhanden, aus der allein das Biogas gebildet wird (Schulz, 2007). In der Abbildung sind die Biogausausbeuten verschiedener Substrate dargestellt.

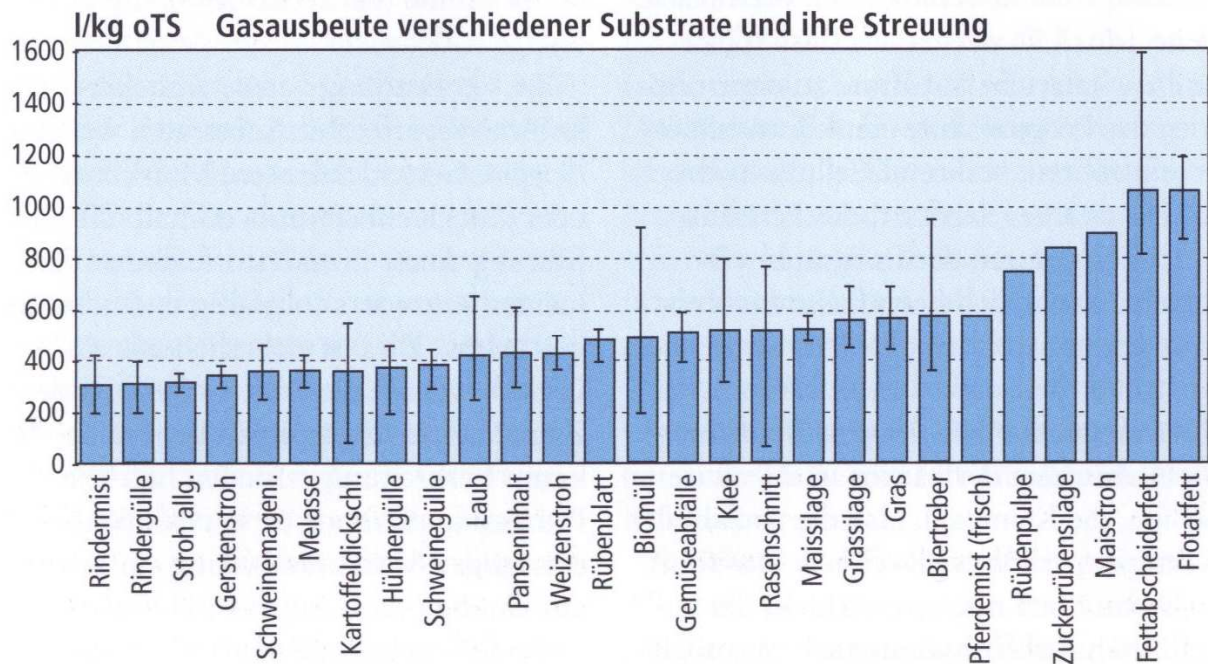


Abb. 3: Substrate geordnet nach aufsteigender Biogausbeute (Schulz, 2007)

3.2 Der Einfluss auf die Methanausbeuten

Die Methanausbeuten von Energiepflanzen zeigen eine geringe Streuung um 300 l Methan pro kg oTS, wie in folgender Abbildung zu erkennen ist.

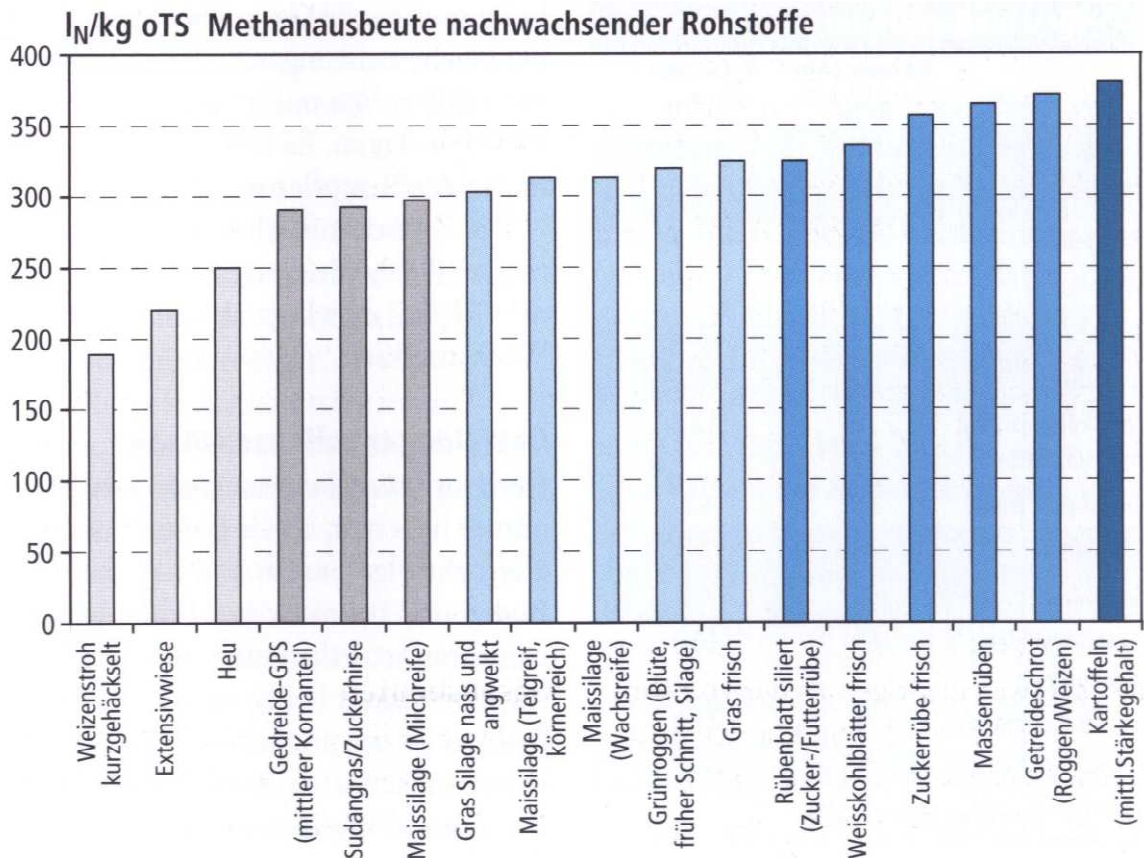


Abb. 4: Methanausbeuten verschiedener nachwachsender Rohstoffe (Schulz, 2007)

Maissilage liegt ebenfalls bei diesem durchschnittlichen Wert. Masserüben, Zuckerrüben, Getreideschrot und Kartoffeln haben dank ihres großen Anteils an Zucker bzw. Stärke entsprechend hohe Methanausbeuten von 350 bis 380 l pro kg oTS. Nun könnte man annehmen, dass hauptsächlich Kartoffeln und Getreide in Biogasanlagen verwendet werden sollten. Diese ergeben jedoch, bezogen auf die Fläche, also pro Hektar, durch die geringere Biomasseproduktion, nur etwa 3000 m³ Methan. Die Biomasse kommt dann eher durch Rüben und Silomais. Dann gibt es noch die Getreideganzpflanzensilage, kurz GPS, deren Zunahme als energiereiches Substrat mit der Verwendung als zuverlässige und schnell wachsende Zwischenfrucht erklärt werden kann. Diese Silagen erreichen ihre höchste Energiedichte während der Teigreife, wenn aus den Körnern beim Zerdrücken kein Saft mehr austritt. Durch ihren hohen Rohproteingehalt entsteht eine größere Menge Stickstoff im Gärrest. Es muss aber auch auf eine erhöhte Ammoniakhemmung geachtet werden. Die Verwendung von Mais als Energiepflanze zog eine Reihe von Züchtungserfolgen nach sich, aus denen spezielle vor allem spätreife Sorten hervorgingen. Sehr späte Sorten erzielen einen Biomassertrag zwischen 120 und 270 dt TS pro ha und Gasausbeuten zwischen 300 und 380 l Methan pro kg oTS. Kommen

alle günstigen Parameter zusammen, wie die Wahl des richtigen Erntezeitpunktes und ein guter Standort, so können auch Flächenleistungen von 8000 m³ Methan pro ha erreicht werden. So kann es auch erklärt werden, warum Mais als am häufigsten verwendete Energiepflanze in Biogasanlagen eingesetzt wird (Schulz, 2007).

3.3 Zusammensetzung der Hauptinhaltsstoffe

Bei allen möglichen Substraten bilden in wechselnden Anteilen Proteine, Fette und Kohlenhydrate die organische Substanz. Deren Anteile bestimmen die Gesamtmenge an Biogas, die aus dem Substrat gewonnen wird und auch die Zusammensetzung des Biogases. Während Proteine einen Methangehalt von 71 % im Biogas bewirken, bringen es Fette auf gute 68 % Methan. Aus Kohlenhydraten hingegen schaffen die Bakterien nur 50 % Methan zu produzieren. Insgesamt bringen Fette den höchsten Gehalt mit 850 Litern Methan pro kg organischer Trockenmasse. In folgender Abbildung ist die Einteilung der organischen Substanz in Proteine, Fette und Kohlenhydrate zu erkennen.

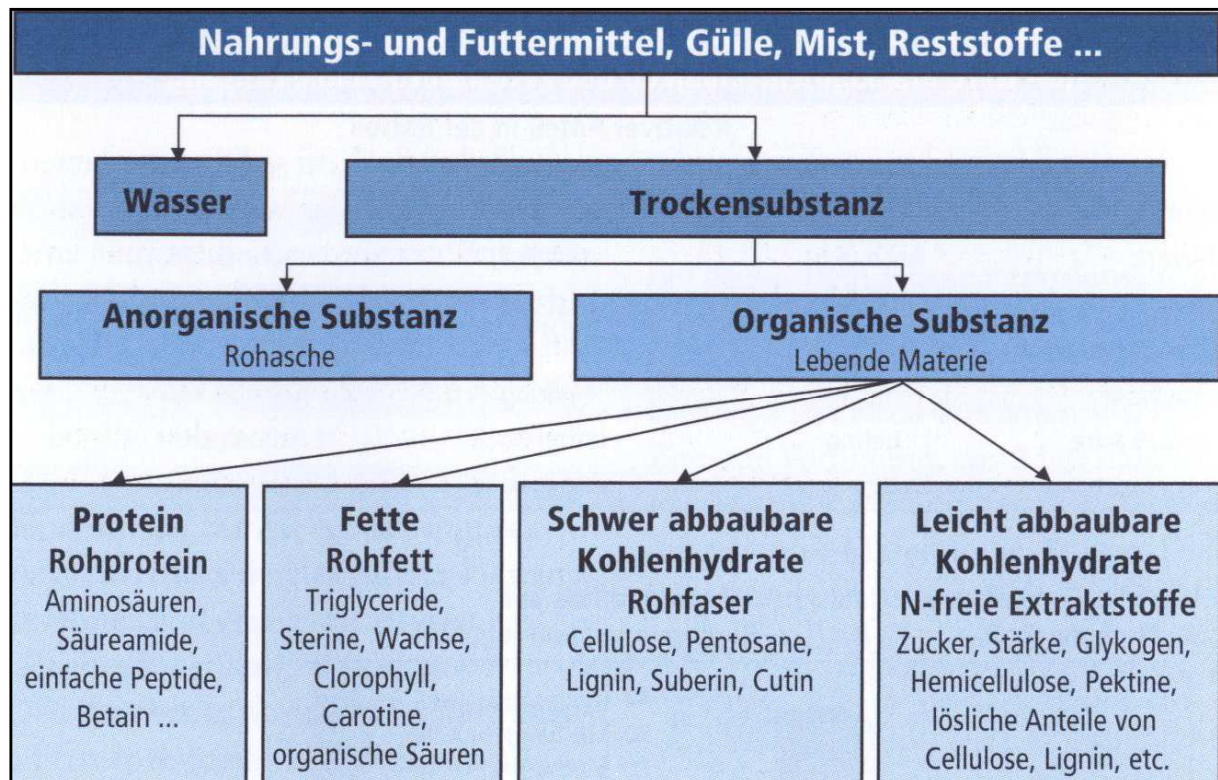


Abb. 5: Einteilung der organischen Substanz (Schulz, 2007)

Fette, die Ester des dreiwertigen Alkohols Glycerin, werden während des Biogasprozesses zu den verschiedenen Fettsäuren und Glycerin abgebaut. Die Fettsäuren können durch eine zu hohe Anreicherung eine starke pH-Wert Absenkung verursachen. Dies beeinflusst die Essigsäure- und Methanbildung, sodass diese stark gehemmt werden kann. Proteine werden zu Aminosäuren umgesetzt. Im weiteren Verlauf werden sie zu verschiedenen organischen Säuren weiter abgebaut. In Proteinen befinden sich zusätzlich zu den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff noch Stickstoff, Schwefel und Phosphor. Stickstoff und Phosphor spielen für den Wert des Gärrestes als Düngemittel eine wichtige Rolle. Kohlenhydrate unterscheidet man in leicht abbaubare wie Zucker, Stärke, Pektine und Glycogen und in schwer abbaubare. Zu diesen zählen vor allem Cellulose und Lignin, aber auch Pentosane, Suberin und Cutin. Lignin ist eigentlich kein Kohlenhydrat. Für die Analytik wird dieser Verholzungstoff, der in den Pflanzen gebildet wird, aber trotzdem den Kohlenhydraten zugeordnet. Dieser Stoff kann nur schwer von Bakterien angegriffen werden und ist zudem noch sehr säurebeständig. Cellulosen und Hemicellulosen sind zwar auch wie Lignin durch eine komplexe und stark verzweigte Struktur gekennzeichnet, sind jedoch besser von Bakterien abbaubar. Aufgrund ihrer einfachen Struktur sind Zucker und Stärke am leichtesten und damit auch relativ schnell von den Bakterien abgebaut. Da der Anteil an Essigsäure die Methanbildung bestimmt und die Zuführung von stärke- und zuckerreichen Substraten den Propionsäure- und Buttersäureanteil erhöhen kann, sollte eine solche einseitige Fütterung der Biogasanlage vermieden werden (Schulz, 2007). Die Bildung von Buttersäure und Propionsäure ist begünstigt, wenn der H_2 -Partialdruck steigt und der pH-Wert sinkt. Kohlenhydrate fördern die Bildung von Carbonsäuren und damit die Absenkung des pH-Wertes. Wird dann das produzierte H_2 nicht schnell genug von den Bakterien über die Methanogenese verstoffwechselt, wird die Produktion von Butter- und Propionsäure erhöht (Schieder, 2010). Cellulosen hingegen sind für die Methanbildung von Vorteil, da sie das Fettsäuremuster in Richtung der Essigsäure verschieben. Es ist also darauf zu achten, dass die Zufuhr von Getreide- und Maiskörnern sowie Zuckerrüben in begrenztem Maße als Substrat verwendet werden. Die Abbaubarkeit sinkt also mit der Zunahme der strukturellen Komplexität. Da wären zunächst die Einfachzucker wie Glucose, gefolgt von den Mehrfachzuckern Saccharose und Maltose. Polysaccharide wie Stärke und Cellulose sind schon schwieriger abzubauen und bei Heteropolysacchariden wie Lignin versagen die meisten Bakterien und Säuren bereits. Hemicellulose und Pektin sind zwar auch Heteropolysaccharide mit komplexer Struktur, jedoch schneller abbaubar als das Polysaccharid Cellulose. Einheitliche Gasausbeuten sind unter diesen Voraussetzungen nicht vorhersagbar und zu erwarten. Die Gasausbeute und Qualität des Gases schwankt mit der Zusammensetzung der Substrate (Schulz, 2007).

3.4 Ansprüche der Mikroorganismen

Bei der Planung der Biogasanlage muss bereits klar sein, welche Substrate vergoren werden sollen, da sich direkt aus der Abbaugeschwindigkeit der zur Verfügung stehenden Substrate, die technisch notwendige Verweilzeit ergibt. Die Verweilzeit von Zucker und Stärke ist aufgrund ihrer einfachen Struktur und der daraus resultierenden schnellen Abbaubarkeit nur sehr kurz. Verbindungen wie Cellulosen und Hemicellulosen verweilen jedoch durch ihre komplexe Struktur länger im Fermenter. Die Bakterien benötigen mehr Zeit, um diese reich verzweigten Verbindungen abzubauen. Neben den Hauptnährstoffen kommen vor allem Mineralstoffe und lösliche Stickstoffverbindungen für die Mikroorganismen in der Biogasanlage in Frage. Daneben gibt es einige Vitamine und Spurenelemente, die zusätzlich für den Stoffwechsel der Bakterien von Bedeutung sind (Schulz, 2007). Einige dieser Spurenelemente wie Eisen, Molybden und Kobalt sind nicht nur als Spurennährstoffe bei der Methanbildung förderlich, sondern auch den ackerbaulichen Kulturpflanzen. Mit Schwefelwasserstoff, der beim Abbau der Proteine entsteht, können diese Spurennährstoffe jedoch als feste Sulfide ausfallen und für die Bakterien nicht mehr zugänglich sein (Gruber, 2004). Ein Hinweis auf gute Nährstoffversorgung ergibt sich aus dem C:N:P Verhältnis. Dieses Verhältnis gibt an, wie viel Gesamtphosphorgehalt auf den Gesamtstickstoffgehalt und wie viel Gesamtstickstoffgehalt wiederum auf den Gesamtkohlenstoffgehalt kommt. Als optimal erweist sich dabei ein C:N:P Verhältnis von 75:5:1 bis 125:5:1. Schwermetalle wie Nickel und Blei wirken zwar hemmend und bei höheren Konzentrationen sogar toxisch auf Bakterien, jedoch sind sie in gewissen Konzentrationen auch notwendig und für die optimale Versorgung der Bakterien erwünscht. In der Praxis zeigt sich aber auch, dass sich Bakterien nach einer gewissen Zeit auf niedrige oder hohe Nährstoffkonzentrationen einstellen können. Schwermetalle sind außerdem nur hemmend oder toxisch, wenn sie in löslicher Form vorliegen (Schulz, 2007).

3.5 Substratwahl

3.5.1 Die herkömmlichen Substrate

Die Substrate bestehen meist aus verschiedenen landwirtschaftlichen Materialien, die von unterschiedlichen Quellen stammen. Landwirte besitzen Biogasanlagen, um ihre anfallenden Wirtschaftsdünger damit veredeln zu können. Zusätzlich lohnt es sich, dank NaWaRo-Bonus Mais anzubauen und zu silieren. Wer ausschließlich Silomais als Substrat einsetzt, muss jedoch eine spezialisierte Anlage auf hohem technischem Niveau besitzen. Denn die einseitige

Verwendung von nur einem Substrat, wirkt sich negativ auf die Gärungsvorgänge aus. Die bei der Haltung von Milchkühen, Mastrindern oder -schweinen sowie Hühnern anfallenden Gülle, bringen dabei eine förderliche Abwechslung. Diese sind in ihrer Zusammensetzung recht unterschiedlich. Dabei spielt neben der Tierart auch die Nutzungsrichtung, und damit die Fütterung, eine entscheidende Rolle. Für die Gasausbeute ist nur die organische Trockensubstanz von Bedeutung. Nur aus ihr entsteht mit Hilfe der Bakterien letztendlich das Biogas. Bei Hühnerkot liegt der oTS-Gehalt durchschnittlich etwas höher als bei Schweine- und Rindergülle. Die gesamte Trockensubstanz ist bei Schweinegülle am niedrigsten. Danach kommt Rindergülle und schließlich Hühnerkot mit dem größten Anteil an Trockensubstanz. Eine Mischung aus den erwähnten Wirtschaftsdüngern der drei Tierarten ist dabei die beste Lösung, um die einzelnen Nachteile auszugleichen. Schweinegülle ist zum Beispiel sehr fettreich, jedoch auch mit viel Wasser und wenig vergärbare Trockensubstanz beladen. Bei der Gasausbeute schneidet die Rindergülle sehr schlecht ab, da das Rind ein nahezu perfekter Nahrungsverwerter ist. Diese Eigenschaft beruht auf ein Milieu im Pansen des Wiederkäuers, das dem in der Biogasanlage sehr ähnlich ist. Das Rind produziert nämlich schon eine erhebliche Menge an Biogas. Die Rindergülle ist trotzdem noch reich an Trockensubstanz. Dadurch ist die Methanausbeute dann doch nicht zu gering (Schulz, 2007). Biogas aus Rindergülle bewirkt einen Methangehalt von etwa 60 % im Biogas, Schweinegülle etwa 70 %. Diese wird schneller umgesetzt, besitzt aber einen geringeren Rohfasergehalt (Wörle, 2010). Die Verdauung der Hühner ist am unvollständigsten von den drei betrachteten Tierarten, aber auch die Verdauung der Schweine, die dem Menschen sehr ähnlich ist, lässt noch viele vergärbare Substanzen in der Gülle zurück. Hühnerkot ist wie erwähnt oft zu trockenmassereich, um in großen Mengen als Substrat in Biogasanlagen zu dienen. Die Vermischung mit wasserreicher Schweinegülle wäre also ideal (Schulz, 2007). Außerdem führt Hühnerkot mit seinen hohen Stickstofffrachten zu erhöhten NH_4^+ -Konzentrationen, die wiederum den anaeroben Vergärungsprozess behindern können. Bei der Lagerung kommt es bei unvergorenen Tierexkrementen oft zur starken Ausgasung von klimafährdenden Gasen. Das Vergären der Wirtschaftsdünger reduziert diese Eigenschaft stark. Zur Einteilung der Exkremente gilt für alle Tierarten, dass Gülle als das Produkt aus Harn und Kot einer Tierart bezeichnet wird. Kommt dazu noch das Einstreumaterial aus der Tierhaltung, spricht man von Festmist. Dieser wird durch Verdünnen mit Wasser wieder zur Vollgülle (Kaltschmitt, 2009). Die meisten Biogasanlagen sind also auf den Wirtschaftsdünger einer Tierart eingestellt, da die landwirtschaftlichen Betriebe meist auf eine Tierart spezialisiert sind. Die Ausrichtung der Landwirtschaft hat sich durch das gesteigerte Interesse an der Energiegewinnung mit Biogasanlagen stark verändert. Immer mehr Flächen werden genutzt, um

Energiepflanzen, vor allem Mais, anzubauen (Schulz, 2007). Der Mais ist einjährig und sehr stärkereich, weshalb er auch zur Ethanolgewinnung herangezogen wird. Bevor der Mais als Substrat für die Vergärung in der Biogasanlage genutzt werden kann, wird dieser noch gehäckselt und siliert. Dadurch wird die Oberfläche erhöht und eine bessere Vergärbarkeit erreicht. Mais gedeiht auf den leichten Böden in Mecklenburg-Vorpommern relativ gut, wenn er ausreichende Mengen an Wasser in Form von Niederschlägen oder teilweise auch durch Bewässerung erhält. Außerdem kann er nacheinander, also in Fruchtfolge, mit sich selbst noch gut angebaut werden, da er von den meisten Getreidekrankheiten verschont bleibt. Lediglich der Maiswurzelbohrer und die Pilzkrankheiten Maisbeulenbrand und Fusarium können für große Ertragsausfälle sorgen. Die Züchtung bringt jährlich neue Silomaisarten hervor, die immer besser an die anaerobe Vergärung angepasst sind. Vor allem der Biomassertrag, der für die Methanausbeute entscheidend ist, soll gesteigert werden (Kaltschmitt, 2009). In der folgenden Abbildung zum Anbau nachwachsender Rohstoffe ist deutlich zu erkennen, dass ein großer Teil der Energiepflanzen für die Biogasgewinnung herangezogen wird und dieser Anteil zudem noch am stärksten wächst (mediathek.fnr.de).

Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (ha)			
Pflanzen	Rohstoff	2010	2011*
Industrie pflanzen	Industriestärke	160.000	165.000
	Industriezucker	10.000	10.000
	technisches Rapsöl	125.000	120.000
	technisches Sonnenblumenöl	8.500	8.500
	technisches Leinöl	2.500	2.500
	Pflanzenfasern	1.000	500
	Arznei- und Farbstoffe	10.000	10.000
	Summe Industriepflanzen	317.000	316.500
Energie pflanzen	Rapsöl für Biodiesel / Pflanzenöl	940.000	910.000
	Pflanzen für Bioethanol	240.000	250.000
	Pflanzen für Biogas	650.000	800.000
	Pflanzen für Festbrennstoffe (u.a. Agrarholz, Miscanthus)	4.000	6.000
	Summe Energiepflanzen	1.834.000	1.966.000
Gesamtanbaufläche NR		2.151.000	2.282.500

Abb. 6: Anbau nachwachsender Rohstoffe (mediathek.fnr.de).

Da sich die Attraktivität der nachwachsenden Rohstoffe durch den 2004 eingeführten NaWaRo-Bonus stark erhöht hat, entschieden sich bisher viele Betreiber, soweit die Verfahrenstechnik der Anlage es zulässt, vermehrt Silomais, Getreide und Grassilage als Substrat zu verwenden.

Trotzdem besteht das Substratgemisch durchschnittlich noch mindestens zur Hälfte aus Gülle und teilweise auch aus Festmist (Staiß, 2007).

3.5.2 Weitere Substrate

Die Wahl der Kulturart als Energiepflanze wird auch mit dem erzielbaren Marktpreis entschieden. Sobald es sich lohnt, eine bestimmte Pflanze zu Biogas zu vergären, kann das Interesse daran, den herkömmlichen Verwendungszweck für diese Kulturart beizubehalten, verloren gehen. Ob es sich lohnt, wird auch durch das Bonussystem des EEG mit beeinflusst (Schulz, 2007). In Zukunft soll außerdem noch vermehrt Grassilage als Substrat eingesetzt werden. Sie wird leicht angewelkt und wie Silomais siliert, um die Vergärbarkeit zu verbessern. Vor allem Deutsches Weidelgras hat sich in verschiedenen Versuchen bewährt, da es sehr ausdauernd ist. Außerdem ist es spät reif, was geringere Gestehungskosten mit sich zieht. Wenn durch ackerbauliche oder züchterische Methoden ein Weg gefunden wird, den Trockenmasseertrag von Grassilage noch zu steigern, kann dadurch eine ernsthafte Konkurrenz zum Silomais entstehen. Auch Zuckerrüben können die Biogas-Fruchtfolge erweitern. Die Trockenmasse der Rüben beinhaltet mit 75 % Saccharose ein schnell verfügbares Molekül und ist in nur etwa 15 Tagen abgebaut. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Zuckerrüben als Substrat kann noch nicht vollständig von jedem Biogasanlagenbetreiber, der es mit Zuckerrüben als Substrat versucht hat, bestätigt werden. Das stabilere Laufen des Biogasprozesses und die gesteigerte Methankonzentration bei Verwendung von Zuckerrüben wurden jedoch von vielen Untersuchungen verifiziert. Die Frage ist selbstverständlich auch, ob der Ackerboden den wirtschaftlichen Erfolg hoher Erträge von bis zu 14 t / ha zulässt oder ob Zuckerrüben erst noch angeliefert werden müssen. Man rechnet dabei mit einem Radius von 50 km, bei dem sich ein Transport lohnt. Das ist im Vergleich zu anderen Substraten schon als recht gut einzuschätzen. Der sich lohnende Radius von Mais beträgt immerhin nur ein Drittel des Radius der Zuckerrüben (Wörle, 2010)

3.6 Die Nährstoffzusammensetzung der Gärreste

Laut den Untersuchungen, die im (Ratgeber Biogas) beschrieben sind, ergeben sich keine Unterschiede zwischen den N-Gehalten in Gärresten aufgrund der verschiedenen Anteile von Schweine-, Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen, die der Anlage zugeführt wurden. Jedoch ergeben sich bei Gärresten nachweislich höhere N-Gehalte als in unvergorenen Gülle

(Wörle, 2010). Die Nährstofffracht, die in Gärresten vorhanden ist, wird jedoch nach (Gruber, 2004) maßgeblich durch die eingesetzten Substrate bestimmt. Daher ist es ratsam, für die vorhandenen Ackerflächen Kulturen zu planen, die mit der Nährstofffracht des Gärrestes harmonieren. So kann eine optimalere Düngung ohne Über- oder Unterversorgung gewisser Nährstoffe erfolgen (Gruber, 2004). Auf jeden Fall variieren die zugeführten Substrate stark in ihrer Nährstoffzusammensetzung. So kann vor allem der Einsatz von Gülle unterschiedlicher Tierarten, die Streuung der Nährstoffgehalte im Gärrest erhöhen. Mit Hilfe des TS-Gehaltes sollten jedoch die Gehalte der verschiedenen Nährstoffe im Gärrest besser beurteilt werden können. (Galler, 1989)

3.6.1 Der Stickstoff

Vergorene Gülle besitzt durch die geringere Menge an biologisch gebundenem Stickstoff eine vorübergehend bessere N-Düngewirkung als unvergorene Gülle. Das C/N-Verhältnis ist enger und ein großer Anteil des Stickstoffs liegt in leicht pflanzenverfügbarer Form vor (Biskupek, 1998). Ein großer Unterschied besteht zwischen Rinder- und Schweinegülle als Substrat. Vor allem der höhere Anteil an verholzten Pflanzenzellen in Rindergülle sorgt für eine geringere Abbaurate der organischen Substanz. Schweinegülle ist ähnlich wie Hühnermist stärker mit Stickstoff angereichert als Rindergülle, was zur schnelleren Erreichung des Ammoniumgrenzwertes führen kann und den Gärprozess sehr stark hemmt. Stickstoff ist vorwiegend in Proteinen vorhanden, die beim Gärprozess zu Aminosäuren und weiter zu Ammoniumverbindungen abgebaut werden. (Gruber, 2004). Ammonium (NH_4) macht im vergorenen Substrat einen Anteil von 50 bis 60 % des Gesamtstickstoffs aus. Besonders bei einem erhöhten pH-Wert und höheren Temperaturen kommt es zur Ammoniakausgasung. Dabei verschiebt sich die Gleichgewichtsreaktion $\text{NH}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{NH}_4^+$ zum Ammoniak. Ammoniak ist nicht nur für den Menschen giftig, sondern auch für die Bakterien in der Biogasanlage. Als Zellgift kann es starke hemmende Auswirkungen auf die Mikroorganismen haben (Schulz, 2007). Eine verminderte Schwimmdeckenbildung im Gärgutlager erhöht ebenfalls die Ammoniakausgasung. Dabei ist nicht nur der Verlust von Dünger als Problem anzusehen, sondern auch die Bodenversauerung an unbestimmten Orten, an denen der Ammoniak eintrifft erfolgt. Stickstoff aus vergorener Gülle nitrifiziert schneller im Boden. Dadurch besteht eine erhöhte Gefahr der Nitratauswaschung. Durch angepasste Düngergaben an die Bedürfnisse der Wachstumsphasen der betreffenden Pflanzen, kann dies jedoch genutzt und eine Nitratauswaschung vermieden werden (Biskupek, 1998).

3.6.2 Phosphor, Kalium und Magnesium

Beim Kalium konnte festgestellt werden, dass nachwachsende Rohstoffe und Rindergülle meist größere Mengen davon mit sich bringen. Schweinegülle enthält, bedingt durch die pflanzenarme Ernährung der Tiere, einfach weniger davon. Mais und Grassilage enthalten viel Kalium und da Rinder Pflanzenfresser sind, enthält ihr Kot ähnliche Mengen an Kalium. Zusammenfassend kann aber die höhere Nährstoffmenge im Vergleich zu unvergorenen Güllen bei den Hauptnährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium festgestellt werden. Leider gibt es bei Gärresten große Schwankungen bezüglich der exakten Nährstoffmengen (Wörle, 2010).

Die Zufuhr von Magnesium, organischer Substanz und Kalk, die ebenso wichtige Aufgaben bei der Pflanzenversorgung einnehmen, ist mit einer Gärrestgabe von 30 t pro ha kaum gegeben. Die Kalkmenge und die Frachten an organischer Substanz aus Gärresten sind sogar so gering, dass sie mit zusätzlicher Erhaltungskalkung und Strohdüngung bzw. Zwischenfruchtanbau gedeckt werden müssen. Magnesium muss meist nicht zusätzlich gedüngt werden, obwohl mit der Düngung von Gärresten nur der Auswaschung der Magnesiumvorräte im Boden entgegengewirkt werden kann (Wörle, 2010).

3.6.3 Schwermetalle

Die Schwermetalle Kupfer und Zink kommen auf diluvialen Böden in Mecklenburg-Vorpommern oft nur in geringen Mengen vor. Daher ist der oft überschrittene Grenzwert für Kupfer und Zink in Gärresten eigentlich ein großer Vorteil. Denn in geringen Mengen dienen diese als essenzielle Spurennährstoffe. Die erhöhten Gehalte stammen meist aus Schweinegülle, da bei der Fütterung Kupfer und Zink zugesetzt werden. Die Grenzwerte für Schwermetalle sind durch die BioAbfV. geregelt. Sie werden jedoch in mg pro kg TM angegeben. Also 100 mg Cu pro kg TM und 400 mg Zn pro kg TM bei Ausbringungen von 20 t TM pro ha die über drei Jahre insgesamt ausgebracht werden. Da die Trockenmasse von Gärresten und die Ausbringungsmenge von durchschnittlich 30 m³ pro ha relativ gering ist, werden diese absoluten Grenzfrachten meist nie überschritten sondern eher weit unterschritten (Wörle, 2010).

3.7 Methoden zur Behandlung der Gärreste

Der Grund für die Behandlung des Gärrestes kann zum einen durch den Überfluss an anfallendem Gärrest entstehen oder durch das Fehlen ausreichender Böden auf denen eine

Düngung mit Gärresten erfolgen kann. Hat der Biogasanlagenbetreiber also keine Verwendungsmöglichkeit für seine anfallenden Mengen an Gärresten, so kann durch die Separierung die Transportwürdigkeit erhöht werden und damit ein gesteigertes Interesse an der Abnahme des Gärrestes erfolgen (Wörle, 2010). Man unterscheidet zwischen Teil- und Vollaufbereitung der Gärreste. Durch das Abtrennen der Feststoffe mit Hilfe meist physikalischer Verfahren entstehen eine feste und eine nährstoffreduzierte, flüssige Phase. Bis hierhin spricht man von einer Teilaufbereitung. Wird noch zusätzlich in nährstoffreiches Konzentrat und einleitfähige Flüssigphase getrennt, erfolgt eine Vollaufbereitung (Döhler, 2009).

3.7.1 Separieren

Eine Möglichkeit der Separierung besteht in der Anwendung der einfachen Feststoffabtrennung, bei der eine Pressschnecke, eine Siebtrommel oder ein Dekanter zum Einsatz kommen. Bei allen Methoden wird die feste Phase von der flüssigen Phase getrennt. Dabei werden aber auch die Nährstoffe voneinander separiert. Stickstoff und Phosphor, die in organisch gebundener Form vorkommen, verbleiben in der festen Phase, während der lösliche Stickstoff vorwiegend in der flüssigen Phase zurückbleibt. Die Festphase erreicht durch das Separieren Trockensubstanzgehalte von etwa 30 %. Der Trockensubstanzgehalt der flüssigen Phase wird auf etwa 3 % reduziert. Beide Phasen können noch weiter behandelt oder als Dünger aufgebracht werden. Die Feststoffphase sollte aber noch kompostiert werden, um enthaltene Unkrautsamen abzutöten und einer Geruchsentwicklung entgegen zu wirken. Anfallende Abwärme aus der Biogasanlage ist zum Beispiel für die Trocknung der kompostierten Festphase des Gärrestes nutzbar. Dabei erreicht dieser eine Trockensubstanz von etwa 80 % und kann problemlos gelagert und transportiert werden. Leider kommt es bei der Trocknung auch zur erhöhten Ammoniakausgasung und Geruchsentwicklung, was eine zusätzlich Abluftreinigung erforderlich macht. Zur weiteren Behandlung der flüssigen Phase eignet sich das Membranverfahren, um das Volumen zu verringern und gleichzeitig die Nährstoffkonzentration zu erhöhen. Dabei wird der Gärrest, der maximal 3 % TM besitzen sollte, um die Filter nicht zu schnell zu verstopfen, durch aufeinander folgende Filter mit abnehmender Porengröße geleitet. Anschließend trennt die Umkehrosmose das Permeat in ein mit Ammonium und Kalium angereichertes Konzentrat und in ein nahezu nährstofffreies Permeat. Das Retentat aus der Ultrafiltration ist angereichert mit Phosphor. Dieses und das Permeat aus der Umkehrosmose werden zusammengeführt, um die Nährstoffe wieder zusammen zu bringen. Bei diesem Verfahren wird letztendlich ein großer Teil

nährstofffreier Flüssigkeit aus dem Gärrest entfernt und damit die Nährstoffkonzentration drastisch erhöht (Wörle, 2010)

3.7.2 Eindampfen

Auch beim Eindampfen kann die Abwärme der Biogasanlage genutzt werden. Dieses noch nicht weit verbreitete Verfahren zur Erhöhung der Feststoffkonzentration, kann die Menge des Gärrestes um etwa 70 % reduzieren. Dabei wird das Material langsam im Vakuum erwärmt und dessen Temperatur in mehreren Stufen bis auf 90° C erhöht. Um die Ammoniakausgasung zu vermindern, erfolgt durch Säurezugabe eine Senkung des pH-Wertes (Wörle, 2010)

Die Feststoffphase wird in der Regel zu Kompost weiterverarbeitet. Der Wert dieses kompostierten Gärrestes kann bei etwa 40 € / t Feststoff liegen. Bislang ist leider nicht geklärt, ob die getrockneten Feststoffe aus der Separierung nach BImSchV. verbrannt werden dürfen. Dadurch entsteht hier eine Sackgasse für die Verwendungsmöglichkeit der Feststoffphase des Gärrestes. Offenbar scheint nur der Kompost einigermaßen gewinnbringend zu sein. Auch die Ausbringung auf den betriebsnahen Böden zur Verbesserung der Humusbilanz bietet sich an (Wörle, 2010).

Die Flüssigphase aus der Separierung hat im Vergleich zum unbehandelten Gärrest eine erhöhte Nährstoffkonzentration. Die Gehalte an Phosphor sind jedoch geringer. Dies kann aber wiederum Böden zugutekommen, die bereits ausreichende Mengen an Phosphor besitzen und auf denen keine weitere Phosphorbelastung zugelassen ist. Mit der Transportwürdigkeit von mineralischen Düngern kann es die Flüssigphase des separierten Gärrestes jedoch nicht aufnehmen. Lediglich die Produkte, die bei der Abluftreinigung entstehen, sind mit ähnlich viel Stickstoff angereichert. Vor allem beim Verfahren der Strippung, bei dem Gas durch den flüssigen Gärrest geleitet wird, entsteht eine sehr stickstoffhaltige Lösung. Im Gas reichert sich dabei Ammoniak an und durch die anschließende Kondensation entsteht das mit Ammoniumsulfat aufkonzentrierte Wasser. Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die Aufbereitung der Gärreste nur lohnt, wenn entsprechende Abnehmer für die verschiedenen Produkte gefunden werden und die Transportwege dabei relativ kurz bleiben. Die Methoden Eindampfung und Strippung sind noch jung und technisch nicht ausgereift. In Zukunft ist aber auch hier von einer verbesserten Trennung von Nährstoffen auszugehen. Zumindest muss ein Weg gefunden werden, die anfallenden nährstoffarmen Flüssigkeiten einleitfähig zu machen. Bis

jetzt können die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte, die ein Einleiten der Flüssigkeiten gewährleisten sollen, bei beiden Verfahren nicht eingehalten werden (Wörle, 2010).

Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der Nährstoffe nach der entsprechenden Methode zur Gärrestaufbereitung.

Aufbereitungsart		Massen- anteil %	N _{org}	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		kg/t				
Ohne Aufbereitung	flüssig	-	2,0	3,6	2,1	6,2
	fest	12	4,9	2,6	5,5	4,8
Separierung	flüssig	88	1,6	3,7	1,6	6,4
	fest	5	13,3	0,7	14,9	12,9
Bandrockner	flüssig	88	1,6	3,7	1,6	6,4
	Abluft	8	-	-	-	-
	fest	19	4,9	4,4	6,8	4,5
Membran	flüssig	37	2,8	7,4	2,1	14,4
	Abwasser (gereinigt)	44	Grenzwerte zur Direkteinleitung in Vorfluter erreicht			
	fest	19	4,9	4,4	6,8	4,5
Eindampfung	flüssig	31	3,4	8,9	2,5	17,3
	Prozesswasser	50	nicht geeignet zur Einleitung in Vorfluter			
Strippung	fest	27	6,8	3,5	7,5	21,7
	flüssig (ASL) ²⁾	3	0,0	80,6	0,0	0,0
	Prozess- wasser	70	nicht geeignet zur Einleitung in Vorfluter			

²⁾ ASL: Ammoniumsulfatlösung.

Abb. 7: Nährstoffverteilung durch Gärrestaufbereitung (Döhler, 2009)

3.8 Der Gärrest als Wirtschaftsdünger

Die Ausbringung von Gärresten ist, soweit lediglich Wirtschaftsdünger und nachwachsende Rostoffe vergoren wurden, durch die DümV geregelt. Denn diese Gärreste werden genau wie Wirtschaftsdünger behandelt. Die Handhabung und Anwendung der Gärreste ist in der DüV geregelt. Diese gilt auch wenn die Gärreste an andere Betriebe abgegeben werden. Bei der Übergabe muss außerdem eine Deklaration mit Angaben zum Nährstoffgehalt mitgegeben werden (Gruber, 2004).

Vergorene Gülle besitzt eine gleichmäßigere Struktur, die durch den Abbau der organischen Substanz bedingt ist. Dadurch weisen die Gärreste ein besseres Fließverhalten auf, welches sich positiv auf die Ausbringungstechnik auswirkt. Es kommt dabei zu weniger Verstopfungen an Maschinenteilen. Die Gärsubstrate gelangen leichter in den Boden und fließen schneller von Blattflächen, was die Verätzungsgefahr verringert (Biskupek, 1998). Die Ausbringung von 30 t eines durchschnittlichen Gärrestes pro ha ergibt ausreichende Nährstoffgaben für die meisten Kulturarten. Werden lediglich Getreiden angebaut, ergibt sich langfristig sogar eine Anreicherung von Kalium. Die Düngung mit Gärresten wird aber durch die Versorgungsgruppe des Bodens mit Nährstoffen begrenzt. Gärreste dürfen nicht ausgebracht werden, wenn die Versorgungsgruppe E bei Kalium und Phosphor bereits erreicht wurde. Ist der Boden mit der Versorgungsgruppe D gekennzeichnet worden, dürfen noch 50 % des Düngebedarfs mit Gärresten gedeckt werden (Wörle, 2010). Maiskörner enthalten pro Tonne Trockenmasse etwa 16 kg Stickstoff, 3 kg Phosphor, 4 kg Kalium und 2 kg Magnesium. Die zur Produktion von Mais notwendigen Nährstoffmengen können durch den Gärrest zur Verfügung gestellt werden. Auf einen Hektar sollen zur Erreichung optimaler Erträge 160 - 200 kg Stickstoff, 35 - 55 kg Phosphor, 125 - 170 kg Kalium und 25 - 35 kg Magnesium ausgebracht werden. Diese Mengen sind mit Gärresten zwar vor allem für Stickstoff nicht vollständig zu erreichen, aber zu einem großen Teil kann damit die mineralische Düngung reduziert werden (Kaltschmitt, 2009). Unvergorene Gülle enthält natürlich entscheidend mehr organische Substanz, die die Humusbilanz des Bodens verbessert. Diese wird jedoch im Vergärungsprozess zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Außerdem in geringeren Anteilen noch zu Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Sauerstoff. Durch den Abbau von organischer Substanz entstehen aber auch eine verbesserte Fließfähigkeit und damit ein schnelleres Eindringen in den Boden. Diese Eigenschaft kann bei Ausnutzung der technologisch optimierten Ausbringung des Gärrestes, zu einer Verringerung der Ammoniakausgasung führen. Die N-Verluste werden durch überflüssiges Rühren und andere Maßnahmen, die den Gärrest in Bewegung bringen, und erhöhte Temperaturen verstärkt. Die Ausbringung sollte daher an einem kühlen Tag und mit so wenig Bewegung wie möglich erfolgen. Dabei ist jedoch die Sperrfrist der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern von November bis Januar zu berücksichtigen. Allgemein kann man aber eine verbesserte Pflanzenverträglichkeit beobachten, da viele ätzende organische Säuren während des Vergärungsprozesses abgebaut wurden (Wörle, 2010).

4. Methode und Ergebnisse

Zur Bestimmung eines Zusammenhangs zwischen der Trockensubstanz der Gärreste und den vermutlich proportional dazu ansteigenden Nährstoffgehalten wird der Korrelationskoeffizient r berechnet. Dieser liegt zwischen 0 und 1 und sagt aus, wie nah die einzelnen Punkte einer Punktwolke im Koordinatensystem an einer durch diese Wolke gezogenen Kurve liegen. Ein Korrelationskoeffizient von 0 gibt an, dass keine Korrelation vorliegt und ein Korrelationskoeffizient von genau 1 würde bedeuten, dass alle Punkte genau auf der Kurve liegen. In den folgenden Diagrammen, die mit Excel angefertigt wurden, ist das Bestimmtheitsmaß in R^2 angegeben. Dieser entsteht aus dem Quadrieren des Korrelationskoeffizienten r und wird in der Literatur auch in B angegeben. Außerdem ist er immer kleiner als r , liegt aber auch zwischen 0 und 1. Das Bestimmtheitsmaß von 0,8 würde zum Beispiel aussagen, dass 80 % der Veränderung des Nährstoffgehaltes aus der Veränderung der Trockensubstanz resultieren. Da die beiden Maßzahlen r und R^2 nur etwas über den Grad des Zusammenhangs aussagen und nicht die Ursache für die Korrelation beinhalten, muss eine individuelle Interpretation und eine zusätzliche Begründung für die Auswahl bestimmter Daten erfolgen. Wenn beispielsweise zunächst alle zur Verfügung gestellten Gärreste zur Analyse der Korrelation von TS-Gehalt zu Nährstoffgehalt verwendet werden, ist eine geringere Korrelation zu erwarten als bei der Berücksichtigung weiterer Parameter, wie dem eingesetzten Substrat. Bei der Einteilung in verschiedene Substratklassen wie „Nur Mais ohne Gülle“, oder „Mais & Rind“ verwendet, kommt es zu einer Einengung des TS-Bereiches. Demnach kann man auch nur für diesen Bereich gewisse Empfehlungen geben. Das heißt, wenn man aus den Ergebnissen der Regressionsanalyse weitere Auswertungen bezüglich einer Düngeempfehlung oder der Ermittlung eines Wertes für Gärreste ableitet, können diese maximal für diesen eingegrenzten Bereich gelten (Köhler, 2002).

Zunächst werden immer alle Daten zusammen analysiert, um die Unterschiede der jeweiligen Methode zur Einteilung in gewisse Substratkategorien deutlicher zu machen. Desweiteren gibt es eine Vielzahl von Gärresten die konzentriert oder die zu Presskuchen verarbeitet wurden. Diese Daten sollen bei einer weiteren Durchführung der Korrelation zwischen Trockensubstanz und Nährstoffgehalt aus der Datenreihe entfernt werden. Wie bereits in Punkt 3.7 zur Behandlung von Gärresten erwähnt wurde, kommt es bei der Aufbereitung von Gärresten teilweise zu einem Verlust gewisser Nährstoffe, vor allem von Stickstoff durch die Ammoniakausgasung. Die Nährstoffe werden dabei zu unterschiedlichen Anteilen in die feste und flüssige Phase verteilt.

Die Korrelation zur Trockensubstanz kann dadurch beeinflusst werden. Dieser Unterschied soll, soweit es möglich ist, durch die statistische Auswertung deutlich gemacht werden. Die Presskuchen und Konzentrate sind entweder in der Deklaration der Analysedaten, die die LUFA für jede Gärrestprobe anfertigt, gekennzeichnet oder zeigen sich durch ihren stark veränderten Trockensubstanzgehalt. Die meisten unbehandelten Gärreste besitzen einen Trockensubstanzgehalt der zwischen 3 und 12 % liegt. Logisch betrachtet, können aber auch separierte Gärreste zur Ermittlung der Korrelation zwischen Trockensubstanz und Nährstoffgehalt bei Phosphor und Magnesium aufgenommen werden, da diese Nährstoffe vermutlich eine stärkere Bindung zur Trockensubstanz aufweisen. Dies soll analysiert werden. Alle Abbildungen stammen aus den dazu angefertigten Exceltabellen, die der Arbeit im Anhang beigelegt sind. Da diese sehr umfangreich sind, befinden sie sich auf einer beigelegten CD. Es können mit Hilfe der vorliegenden Deklarationen der LUFA insgesamt vier Substratkategorien gebildet werden. Für die erste Kategorie werden die Nährstoffkurven aller Gärreste verwendet. Danach sollen alle Deklarationen, bei denen Maissilage und Rindergülle, aber keine Schweinegülle verwendet wurde, analysiert werden. Die dritte Kategorie beinhaltet alle Nährstoffdaten, die aus Deklarationen stammen, bei denen ausschließlich Maissilage und keine Gülle verwendet wurde. Denkbar wäre noch die Einteilung in Gärreste, bei denen mindestens 50 % Rindergülle als Substrat verwendet wurde. Insgesamt trifft dies aber nur auf 16 Deklarationen der LUFA zu. Die Korrelationen der Nährstoffkurven sind zu gering, um den Einfluss von Rindergülle auf die Nährstoffzusammensetzung allein beurteilen zu können. Bei Schweinegülle ist das ähnlich zu bewerten. Darum soll wie bei „Mais & Rind“ eine Kategorie gebildet werden, in der nur die Gärreste fallen, deren Substratzusammensetzung aus Schweinegülle und Maissilage besteht.

4.1 Verwendung aller Gärrestdaten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Korrelationen von Trockensubstanz zu Nährstoffgehalt für sämtliche Daten, die aus den Deklarationen übernommen wurden. Dabei wurden 151 TS-Gehalte den dazugehörigen Nährstoffgehalten von Stickstoff, Phosphoroxid, Kaliumoxid und Magnesiumoxid zugeordnet und die Regressionsanalyse durchgeführt. In der folgenden Abbildung ist nun die Korrelation von der Trockensubstanz zum Stickstoffgehalt zu erkennen.

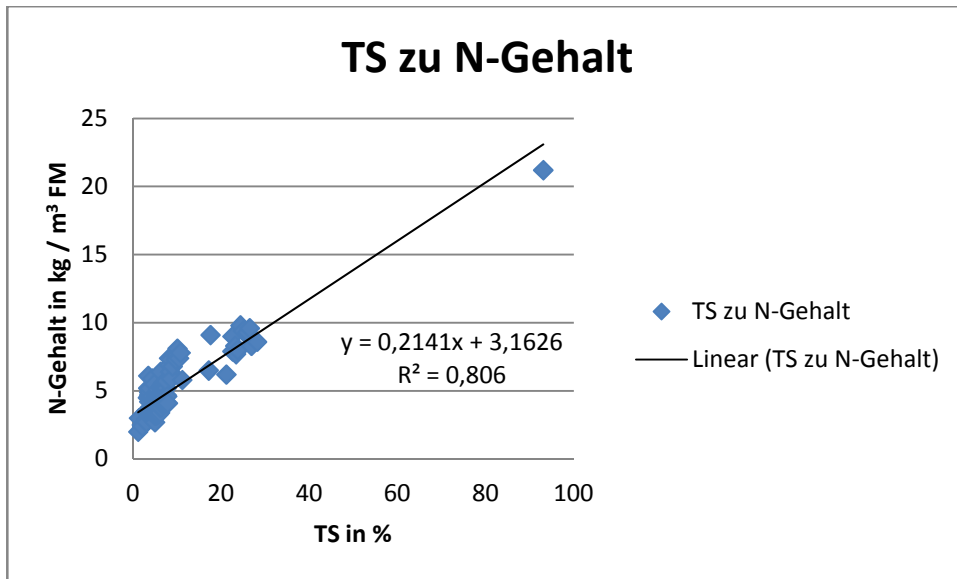


Abb. 8: Korrelation von TS zu N-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

In der nächsten Abbildung ist der TS-Bereich auf 3 - 12 % eingengt. Das soll den Bereich kennzeichnen, in dem Gärreste weitestgehend unbehandelt sind. In diesem Bereich liegen auch die meisten der gesammelten Daten. Zu erkennen ist eine Wolkenbildung, wodurch sich die Korrelation stark verschlechtert.

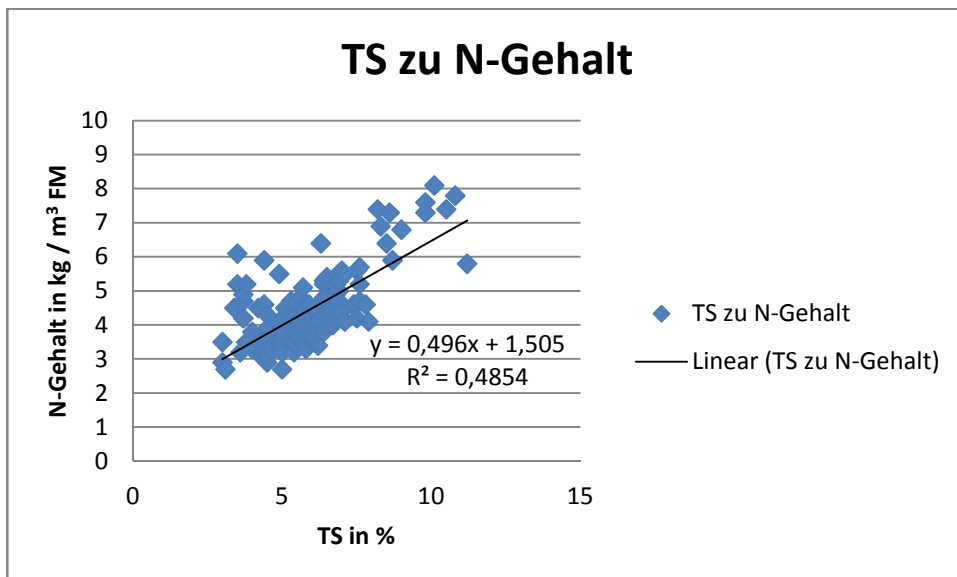


Abb. 9: Korrelation von TS zu N-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

In der nächsten Abbildung zur Korrelation von TS-Gehalt zu P_2O_5 -Gehalt ist die Korrelation im Vergleich zum Stickstoff etwas besser.

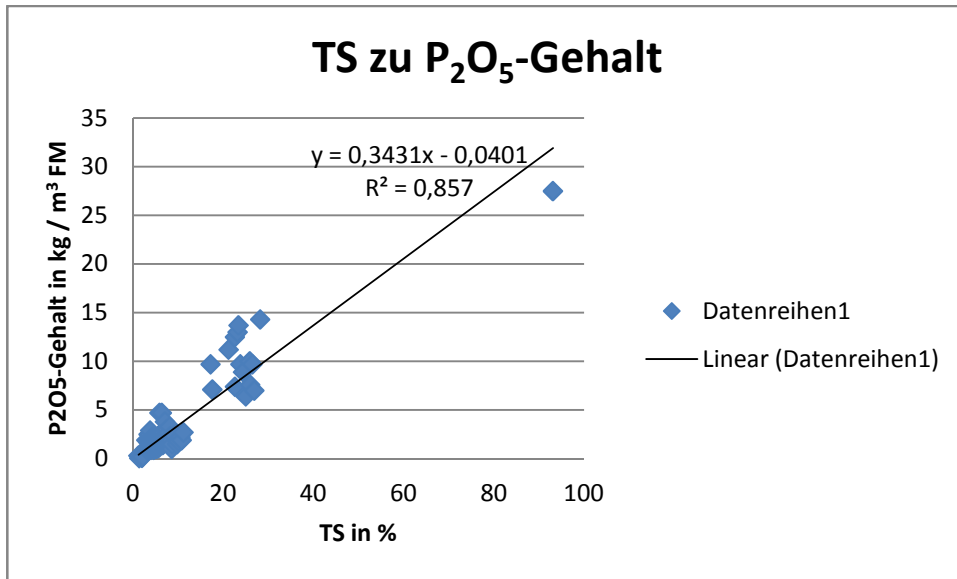


Abb. 10: Korrelation von TS zu P_2O_5 -Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

Die Korrelation sinkt jedoch wieder drastisch, wenn man sich den Bereich der eingengten Trockensubstanz ansieht. Die Korrelation ist geringer als beim Stickstoff der ebenfalls im TS-Bereich 3 - 12 % liegt.

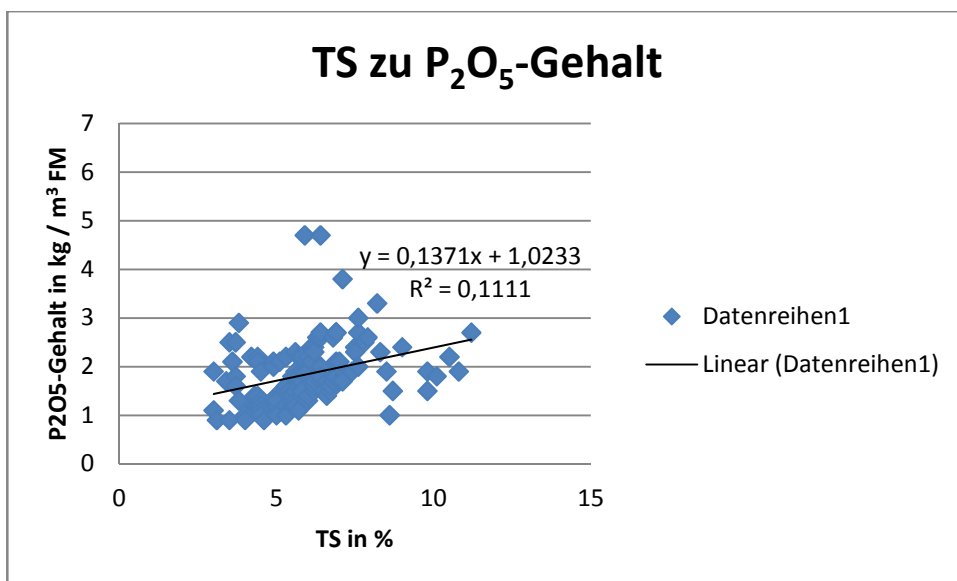


Abb. 11: Korrelation von TS zu P_2O_5 -Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

Bei Kalium ist die Korrelation eher im Ganzen betrachtet gering und im TS-Bereich von 3 - 12 % höher, wie der Vergleich der beiden folgenden Abbildungen zeigt.

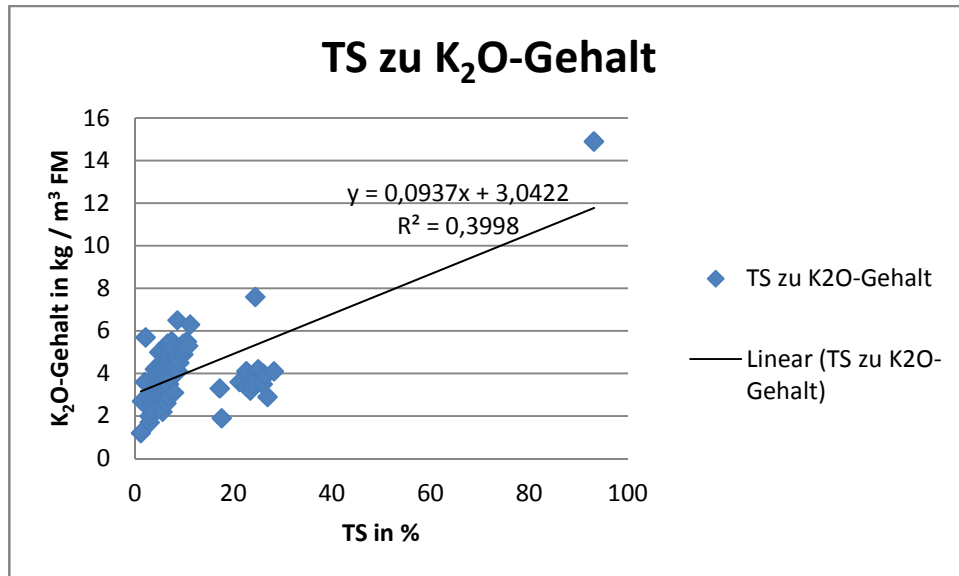


Abb. 12: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

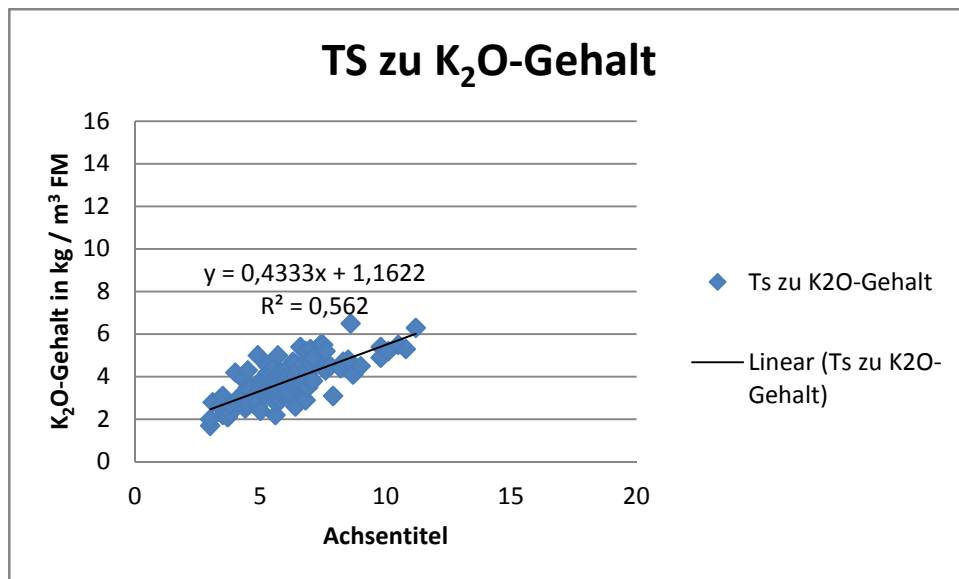


Abb. 13: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

Bei Magnesium ist es dann wieder so, dass die Korrelation des gesamten TS-Bereiches höher ist als die Korrelation des zwischen 3 und 12 % eingegengten.

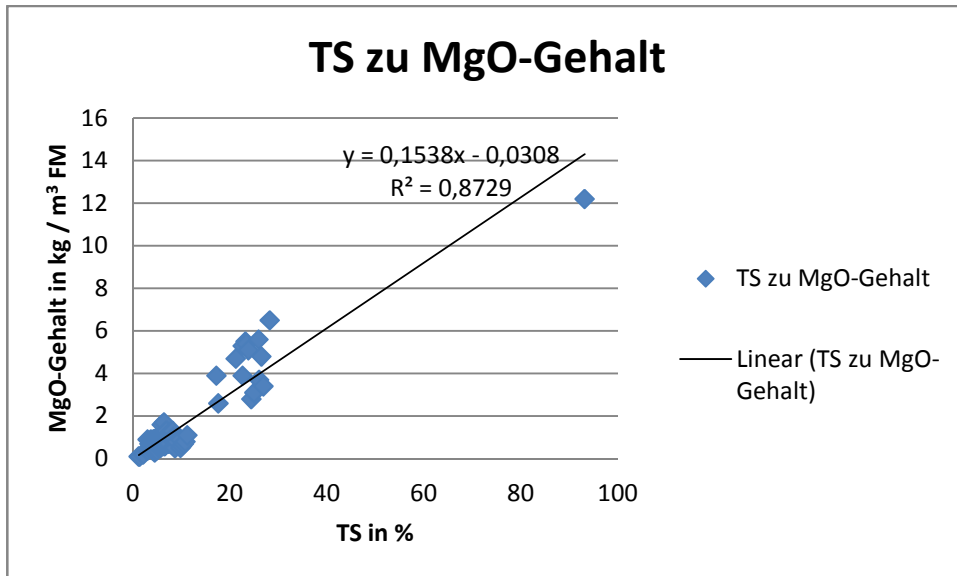


Abb. 14: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

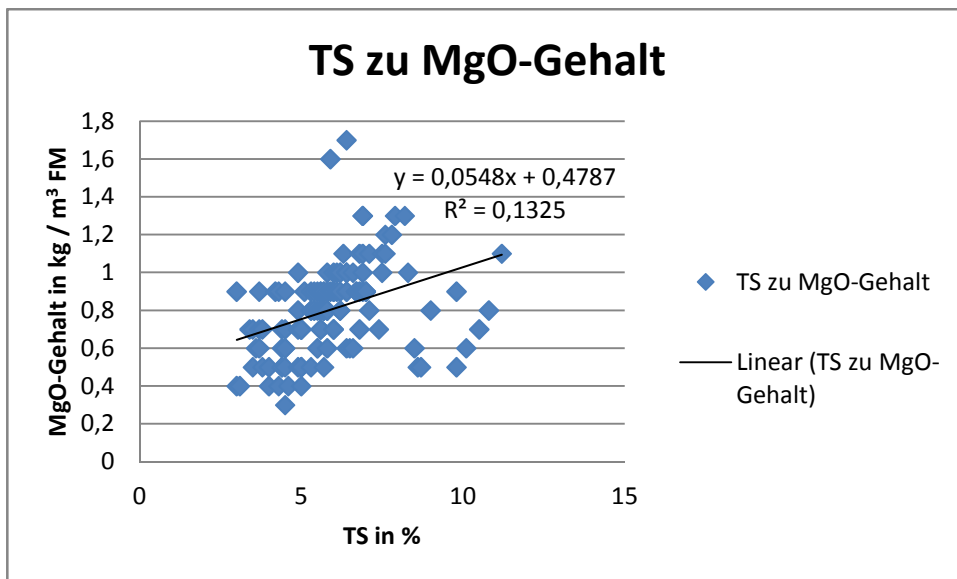


Abb. 15: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)

4.2 Verwendung von Maissilage und Rindergülle

In dieser Tabelle ist die Korrelation zwischen TS und N-Gehalt dargestellt, die bei Verwendung aller Gärrestdaten entsteht, bei denen nur Maissilage und/oder Rindergülle und auf jeden Fall keine Schweinegülle verwendet wurde.

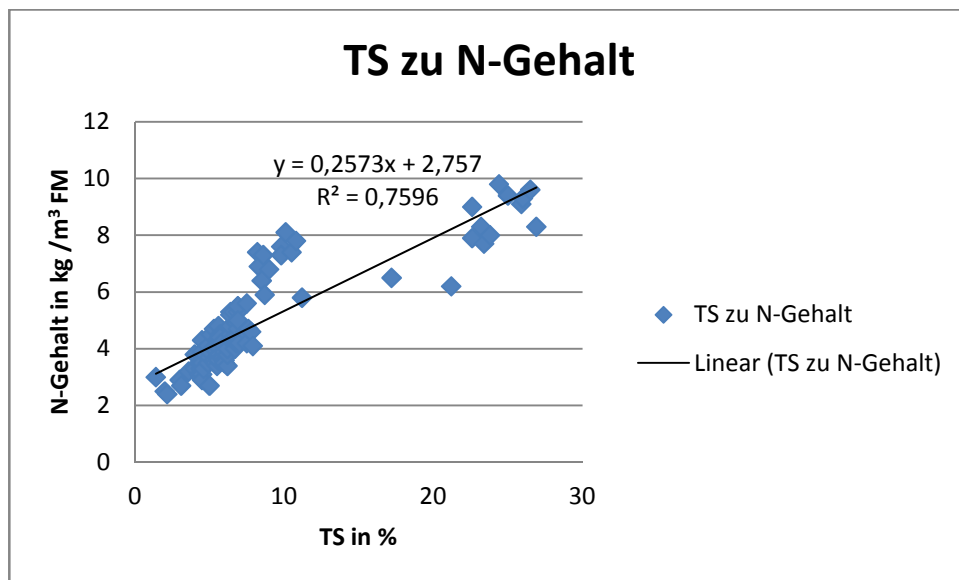


Abb. 16: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Hier ist auch der unproportionale Anstieg der N-Gehalte bei Zunahme der Trockensubstanz zu beobachten. Aufbereitete Gärreste, bei denen die Trockensubstanz aufkonzentriert wurde, können proportional weniger Stickstoff enthalten, weil es bei der Separierung der Gärreste zu einem teilweisen Verlust von Stickstoff in Form von Ammoniakausgasung kommt. Betrachtet man nur den Trockensubstanzbereich der unbehandelten Gärreste, kann eine verbesserte Korrelation beobachtet werden, wie in folgender Tabelle dargestellt ist. Hier wurde der Trockensubstanzbereich auf 3 bis 12 % eingengt. Vergleicht man diese Abbildung mit der in Punkt 4.1 dargestellten Abbildung zur Korrelation von Trockensubstanz zu N-Gehalt im TS-Bereich von 3 - 12 %, ist hier nun eine verbesserte Korrelation festzustellen.

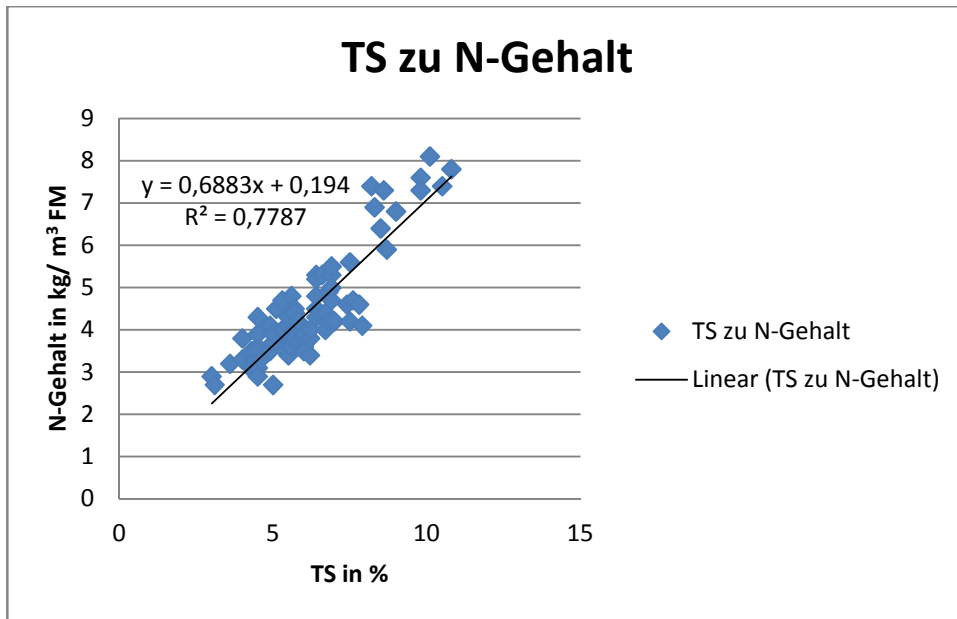


Abb. 17: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Bei Phosphor wird ein eingengter TS-Bereich von 3 - 12 % zu einer Verschlechterung der Korrelation führen. Bei separierten Gärresten kommt es kaum zu Verlusten von Phosphor. Sie besitzen also für den gesamten TS-Bereich ein hohes Bestimmtheitsmaß.

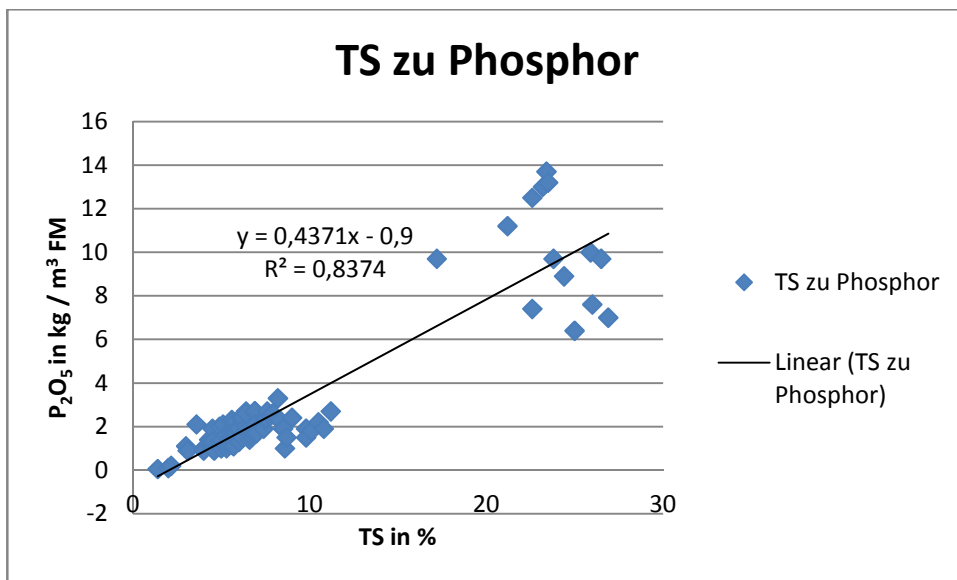


Abb. 18: Korrelation von TS zu P₂O₅ Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

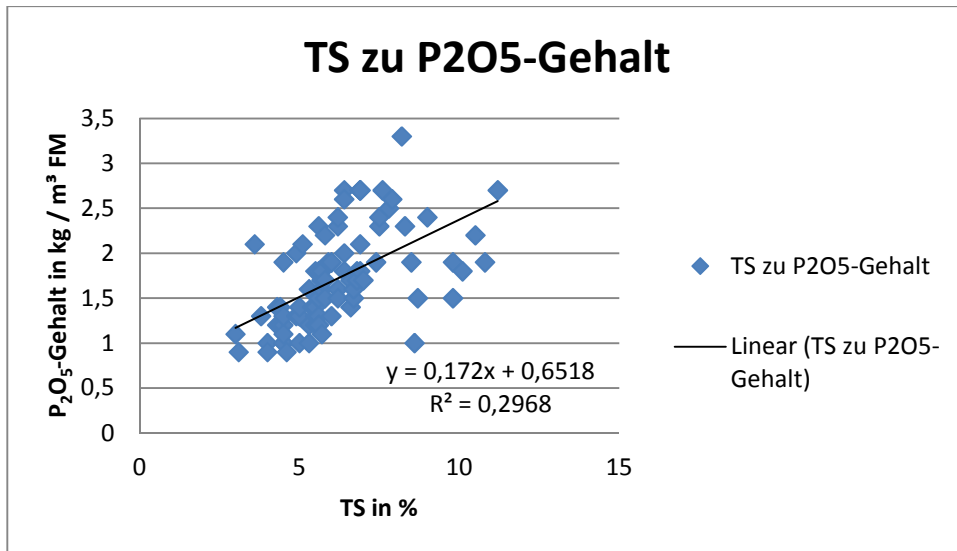


Abb. 19: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Die Korrelation kann wieder verbessert werden, wenn die Punkte, die mehr als 8 % TS besitzen, gestrichen werden und die unter 3 % wieder eingegeben werden. Daraus ergibt sich der TS-Bereich von 1 - 8 %, in dem eine bessere Korrelation erreicht wird als in dem TS-Bereich von 3 - 12 %.

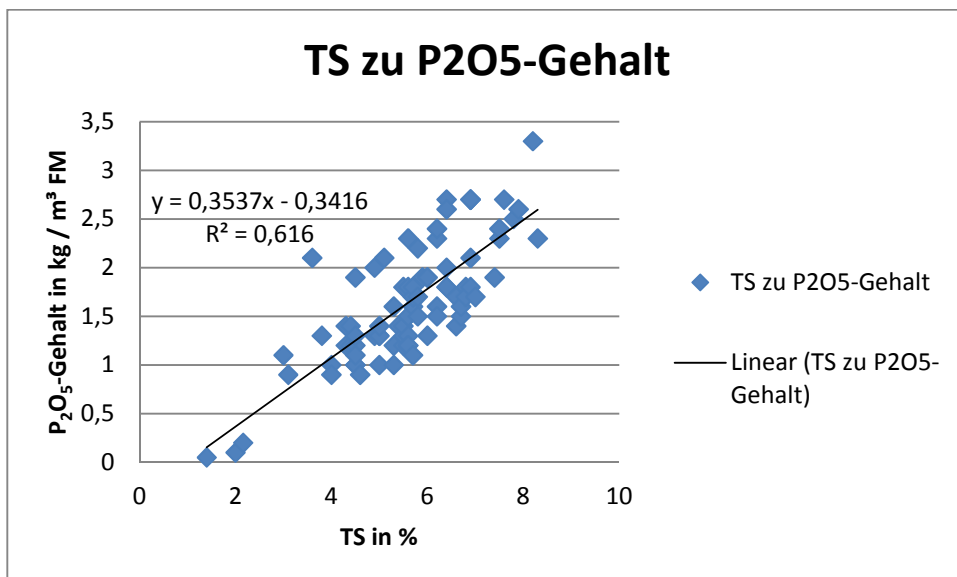


Abb. 20: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

In der folgenden Abbildung ist die Korrelation von Trockensubstanz zu K_2O -Gehalt dargestellt.

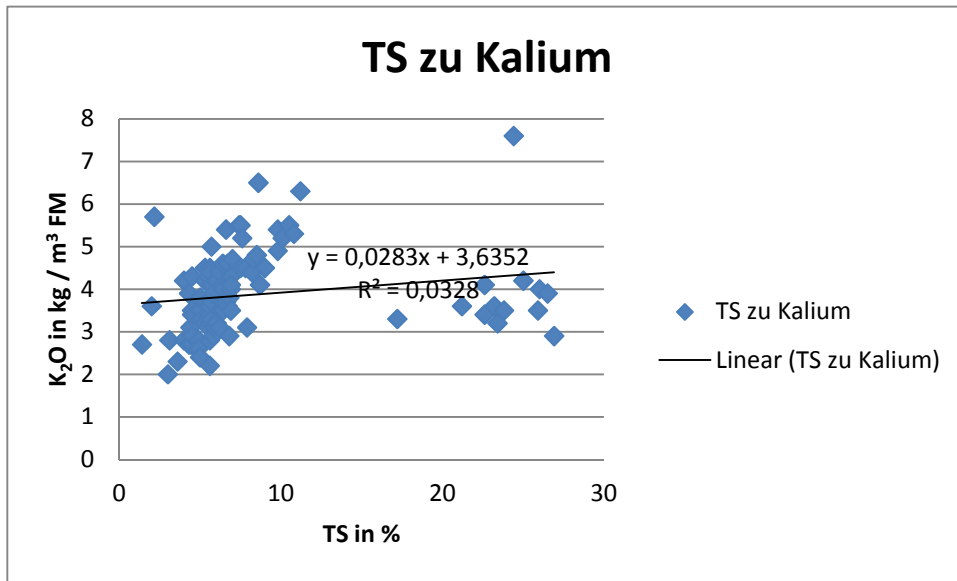


Abb. 21: Korrelation von TS zu K_2O -Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Da es bei der Separierung zu einem Verlust von Kalium kommen kann, ist dessen Konzentration mit steigender TS nicht erhöht. Grenzt man den TS Bereich, wie in folgender Tabelle, auf 3 bis 12 % ein, verbessert sich die Korrelation deutlich. Das kann auf die gleichmäßigere Verteilung der Kaliumgehalte bei unbehandelten Gärresten zurückgeführt werden.

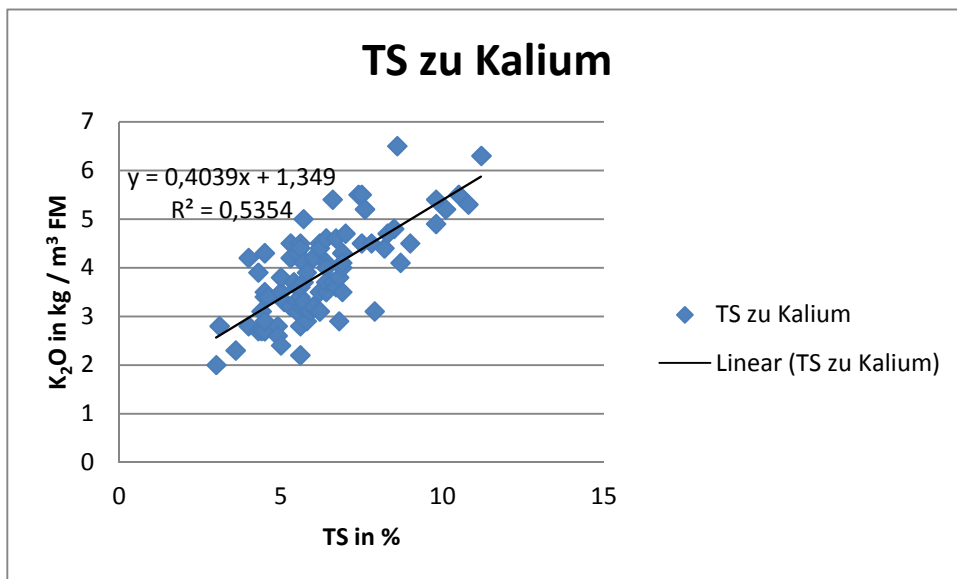


Abb. 22: Korrelation von TS zu K_2O -Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Für Magnesium ergibt sich die gleiche Darstellung wie für Phosphor. Auch hier verbessert sich die Korrelation bei Berücksichtigung des gesamten TS-Bereiches.

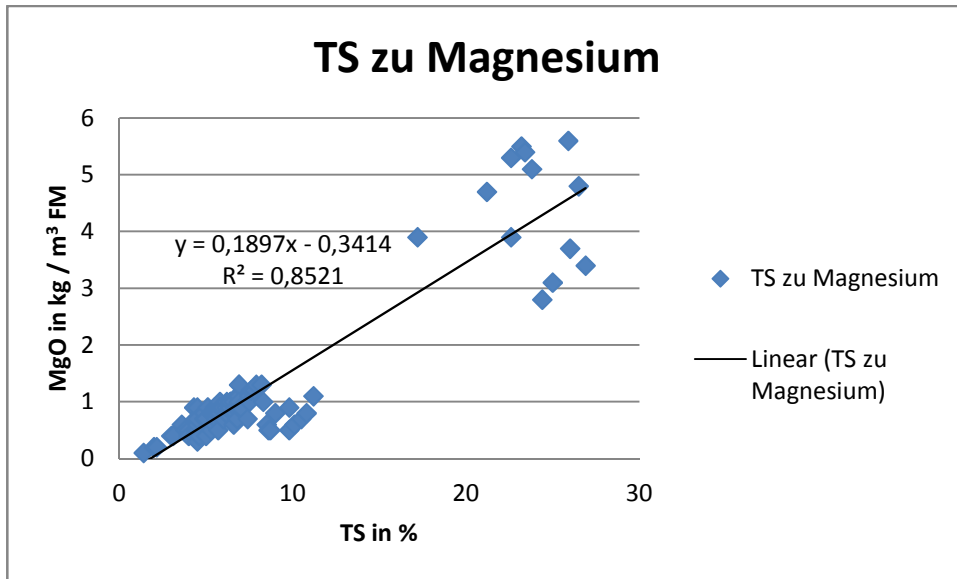


Abb. 23: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Ist der TS-Bereich auf 3 - 12 % eingengt, ergibt sich wie bei den P₂O₅-Gehalten eine deutliche Verringerung des Bestimmtheitsmaßes. Sobald eine Trockensubstanz von 8 % und mehr erreicht wird, scheinen sich die Punkte von der eigentlichen Kurve zu entfernen.

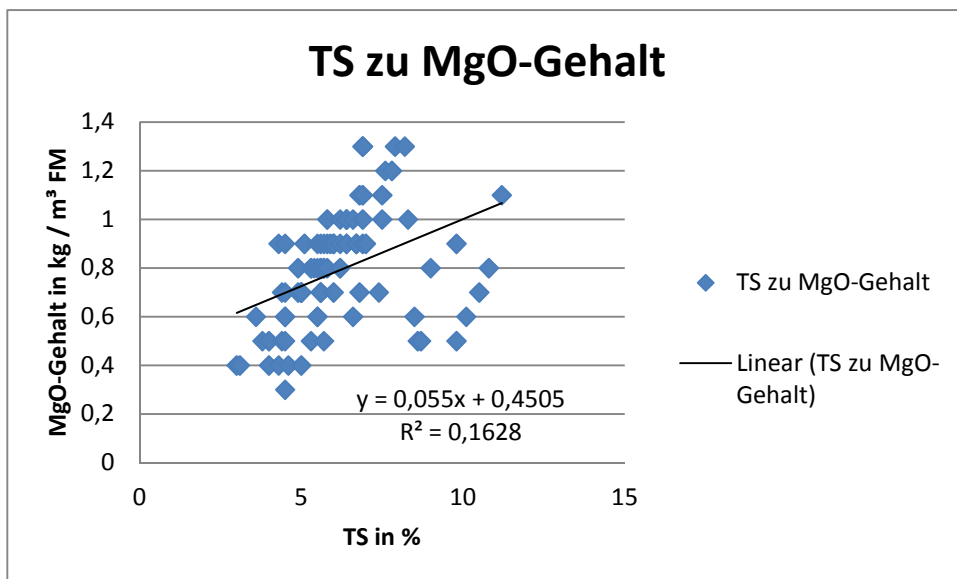


Abb. 24: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Durch eine erneute Veränderung des TS-Bereiches zu 1 - 8 % wird wieder eine bessere Korrelation erreicht. Deren Formel der Korrelationskurve ähnelt wieder sehr der Formel der Korrelationskurve aus der Beobachtung des gesamten TS-Bereiches.

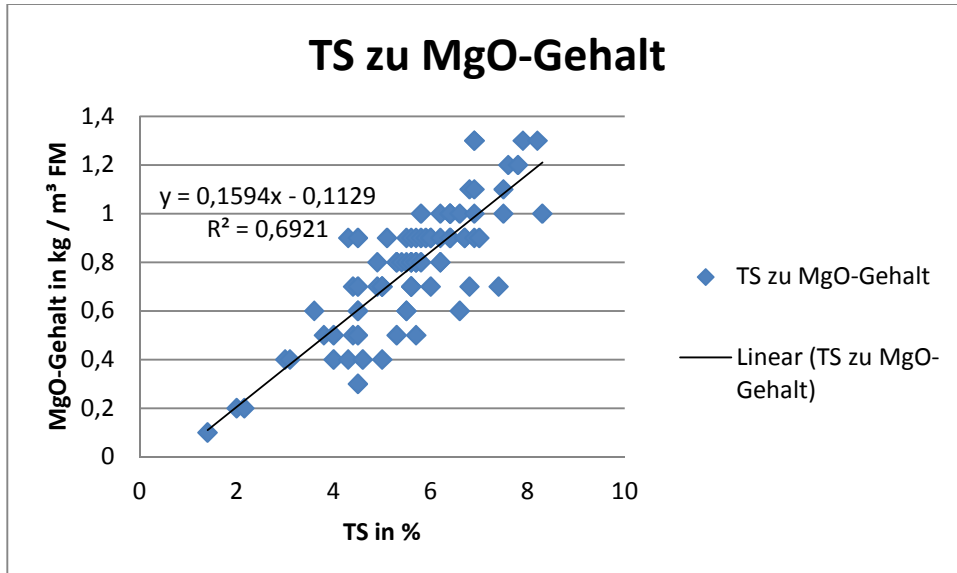


Abb. 25: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

4.3 Verwendung von Maissilage ohne Gülle

Für die nun folgenden Abbildungen wurden nur die Daten der Gärreste verwendet, bei denen ausschließlich nachwachsende Rohstoffe und davon mindestens 79 % Maissilage als Substrat verwendet wurden. Für die statistische Analyse sind dabei 48 der Deklarationen in Frage gekommen.

Die Korrelation von TS zu N-Gehalt ist für den gesamten TS-Bereich bereits relativ gut.

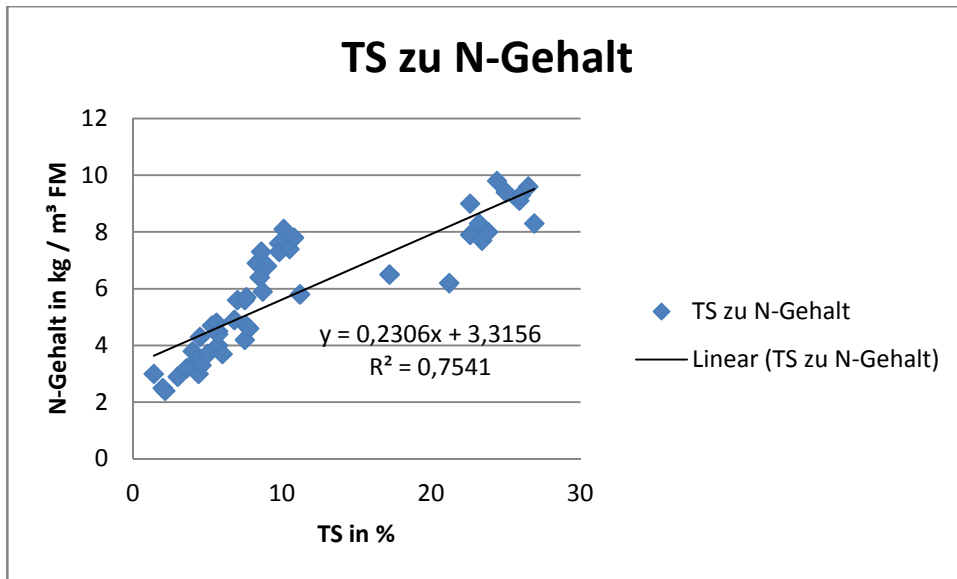


Abb. 26: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Durch die Einengung des TS-Bereiches auf 3 - 12 % verbessert sich das Bestimmtheitsmaß noch etwas.

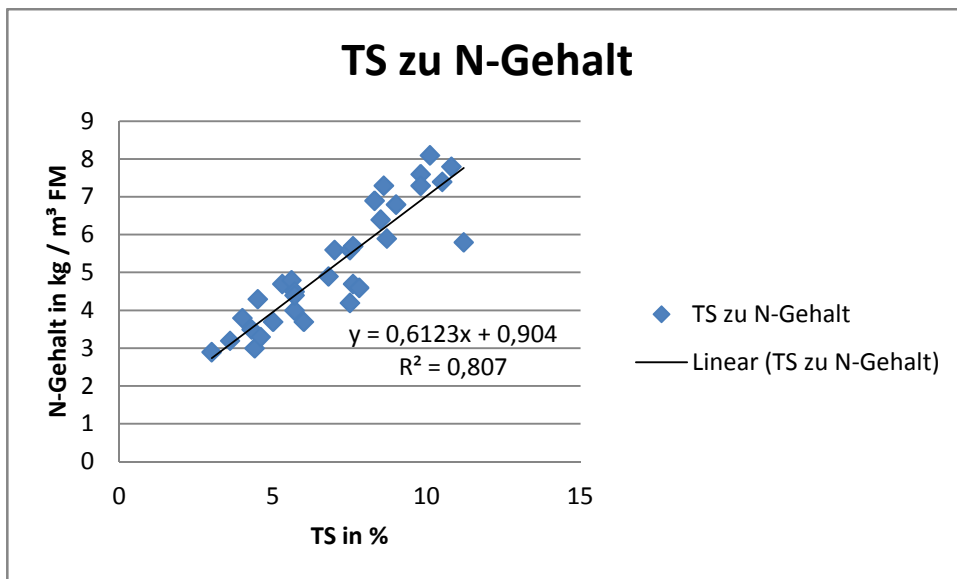


Abb. 27: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Die Phosphorgehalte korrelieren über den gesamten TS-Bereich sehr gut.

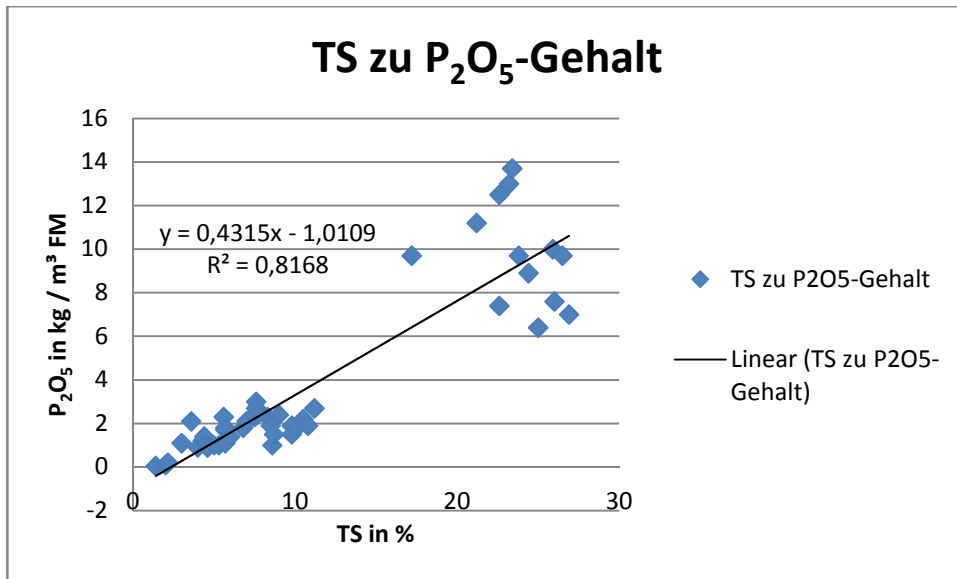


Abb. 28: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Es fällt jedoch wieder auf, dass eine starke Verringerung der Korrelation durch die Verwendung eines eingengten TS-Bereiches von 3 - 12 % entsteht.

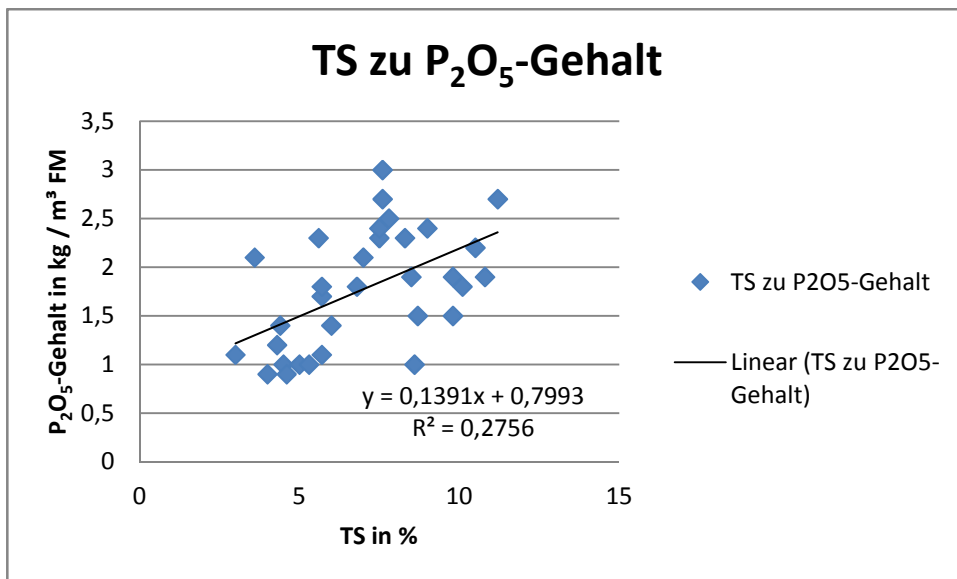


Abb. 29: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Wenn der TS-Bereich auf 1 - 8 % verändert wird, verbessert sich die Korrelation wieder.

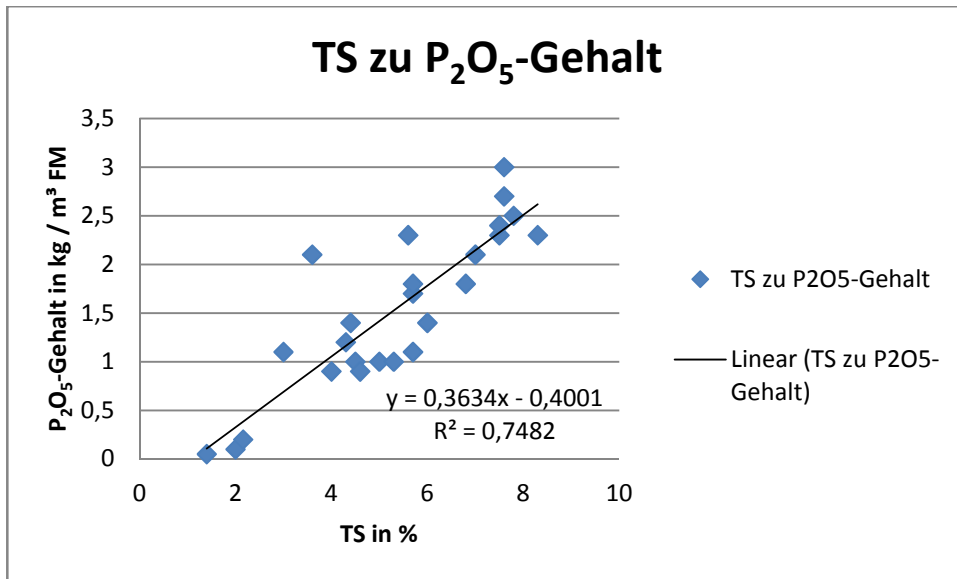


Abb. 30: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Bei Kalium ist wieder stark zu erkennen, dass über den gesamten TS-Bereich absolut keine Korrelation vorliegt.

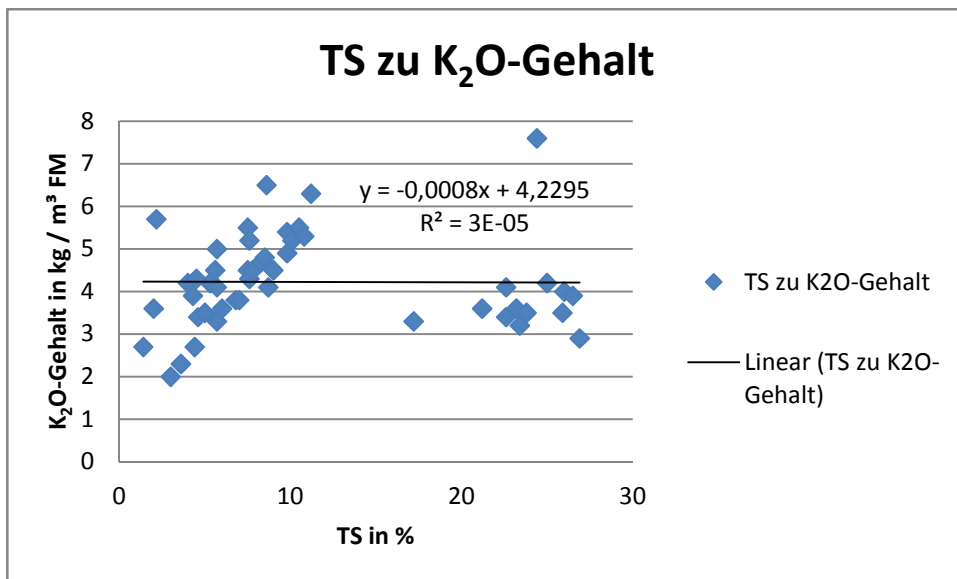


Abb. 31: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Wird der TS-Bereich auf 3- 12 % eingengt, erfolgt wieder eine verbesserte Korrelation.

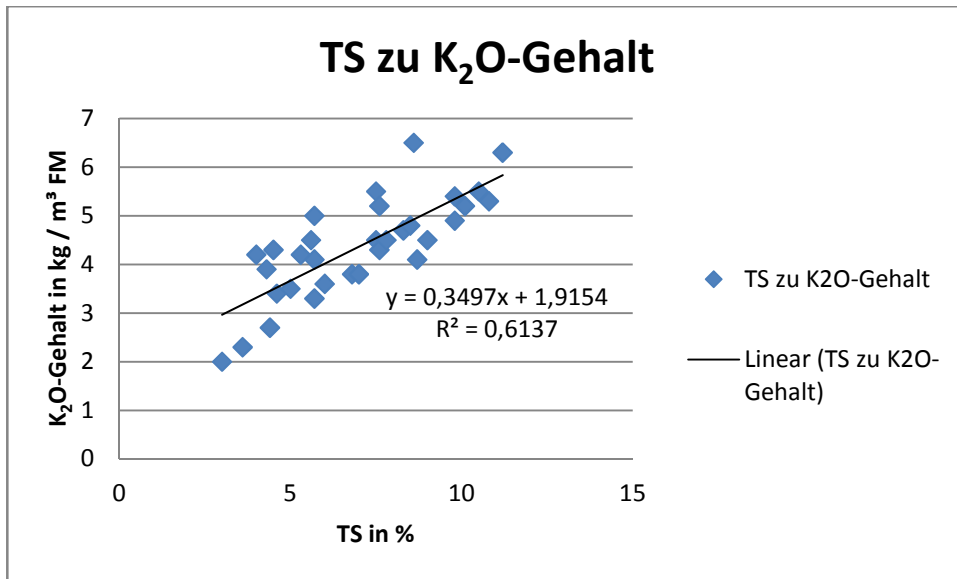


Abb. 32: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Magnesium verhält sich in der Regressionsanalyse wie Phosphor. Über den gesamten TS-Bereich ist die Korrelation sehr gut.

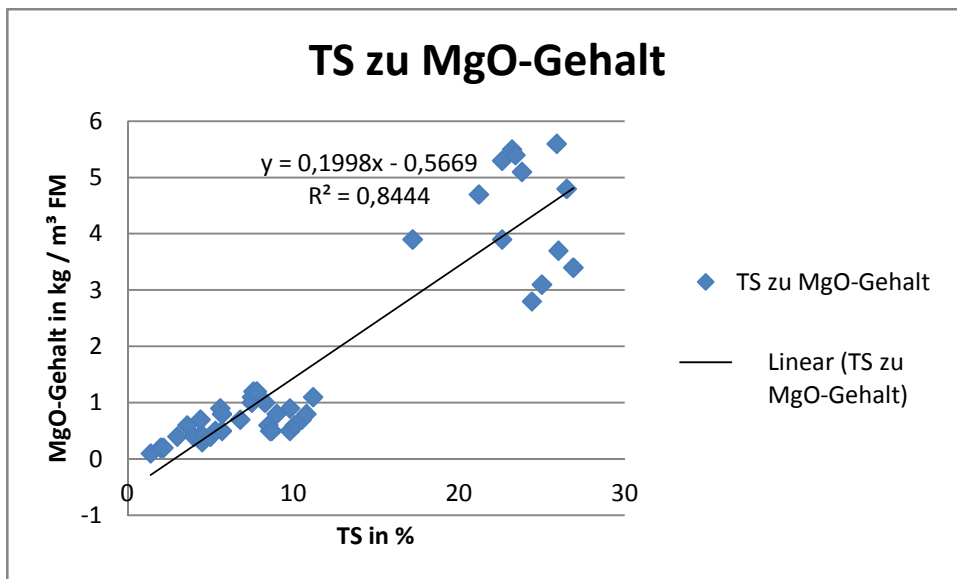


Abb. 33: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Wird der TS eingengt auf 3 - 12 %, sinkt das Bestimmtheitsmaß jedoch stark.

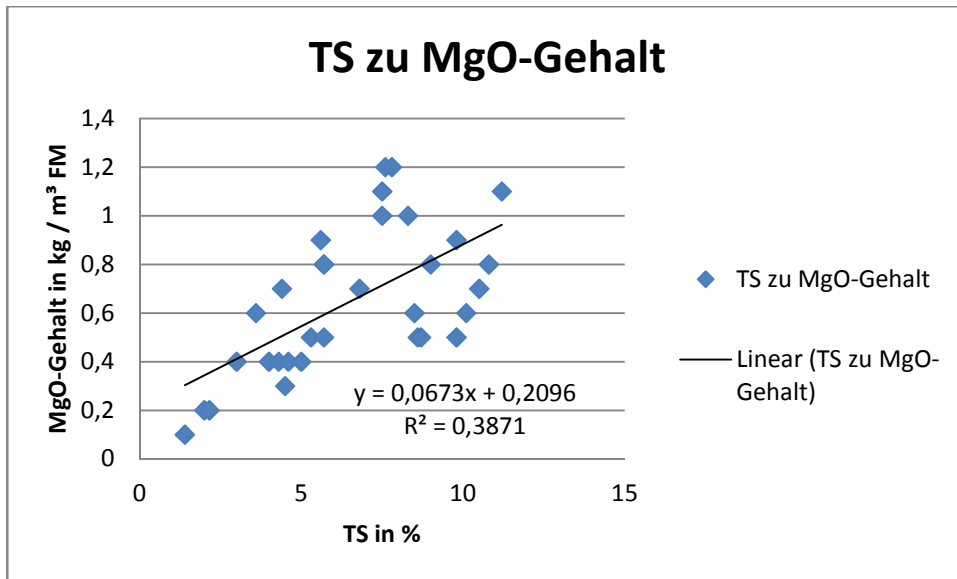


Abb. 34: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Durch eine erneute Veränderung des TS-Bereiches erfährt die Korrelation eine deutliche Verbesserung. Für weitere Anwendungen der Korrelationsgeraden kann diese jedoch maximal für den gewählten TS-Bereich von 1 - 8 % gültig sein.

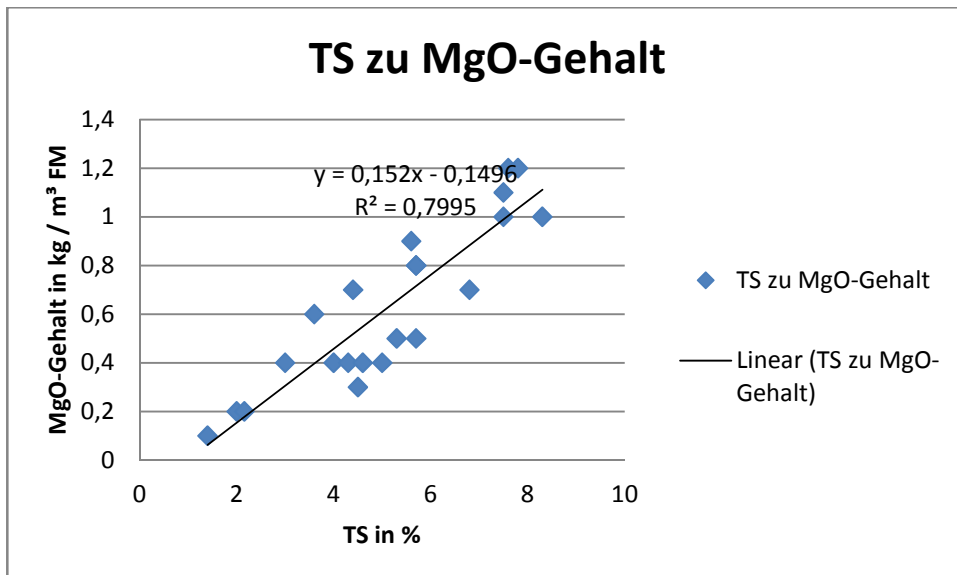


Abb. 35: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

4.4 Verwendung von Maissilage und Schweinegülle

Die Daten aus denen die folgenden Abbildungen erstellt wurden, schließen alle Gärreste ein, die lediglich aus Maissilage und Schweinegülle bestehen. In diese Kategorie fielen 22 Deklarationen.

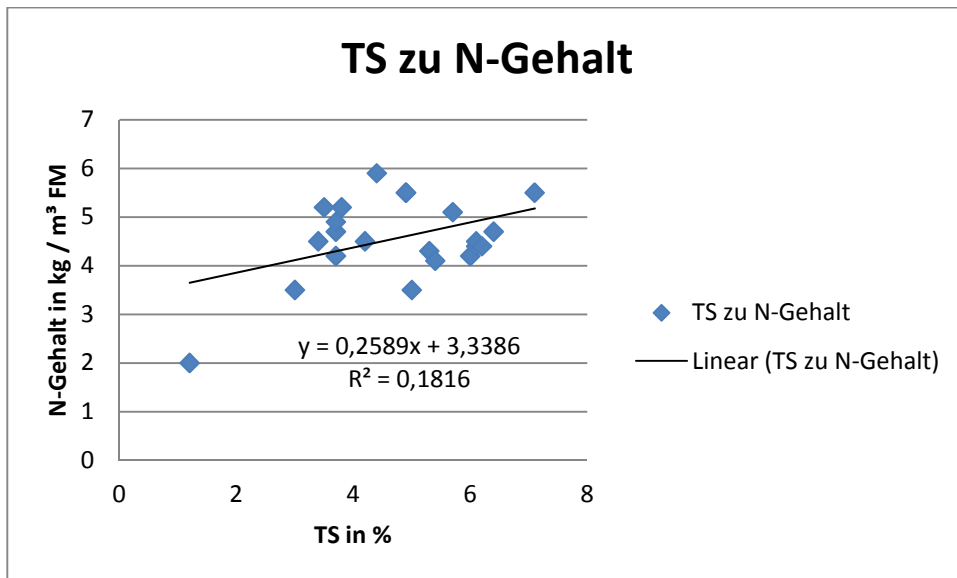


Abb. 36: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Die Korrelation des N-Gehalts fällt dabei relativ gering aus.

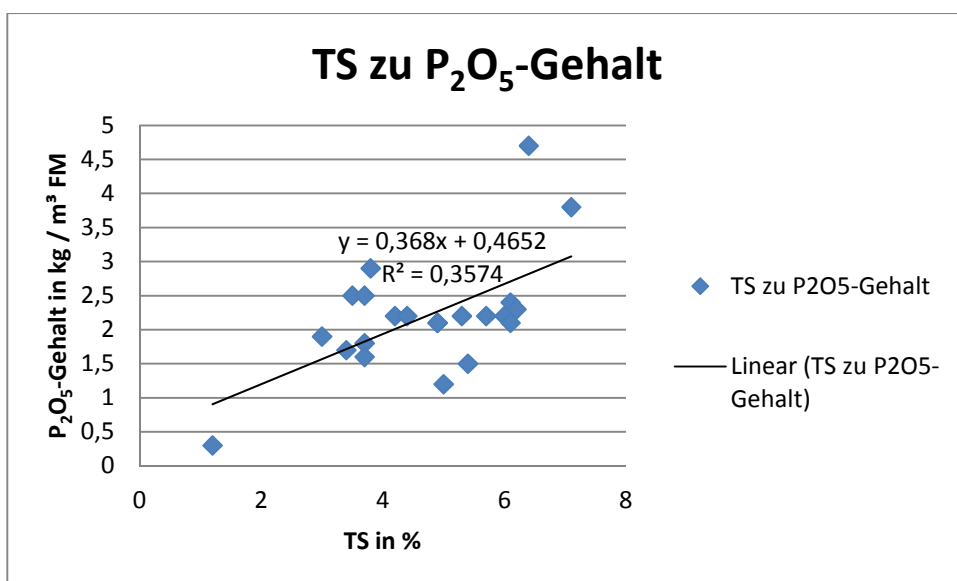


Abb. 37: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Die Korrelation des P₂O₅-Gehalts zum TS-Gehalt fällt zwar schon günstiger aus, ist jedoch trotzdem noch sehr gering.

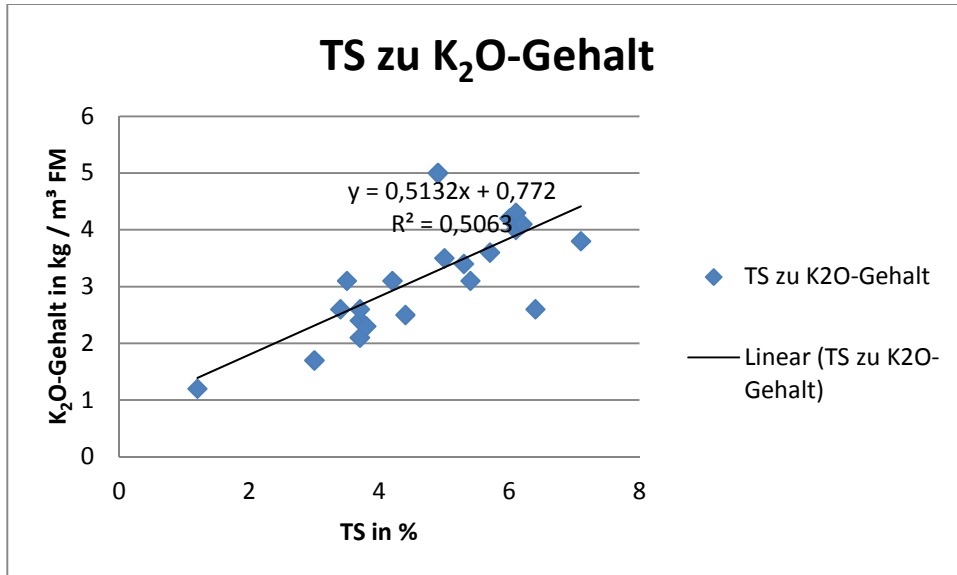


Abb. 38: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

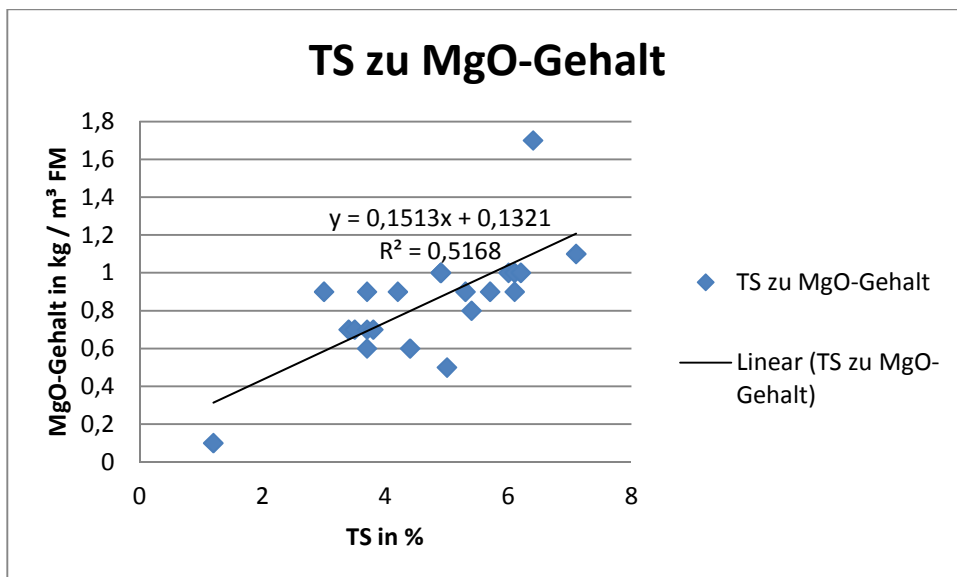


Abb. 39: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Die Korrelationen von K₂O- und MgO-Gehalt sind dann wieder relativ gut, aber schlechter als bei den anderen Substratkategorien.

5. Auswertung

Man kann die Auswirkungen der tierischen Güllen nicht direkt beurteilen, da in den meisten Biogasanlagen immer noch Maissilage als Hauptbestandteil enthalten ist. Darum soll die Auswirkung der Güllen auf die Nährstoffzusammensetzung indirekt beobachtet werden, indem man zwei ähnliche Substratkategorien bildet. Zum einen Mais und Rindergülle und zum anderen Mais und Schweinegülle. Dann wird Mais allein ohne Güllen betrachtet und mit den beiden vorherigen Substratkategorien verglichen.

Die nachstehende Tabelle beinhaltet die Korrelationskoeffizienten und Nährstoffgehalte aller Substratkategorien bei ihren durchschnittlichen TS-Gehalten und bei den theoretischen TS-Gehalten von 4 und 7 %. Die Nährstoffgehalte wurden mit Hilfe der jeweiligen Korrelationsfunktionen gebildet, die in den Exceltabellen im Anhang zu finden sind. Außerdem können die Substratkategorien noch in weitere, die Korrelationen verbessernde, Kategorien eingeteilt werden. Hierbei wird, außer bei der Kategorie „Mais & Schwein“, ein eingegrenzter TS-Bereich von 3 - 12 % und 1 - 8 % gewählt. Für jede Kategorie ändern sich dadurch die theoretischen Nährstoffgehalte. Es werden die Nährstoffgehalte verwendet, bei denen die höchste Korrelation erreicht wird. Mit jenen soll dann der Wert der jeweiligen Gärrestkategorie ermittelt werden. Wird der Wert aus einer eingegengten TS-Kategorie gewählt, kann dieser maximal für den entsprechenden Trockensubstanzbereich gelten.

Tab.1: Vergleich der Korrelationen und Nährstoffgehalte der verschiedenen Substratzusammensetzungen

Zusammensetzung des Substrats	Korrelations-Koeffizient r					Nährstoffgehalt in kg/m ³ FM			
	TS	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Alle Gärreste	8,2 (/)	0,90	0,93	0,63	0,93	4,91	2,76	3,81	1,23
	4					4,02	1,33	3,32	0,56
	7					4,66	2,36	3,69	1,05
Alle 3 - 12 % TS	5,95 (/)	0,70	0,33	0,75	0,36	4,46	1,84	3,74	0,8
	4					3,49	1,57	2,86	0,69
	7					4,98	1,98	4,16	0,86
Gärrest Mais und Rind	8,2 (/)	0,87	0,91	0,19	0,92	4,85	2,65	3,85	1,22
n = 106	4					3,76	0,88	3,73	0,42
	7					4,54	2,15	3,82	0,99
Mais und Rind 3 - 12 % TS	6,17 (/)	0,87	0,55	0,74	0,40	4,41	1,71	3,84	0,79
n = 90	4					3,01	1,34	2,96	0,67
	7					4,94	1,86	4,17	0,84
Mais und Rind 1 - 8 % TS	5,59 (/)	---	0,78	---	0,83	---	1,64	---	0,78
n = 83	4						1,07		0,53
	7						2,13		1,00
Gärrest Mais und Schwein	4,7 (/)	0,42	0,60	0,71	0,72	4,56	2,20	3,19	0,85
1 - 7 % TS	4					4,37	1,94	2,83	0,74
n = 22	7					5,15	3,04	4,36	1,19
Nur Mais ohne Gülle	11,22 (/)	0,87	0,90	-	0,92	5,9	3,83	4,22	1,73*
n = 48	4					4,24	0,72	4,23	0,18
	7					4,93	2,01	4,22	0,80
Nur Mais ohne Gülle	7,02 (/)	0,90	0,53	0,78	0,62	5,2	1,78	4,37	0,65*
3 - 12 % TS	4					3,35	1,36	3,31	0,48
n = 32	7					5,19	1,77	4,36	0,68
Nur Mais ohne Gülle	5,32 (/)	---	0,87	---	0,89	---	1,53	---	0,63
1 - 8 % TS	4						1,05		0,46
n = 22	7						2,14		0,91

5.1 Vergleich der Nährstoffgehalte

5.1.1 Substratkategorie: Alle Gärreste

In den folgenden Abbildungen sind die Kurven der Nährstoffgehalte zu erkennen, die mit Hilfe der Tab 1 ermittelt wurden. Die erste Abbildung zeigt den Verlauf der Nährstoffgehalte mit steigender Trockensubstanz für alle 151 Gärreste. Bei Kalium wurde aufgrund der schlechten Korrelation bei Betrachtung des gesamten TS-Bereiches der TS-Bereich von 3 -12 % gewählt.

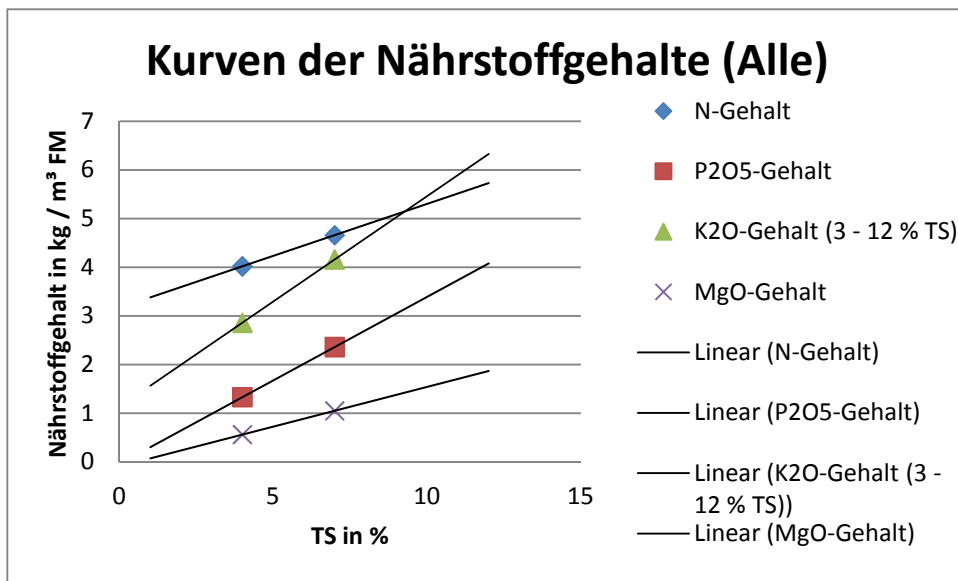


Abb. 40: Ermittelte Nährstoffkurven aller Gärreste (eigene Darstellung)

5.1.2 Substratkategorie: Mais & Rind

Für die Auswertung der Gärreste, die nur aus Maissilage und/oder Rindergülle bestehen, wurde aufgrund der besseren Korrelation für Stickstoff und Kalium der TS-Bereich 3 - 12 % gewählt und für Phosphor und Magnesium der Bereich von 1 - 8 %. Das bedeutet, dass weitere Analysen maximal für den gemeinsamen TS-Bereich von 3 - 8 % gelten können.

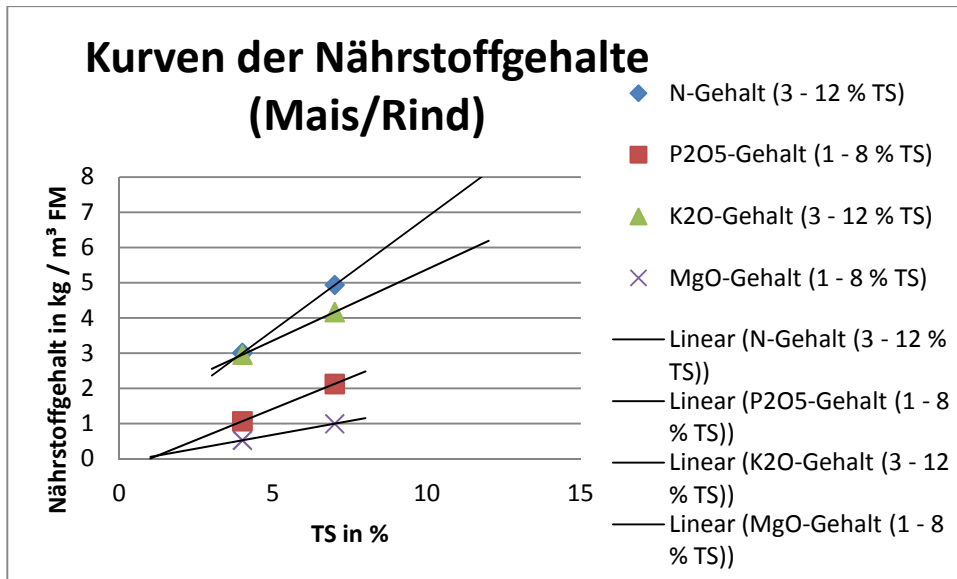


Abb. 41: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Mais & Rind (eigene Darstellung)

5.1.3 Substratkategorie: Mais & Schwein

Aufgrund der geringen Zahl an Deklarationen, die für diese Substratkategorie in Frage kommen, und der bereits erwähnten geringeren TS-Gehalte von Schweinegülle, ergibt sich hier für alle in Frage kommenden Daten ein TS-Bereich von 1 - 7 %.

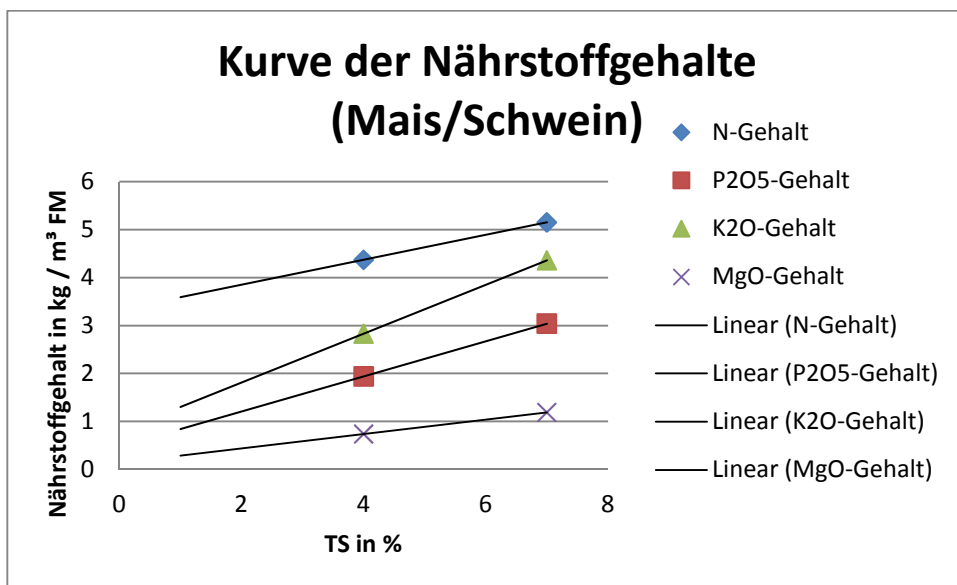


Abb. 42: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Vergleicht man die Substratkategorie „Mais & Rind“ mit „Mais & Schwein“ fällt zunächst auf, dass bei „Schwein & Rind“ der P_2O_5 -Gehalt um ca. 1 kg höher als bei „Mais & Rind“ ist. Die Stickstoffkurve von „Mais und Schwein“ verläuft insgesamt flacher und zeigt beim TS-Gehalt von 4 % einen höheren N-Gehalt.

5.1.4 Substratkategorie: Nur Mais ohne Gülle

Für diese Substratkategorie wurden die gleichen TS-Bereiche gewählt wie für die Substratkategorie Mais und Rind, da sich auch hier verbesserte Korrelationen ergeben.

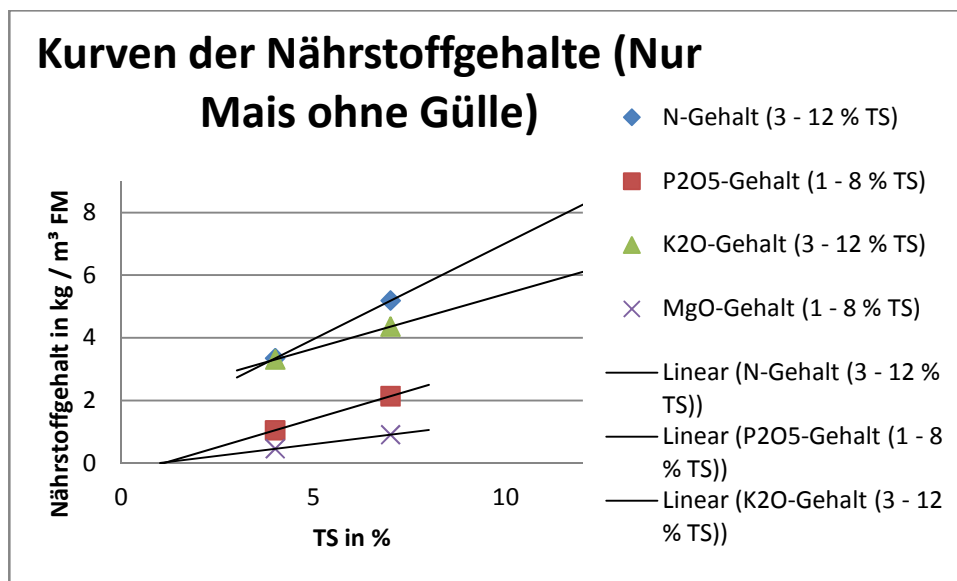


Abb. 43: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Nur Mais ohne Gülle (eigene Darstellung)

Die Nährstoffzusammensetzung der Substratkategorien „Nur Mais ohne Gülle“ und „Mais und Rind“ sind fast identisch. Das würde bedeuten, dass es für die Nährstoffzusammensetzung im TS-Bereich von 3 - 8 % unbedeutend wäre, ob ausschließlich Mais oder zusätzlich noch Rindergülle als Substrat verwendet wurde. Dies ist aufgrund der Herkunft der Rindergülle auch nicht abwegig, da Rinder zum großen Teil Maissilage oder andere nachwachsende Rohstoffe wie Stroh als Nahrung erhalten. Die Menge der Nährstoffe geht mit der Verdauung nicht verloren und könnte höchstens durch unsachgemäße Behandlung und Lagerung der Güllen zum Teil beeinträchtigt werden.

5.2 Vergleich des Nährstoffwertes

Um den Wert des Gärrestes pro m³ festzustellen, sollen die mineralischen Düngemittel und deren aktuelle Preise pro Tonne herangezogen werden. Mit Hilfe der Preise für Harnstoff, Tripelsuperphosphat, 60er Kali und Kieserit soll zunächst der Wert für den düngewirksamen Anteil des mineralischen Düngemittels berechnet werden. In der nachstehenden Tabelle sind aktuelle Düngemittelpreise und die daraus berechneten Werte in € pro Kg N, P₂O₅, K₂O und Mg dargestellt. Um von € pro Tonne Düngemittel auf den düngewirksamen Anteil in € pro Tonne zu gelangen, soll folgendes Berechnungsbeispiel herangezogen werden.

Beispielrechnung für N in € / t aus Harnstoff granuliert (46 % N):

Harnstoff mit 46 % N-Gehalt hat einen Preis von 396 € pro Tonne. Dann hat Harnstoff mit 100 % N-Gehalt einen theoretischen Wert von 861 € pro Tonne.

$$100 \% * 396 \text{ €/t} / 46 \% = 861 \text{ € pro Tonne}$$

Tab.2: Bestimmung des Nährstoffpreises

	Euro/ t Dez 2011	N in Euro/ t	P ₂ O ₅ in Euro/t	K ₂ O in Euro/t	MgO in Euro/t
KAS	289	1070			
ASS	305	1173			
ssA	241	1148			
Harnstoff gran. (46 % N)	396	861			
AHL	256	914			
MAP	540	4500	1038		
DAP	531	2950	1154		
Tripelsuperphosphat	478		1039		
KALI 40	282			705	
KALI 60	384			640	
Kieserit granuliert 25 %	245				980
		€/ kg	€/ kg	€/ kg	€/ kg
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
		0,861	1,039	0,640	0,98

Düngemittelpreise aus Marktinformation Ost (lallf.de/oeffentlicher-Bereich.609.0.html)

Die Nährstoffpreise in € pro kg werden mit den Nährstoffgehalten der Gärreste in kg pro m³ multipliziert. So erhält man den Wert des Gärrestes in € pro m³.

Hier sind nun die vier Substratkategorien und deren Wert des Gärrestes zusammengetragen.

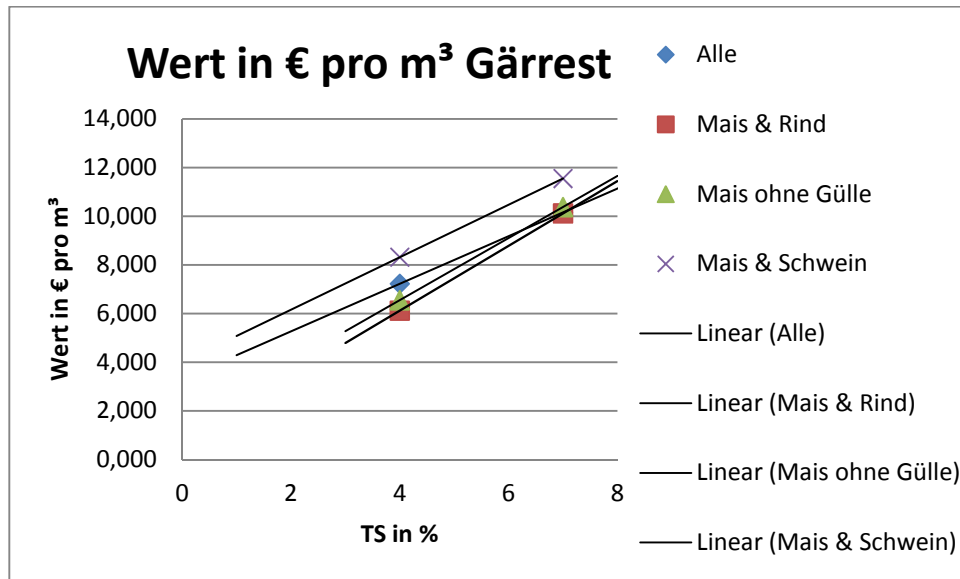


Abb. 44: Wertvergleich der Substratkategorien (eigene Darstellung)

Der Vergleich zeigt, dass es für die Kategorien „Mais & Rind“ und „Mais ohne Gülle“, bedingt durch die annähernd gleichen Nährstoffgehalte, auch im Wert kaum einen Unterschied gibt. Die Substratkategorie „Alle Gärreste“ hat im Vergleich dazu einen etwas höheren Wert im unteren TS-Bereich. Dieser gleicht sich aber wieder durch den flachen Verlauf der N-Gehaltskurve im TS-Bereich von 6 - 8 % an die beiden zuvor erwähnten Substratkategorien an. Bei „Mais & Schwein“ wird jedoch über den gesamten TS-Bereich ein deutlich höherer Wert, dank der im Vergleich zu den anderen Substratkategorien größeren Gehalten an Stickstoff und Phosphor, deutlich. Lässt man bei der statistischen Auswertung sämtlicher Gärreste diejenigen weg, die Schweinegülle als Substrat beinhalten, so sinkt also bedingt durch die niedrigeren Gehalte an Phosphor und Stickstoff der Wert des Gärrestes.

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen die Betreuung der Biogasanlagen verbessern. Die Voraussagbarkeit der Nährstoffkonzentrationen im Gärrest können den Anbau und die Verwendung bestimmter Substrate beeinflussen und damit die Auswahlmöglichkeiten der Betreiber erweitern. Der statistischen Auswertung nach, kann bei Verwendung von Schweinegülle als Substrat ein erhöhter Stickstoff- und Phosphorgehalt nachgewiesen werden. Diese Gärreste unterscheiden sich in ihrer Nährstoffzusammensetzung und dem damit zusammenhängenden ökonomischen Wert des Gärrestes. Dieser wird auch durch die aktuellen mineralischen Düngemittelpreise gelenkt. Die Eignung als Dünger wird durch den Wert der Nährstoffe nicht beeinflusst. Jedoch wird der erhöhte Stickstoff- und Phosphorgehalt zu veränderten Einsatzmöglichkeiten des Gärrestes führen. Dabei sollte auch darauf geachtet werden, welche Böden in der Nähe der Anlage zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung in Frage kommen. Die Wahl der Kulturart, die für den Einsatz in der Biogasanlage verwendet wird, bestimmt nach den Erkenntnissen der statistischen Auswertung die Nährstoffzusammensetzung des Gärrestes nur gering. Vor allem Schweinegülle wirkt sich stark auf die Nährstoffzusammensetzung aus. Dies sollte bei der weiteren Behandlung der Gärreste berücksichtigt werden. Wird der Gärrest aufbereitet und konzentriert, kann eine Korrelation von Nährstoffgehalt zu Trockensubstanz nicht mehr so gut vorausgesagt werden, da jede Methode andere Auswirkungen auf die Phasen der Gärrestaufbereitung hat.

7. Literaturverzeichnis

Fachliteratur

Staiß F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien. 1. Auflage. Radebeul: Biebertal, 2007

Schulz H., Eder B.: BIOGAS-PRAXIS. Grundlagen - Planung - Anlagenbau - Beispiele - Wirtschaftlichkeit.. Staufen bei Freiburg Ökobuch. 2007

Köhler W.: Biostatistik, Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. 3. aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2002

Döhler H.:Faustzahlen Biogas.2. Auflage,KTBL, Darmstadt, 2009

Kaltschmitt E.:Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage.korrigierter Nachdruck.Springer, 2009

Gruber, W.: Biogasanlagen in der Landwirtschaft, 2. überarbeitete Auflage, aid infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., Bonn, 2004

Galler, J.: Gülle. Anfall, Lagerung, Verwertung, Umwelt. Leopold Stocker Verlag. Graz-Stuttgart. 1989

Biskupek, B.: Kofermentation, Arbeitspapier 249, KTBL, Darmstadt, 1998

Wörle H.: Ratgeber Biogas Wissen Kompakt Planung Finanzen Substrate Technik Energie Einspeisung Gärreste. Deutscher Landwirtschaftsverlag. 1. Auflage. München, 2010

Internetquellen

Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2011

<http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbauflache-fur-nachwachsende-rohstoffe-2011-4.html>. 20.02.2012

Schieder, Doris: Prozessmodell Biogas 2010

http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Prozessmodell_Biogas.pdf. 20.02.2012

Marktinformation Ost. Düngemittelpreise. lallf.de/oeffentlicher-Bereich.609.0.html. 20.02.2012

8. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Abbildungen

- Abbildung 1: Die vier Phasen der anaeroben Gärung (Gruber, 2004)
- Abbildung 2: Unterschied von ein- und zweistufigem Verfahren (Schulz, 2007)
- Abbildung 3: Substrate geordnet nach aufsteigender Biogausausbeute (Schulz, 2007)
- Abbildung 4: Methanausbeuten verschiedener nachwachsender Rohstoffe (Schulz, 2007)
- Abbildung 5: Einteilung der organischen Substanz (Schulz, 2007)
- Abbildung 6: Anbau nachwachsender Rohstoffe (nachwachsenderohstoffe.de)
- Abbildung 7: Nährstoffverteilung durch Gärrestaufbereitung (Döhler, 2009)
- Abbildung 8 & 9: Korrelation von TS zu N-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)
- Abbildung 10 & 11: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)
- Abbildung 12 & 13: Korrelation von TS zu K₂O-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)
- Abbildung 14 & 15: Korrelation von TS zu MgO-Gehalt/alle Gärreste (eigene Darstellung)
- Abbildung 16 & 17: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)
- Abbildung 18 -20: Korrelation von TS zu P₂O₅-Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Abbildung 21 & 22: Korrelation von TS zu K_2O -Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Abbildung 23 - 25: Korrelation von TS zu MgO -Gehalt/Mais & Rind (eigene Darstellung)

Abbildung 26 & 27: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Nur Mais ohne Gülle
(eigene Darstellung)

Abbildung 28 - 30: Korrelation von TS zu P_2O_5 -Gehalt/Nur Mais ohne Gülle
(eigene Darstellung)

Abbildung 31 & 32: Korrelation von TS zu K_2O -Gehalt/Nur Mais ohne Gülle
(eigene Darstellung)

Abbildung 33 - 35: Korrelation von TS zu MgO -Gehalt/Nur Mais ohne Gülle
(eigene Darstellung)

Abbildung 36: Korrelation von TS zu N-Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Abbildung 37: Korrelation von TS zu P_2O_5 -Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Abbildung 38: Korrelation von TS zu K_2O -Gehalt/Mais & Schwein (eigene Darstellung)

Abbildung 39: Korrelation von TS zu MgO -Gehalt/Mais & Schwein(eigene Darstellung)

Abbildung 40: Ermittelte Nährstoffkurven aller Gärreste (eigene Darstellung)

Abbildung 41: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Mais & Rind
(eigene Darstellung)

Abbildung 42: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Mais & Schwein
(eigene Darstellung)

Abbildung 43: Ermittelte Nährstoffkurven für Gärreste/Nur Mais ohne Gülle
(eigene Darstellung)

Abbildung 44: Wertvergleich der Substratkategorien (eigene Darstellung)

Tabellen

Tabelle 1: Vergleich der Korrelationen und Nährstoffgehalte der
verschiedenen Substratzusammensetzungen

Tabelle 2: Bestimmung des Nährstoffpreises

Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine
anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Erik Thürke

Ort, Datum

Unterschrift