



FH MÜNSTER  
University of Applied Sciences

**THiEL**  
Fördertechnik

# Abschlussbericht

## Hygienisierung und Stickstoffentfrachtung von Wirtschaftsdünger -Hygie(NH<sub>3</sub>)isch- Phase II

Projektlaufzeit: 17.04.2018 – 16.11.2020

Aktenzeichen: AZ 34413

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter

Dr.-Ing. Elmar Brüggling

Dr. sc.agr. Daniel Baumkötter

Juliana Rolf B.Sc.

FH Münster – University of Applied Sciences  
Fachbereich Energie·Gebäude·Umwelt  
Institutsverbund Ressourcen, Energie und Infrastruktur  
Stegerwaldstraße 39  
48565 Steinfurt

Tel : +49 (0) 2551 9-62420

Fax : +49 (0) 2551 9-62715

Mail: [bruegging@fh-muenster.de](mailto:bruegging@fh-muenster.de)

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>34413</b>	Referat	<b>31</b>	Fördersumme	<b>125.000 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel** **Hygienisierung und Stickstoffentfrachtung von Wirtschaftsdünger - Hygie(NH<sub>3</sub>)isch – Phase II**

**Stichworte** Wirtschaftsdünger, Hygienisierung, Ammoniakentfernung, Branntkalk

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>31 Monate</b>	<b>17.04.2018</b>	<b>16.11.2020</b>	<b>2</b>

Zwischenberichte 17.04.2019

<b>Bewilligungsempfänger</b>	FH Münster	Tel	02551 9-62725
	Fachbereich Energie·Gebäude·Umwelt	Fax	02551 9-62717
	Stegerwaldstraße 39	<b>Projektleitung</b>	
	48565 Steinfurt	Dr.-Ing. Elmar Brüggling	
		<b>Bearbeiter</b>	
		Dr. sc.agr. Daniel Baumkötter	
		Juliana Rolf B.Sc.	

**Kooperationspartner** Alfred Thiel  
THIEL GmbH – Fördertechnik  
Farwicker Straße 23  
49624 Lönigen

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

In diesem Projekt geht es darum, die kontinuierliche Betriebsweise einer Anlage zur Hygienisierung und Stickstoffentfrachtung von schüttfähigen und schlammartigen Biomassen zu untersuchen, mit dem Ziel die erforderlichen Betriebshilfsmittel (Qualität und Menge) optimal einzusetzen und einen stabilen sowie kosteneffizienten Prozess zu erreichen. Für die Behandlung wird die Reaktion von zugegebenem Branntkalk mit dem Wasseranteil aus dem zu hygienisierenden Substrat ausgenutzt, wodurch sich die für die Hygienisierung benötigte externe thermische Energie reduziert. In Folge der Zugabe erhöht sich neben der Temperatur auch der pH-Wert, sodass sich eine Gleichgewichtsverschiebung in Richtung des gasförmigen Ammoniaks ergibt. Die Entfernung des Ammonium-Stickstoffs hat den großen Vorteil, dass das Substrat vermehrt in Biogasanlagen als Silomaissubstitut verwendet werden kann. Darüber hinaus wird durch Einsatz von Schwefelsäure der Ammoniak aus der Abluft gewaschen und als transportfähige Ammoniumsulfatlösung gewonnen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Rahmen dieses Projektes wird die vorhandene, großtechnische Anlage (aus Projektphase 1) weiterentwickelt, um die Effizienz bei der Ammoniakentfernung bzw. Hygienisierung von verschiedenen Stoffen zu steigern und die wirtschaftlichen Risiken zu senken. Im Zuge der wissenschaftlichen Begleitung der Anlage im Praxisbetrieb, werden dabei folgende Aspekte untersucht:

- Technische und verfahrenstechnische Optimierung der Gesamtanlage und seiner Bestandteile im kontinuierlichen Praxisbetrieb
- Steigerung der Effizienz der Hygienisierung in Abhängigkeit der Qualität und Menge der erforderlichen Betriebsmittel und der ggf. erforderlichen externen Wärmezufuhr
- Steigerung der Effizienz der Ammoniakfreisetzung in Abhängigkeit der Qualität und Menge der erforderlichen Betriebsmittel
- Übertragbarkeit der Ergebnisse in Abhängigkeit der Substratzusammensetzung

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Optimierung einer vollautomatischen Versuchsanlage im großtechnischen Maßstab
2. Optimale Einstellungen für Branntkalk und Behandlungszeit wurden für eine maximale Ammoniumentfrachtung (bis zu 70 %) ermittelt
3. Bei Zugabe von 11,3 % Branntkalk erfolgt eine Erhöhung der Temperatur über 70 °C für 60 Minuten ohne Einsatz einer externen Heizquelle
4. Schwefelsäurewäscher erreicht einen Ammoniakeliminationsgrad aus der Abluft von über 99 %
5. Produktion einer 30 %igen Ammoniumsulfatlösung
6. Optimierung des Stromverbrauchs auf ca. 5,1 kWh/t bei einem Durchsatz von 3,2 t/h
7. Die Behandlungszeit hat einen höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit als die Branntkalkmenge
8. Die Kosten für die Behandlung der untersuchten Substrate liegt zwischen 11,7 €/t und 13,0 €/t
9. Durch den Einsatz von Mist in der BGA können jährlich 54.750 € eingespart werden
10. Der Biogasertrag von dem behandelten Mist entspricht in etwa dem vom Silomais
11. Der behandelte Mist kann (in einer adaptierten Biogasanlage) bis zu 50 % der täglichen Substratzugabe betragen ohne Einbußen bei Gasertrag und Methangehalt
12. Durch den Einsatz von behandeltem Mist können CO<sub>2</sub>-Emissionen von rd. 214 t/a an der Biogasanlage eingespart werden

Darüber hinaus wurden im Projekt weitere technische Optimierungen an der Anlage vorgenommen. Da in dem Prozess konzentrierte Schwefelsäure verwendet wird, wurden entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen. Die Anlage ist so konstruiert, dass auch bei Leckagen keine gefährlichen Stoffe austreten können. Die gesamte Förderung und Lagerung von Branntkalk ist als geschlossenes System ausgeführt. Das behandelte Material wird am Ende des Prozesses in einen Produktbehälter gefördert. Dieser ist geschlossen und mit einem Absaugsystem inklusive eines Schwefelsäurewäschers versehen. Dieses geschlossene System ermöglicht einen nahezu vollständig emissionsfreien Betrieb.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Projekt und die entwickelte Anlage wurden bei den nachfolgenden Veranstaltungen und Medien präsentiert:

- Präsentation des Projektes im Rahmen des Messestandes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) auf der IFAT 2018, der Weltleitmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft vom 14. bis 18. Mai 2018 in München
- Vortrag „poultry profit – Stickstoffentfrachtung und Hygienisierung von Geflügelmist“ auf dem Biogas Innovationskongress am 30. Mai 2018 in Osnabrück
- Vortrag „Stickstoffentfrachtung und Hygienisierung von Wirtschaftsdünger mit Hilfe von Branntkalk“ auf der Internationalen Konferenz zum Thema „Fortschritt Gülle und Gärrest“ am 16. Oktober 2018 in Schwäbisch Hall
- „Dem Mist den Stickstoff austreiben“, Profi Magazin 3/2019 S. 94-96
- „Traum oder Wirklichkeit?“, DGS-Magazin 4/2019 S. 46/47

## **Fazit**

Das Ziel des Projektes, die Anlagentechnik zu optimieren und ein marktfähiges und hygienisch einwandfreies Düngemittel zu produzieren wurde erreicht. Die Effizienz bei der Ammoniakentfernung bzw. Hygienisierung von verschiedenen Stoffen konnte gesteigert und die wirtschaftlichen Risiken gesenkt werden.

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise	3
3	Ergebnisse	8
3.1	Die Pilotanlage	8
3.2	Optimierungsversuche	9
3.2.1	Betriebsbedingungen	10
3.2.2	Hygienisierung	27
3.3	Stoffstrombilanz	31
3.4	Einfluss auf den Biogasprozess	32
3.4.1	Batch-Tests zur Biogaspotenzialbestimmung	32
3.5.1	Betrachtung einer Biogasanlage	35
3.6	Ökonomische Betrachtung	42
4	Öffentlichkeitsarbeit	44
5	Fazit	45
6	Literaturverzeichnis	47

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung der Anlage	3
Abbildung 2-2:	Ammonium/Ammoniak-Gleichgewicht in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert	4
Abbildung 2-3:	Pilotanlage zur Behandlung von Geflügelmist	5
Abbildung 3-1:	Darstellung der Stoffströme bei Erstaufnahme der Anlage	9
Abbildung 3-2:	Abweichungen zwischen eingestellter und tatsächlicher Zugabe-menge	12
Abbildung 3-3:	Prinzip der Stickstoffrückgewinnung mittels Ammoniakwäsche	16
Abbildung 3-4:	Simulationsbericht zur sauren Wäsche von Ammoniak	18
Abbildung 3-5:	Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff nach Optimierung des Schwefelsäurewäschers	20
Abbildung 3-6:	Vergleich der behandelten (links) und unbehandelten (rechts) Probe	21
Abbildung 3-7:	Kosten bei drei verschiedenen Einstellungen an der Anlage	22
Abbildung 3-8:	Kosten der Behandlung in Abhängigkeit von der Ammonium-abscheidung	23
Abbildung 3-9:	Substratzusammensetzungen	24
Abbildung 3-10:	Ammoniumentfrachtungen in Abhängigkeit vom Trockenrückstand (TR) des Ausgangssubstrates und der Behandlungszeit	26
Abbildung 3-11:	Temperaturverlauf über eine Stunde bei Einsatz von 8 % Branntkalk in Putenmist	28
Abbildung 3-12:	Behandlungskosten der Hygienisierung	30
Abbildung 3-13:	Stoffstrombilanz für die optimalen Einstellungen (5 % Branntkalk und 7 Minuten Behandlungszeit)	31
Abbildung 3-14:	Aufbau der Eudiometerversuche	32
Abbildung 3-15:	Fahrweise der Biogasanlage während der 11-monatigen Begleitung	36
Abbildung 3-16:	Fermenterwerte der Biogasanlage bei Fütterung mit Mais und behandeltem Mist über 11 Monate (TR =Trockenrückstand; EÄ = Essigsäureäquivalenz; PK = Pufferkapazität)	39

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Nährstoffanalysen	7
Tabelle 3-1:	Analysenergebnisse der verwendeten Substrate	8
Tabelle 3-2:	Analyseergebnisse der eingestellten Zugabemengen Branntkalk und der analysierten Branntkalkeinträge im Vergleich	11
Tabelle 3-3:	Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff in Abhängigkeit von der Branntkalksorte, dem Branntkalkanteil und der Behandlungszeit	14
Tabelle 3-4:	Auslegungsdaten für die Modellierung des sauren Wäschers	17
Tabelle 3-5:	Simulationsergebnis für den sauren Wäscher	19
Tabelle 3-6:	Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff nach Optimierung des Schwefelsäurewäschers	20
Tabelle 3-7:	Ammoniumentfrachtungen abhängig vom Trockenrückstands des Ausgangsubstrates	25
Tabelle 3-8:	Einstellungen an der Versuchsanlage und Ammoniumentfrachtung	33
Tabelle 3-9:	Versuchsergebnisse der Biogaspotenzialbestimmungen	34
Tabelle 3-10:	Spezifische Biogas- und Methanerträge	34
Tabelle 3-11:	Mistanteil und Gasertrag vor und nach den Versuchsreihen des Praxischecks	36
Tabelle 3-12:	Erfahrungswerte der Fermenterwerte zur Überwachung des Biogasprozesses durch den Biogasanlagenbauer	40
Tabelle 3-13:	Literaturreichtwerte zur Überwachung des Biogasprozesses durch den Biogasanlagenbetreiber	40
Tabelle 3-14:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Substrateinsatzes	41
Tabelle 3-15:	Darstellung der Kosten für eine 7-minütige Behandlung mit 5,6 % Branntkalk zur Entfernung von 70 % Ammonium	42
Tabelle 5-1:	CO <sub>2</sub> -Emissionen an der Biogasanlage	46

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ASL	Ammoniumsulfatlösung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
CaO	Calciumoxid
FM	Frischmasse
GR	Gärreste
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HTK	Hühnertrockenkot
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
NH <sub>4</sub> -N	Ammonium-Stickstoff
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ammoniumsulfat
oTR	organischer Anteil des Trockenrückstandes
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Verlauf des Projektes konnte ein kontinuierlicher Betrieb der Anlage erreicht werden. Insbesondere durch die Realisierung der technischen Optimierungen, wie den Einbau eines Luftfilters und die Verhinderung von Feuchtigkeitseinträgen in das Kalksilo, wurde der kontinuierliche Betrieb möglich. Im Betrieb konnte so, Hühner-trockenkot (HTK) mit einem Anteil von bis zu 50 % kontinuierlich verarbeitet werden. In der Anlage lassen sich Hähnchenmist, Putenmist und Hühnertrockenkot behandeln.

Als optimale Substratzusammensetzung wurde eine Mischung aus HTK, Putenmist und Geflügelmist in gleichen Teilen mit einem Trockenrückstand (TR) von 46 % identifiziert. Aber auch Substrate mit höheren TR-Gehalten lassen sich durch eine Verlängerung der Behandlungszeit entsprechend verarbeiten. Als größte Kostenfaktoren bei der Behandlung dieser Substrate wurden die Behandlungsdauer und der Branntkalk Einsatz ermittelt. Sie machen etwa 35 % der Betriebskosten aus. Im Rahmen des Projektes konnte die Branntkalkmenge von 8 % auf 5 % Branntkalk (gemahlen mit einem Calciumoxidanteil von 90 %) und die Behandlungszeit von 15 Minuten auf 7 Minuten reduziert werden.

Im Rahmen des Projektes wurde zur Steuerung eine automatisierte Berechnung der erforderlichen Branntkalkmenge für eine zuverlässige Hygienisierung (70 °C für eine Stunde (Bioabfallverordnung, 1998)) in Abhängigkeit des Trockenrückstandes des eingesetzten Substrates verwendet. Bei Verwendung der berechneten Branntkalkmenge und unter Einbeziehung eines Puffers für den Wärmeverlust an der Anlage über die 60 Minuten, konnte eine Hygienisierung ohne zusätzliche Heizquelle realisiert werden.

Der Einsatz des behandelten Geflügelmists in einer Biogasanlage wurde über eine Zeitspanne von 11 Monaten begleitet. Mit der Vorbehandlung der Geflügelmiste konnte der Mistanteil vom insgesamt eingesetzten Feststoff in der Biogasanlage von 10 % auf 50 % gesteigert werden. Während der gesamten Versuchsdauer konnten keine negativen Auswirkungen auf den Biogasprozess festgestellt werden, so dass in der betrachteten Anlage der erhöhte Einsatz von Geflügelmist keine Auswirkungen auf die Biologie des Fermenters zeigte und somit erfolgreich dazu beigetragen hat, klassische Substrate wie Silomais zu ersetzen.

## 1 EINLEITUNG

Stickstoff ist ein wichtiger Rohstoff bzw. elementarer Bestandteil für alle Lebewesen. In der Landwirtschaft hat Stickstoff einen erheblichen Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen. Doch durch einen erhöhten Stickstoffeintrag in die Umwelt können auch schädliche Wirkungen auftreten. Dies macht das Nährstoffmanagement zu einem wichtigen Bestandteil der heutigen Landwirtschaft.

Jährlich entstehen in der Landwirtschaft große Mengen an Reststoffen (z.B. Geflügelmist, Schweinegülle, Rindergülle, Gärreste). Diese beinhalten Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium. Überschüsse von Gülle und Mist erfordern überregionale Transporte, Lagerung oder eine Aufbereitung. Eine nicht fachgerechte Bewirtschaftung der Wirtschaftsdünger und der darin enthaltenen Nährstoffe, kann zu Emissionen von Methan, Kohlenstoffdioxid sowie Ammoniak führen und Boden und Wasser schaden. Laut Umweltbundesamt wurden im Jahr 2015 insgesamt 759.000 Tonnen Ammoniak in die Luft eingetragen, davon stammten 724.000 Tonnen (95 %) aus der Landwirtschaft (Umweltbundesamt, 2018).

Die von der Fa. Thiel entwickelte Anlage behandelt verschiedene biogene Substrate (z.B. Gärreste, Putenmist, Hähnchenmist und Hühnertrockenkot) mit dem Ziel den Stickstoffanteil im Substrat deutlich zu reduzieren und den Stickstoff als Ammoniumsulfatlösung (ASL) zu nutzen. Für die Behandlung wird die Reaktion von zugegebenem Branntkalk mit dem Wasseranteil aus dem zu hygienisierenden Substrat ausgenutzt, wodurch sich die für die Hygienisierung benötigte externe thermische Energie reduziert. Für eine anschließende Trocknung ist zudem vorteilhaft, dass bei dieser Reaktion bereits Wasser abreagiert und nicht mehr thermisch verdampft werden muss. In Folge der Zugabe erhöht sich neben der Temperatur auch der pH-Wert, sodass es zu einer Gleichgewichtsverschiebung in Richtung des gasförmigen Ammoniaks kommt. Die Entfernung des Ammonium-Stickstoffs hat den großen Vorteil, dass das Substrat vermehrt in Biogasanlagen als Silomaissubstitut verwendet werden kann. Darüber hinaus wird durch Einsatz von Schwefelsäure der Ammoniak aus der Abluft gewaschen und als transportfähige Ammoniumsulfatlösung gewonnen.

Die Behandlung der biogenen Substrate mit Hilfe der von der Fa. Thiel entwickelte Anlage verfolgt 4 maßgebliche Ziele:

**1. Technische Gesamtoptimierung der Anlage**

Durch technische Optimierungen soll ein zuverlässiger und störungsfreier Betrieb der Anlage gewährleistet werden.

**2. Optimierung der Parameter**

Versuchsparameter wie der Branntkalkanteil, die Behandlungszeit, die Branntkalksorte sowie die Substratzusammensetzung wurden untersucht. Ziel der Versuchsreihen war die optimale Einstellung der Versuchsparameter, um eine maximale Stickstoffentfrachtung (70 %) zu erzielen.

**3. Praxischeck des behandelten Substrats**

Der Einfluss des behandelten Mists auf den Biogasprozess wurde in einer Biogasanlage über einen Zeitraum von 11 Monaten getestet. Ziel war es, mögliche Auswirkungen auf die Biologie zu ermitteln und die Möglichkeiten des Mists als Maissubstituent zu ergründen. Ein Fokus der Beurteilung lag dabei auf mögliche Einschränkungen des Einsatzes von größeren Mengen behandeltem Geflügelmistes in Biogasanlagen.

**4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Behandlung**

Zum Abschluss der Versuchsreihen erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Anlage. Hierbei wurden die optimalen Einstellungen der Versuchsparameter unter wirtschaftlichen Aspekten beurteilt und dargestellt.

## 2 VORGEHENSWEISE

Zunächst werden in diesem Kapitel die bestehende Anlagen- und Verfahrenstechnik vorgestellt. Anschließend werden die durchgeführten Versuche und Untersuchungen beschrieben.

Zentrale Bausteine der Anlage sind der Umwandler, in welchem die Reaktion von Substrat und Branntkalk stattfindet, und ein nachgeschalteter Schwefelsäurewäscher für die ammoniakhaltige Abluft. In Abbildung 2-1 ist das Prinzip der Versuchsanlage schematisch dargestellt.

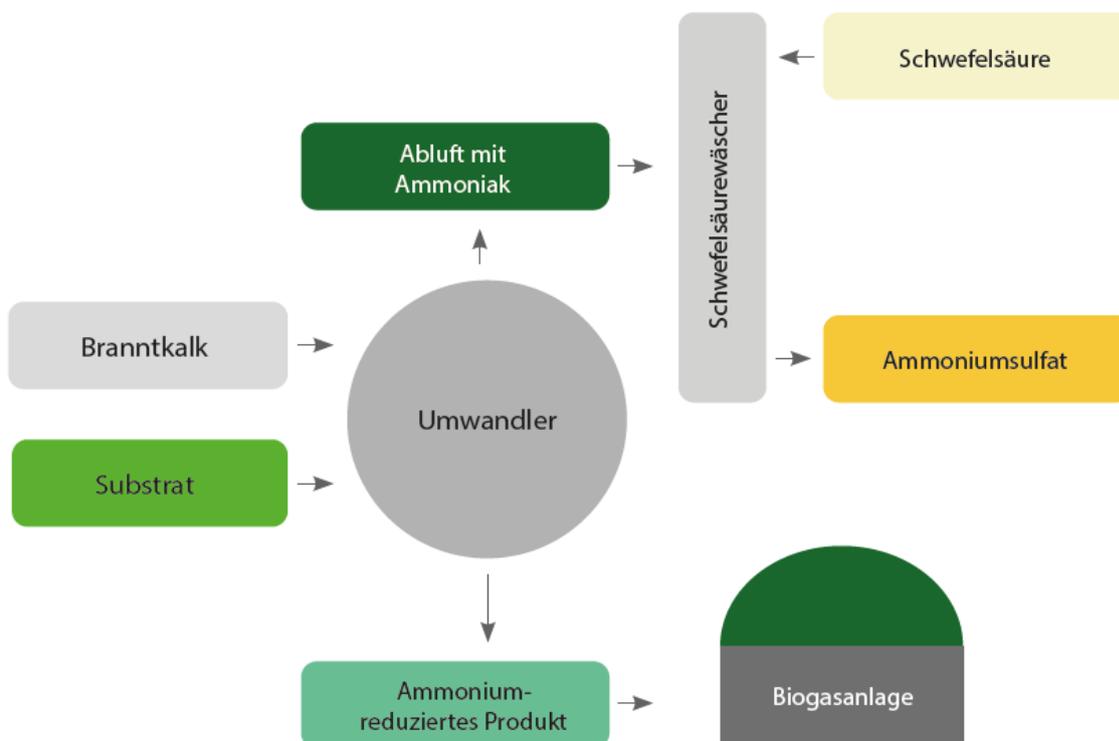


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Anlage

Das Substrat wird in einem Vorlagebehälter durchmischt und durch eine Förderschnecke in den Umwandler transportiert. Durch eine weitere Förderschnecke wird Branntkalk zudosiert. Die in diesem Projekt untersuchte Pilotanlage besteht aus zwei Umwandlern. Bezogen auf die vorhandene Substratmenge lässt sich die Anlage modular mit zusätzlichen Umwandlern und Schwefelsäurewäschern erweitern. Ein Umwandler hat ein Fassungsvermögen von bis zu 500 kg Substrat. Im Umwandler wird das Substrat mit dem Branntkalk vermischt und reagiert sofort. Durch die

Reaktion erhöhen sich Temperatur und pH-Wert. Das Prinzip der Anlage basiert auf der Zugabe von Branntkalk zu den genannten biogenen Substraten und der damit verbundenen Erwärmung und Anhebung des pH-Werts vom Material. Dadurch wird bei Substraten, die Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) enthalten, dieses in Form von gasförmigem Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) freigesetzt. Abbildung 2-2 stellt die Abhängigkeit der Konzentration an Ammoniak und Ammonium von pH-Wert und Temperatur dar (Wetter et al., 2017)

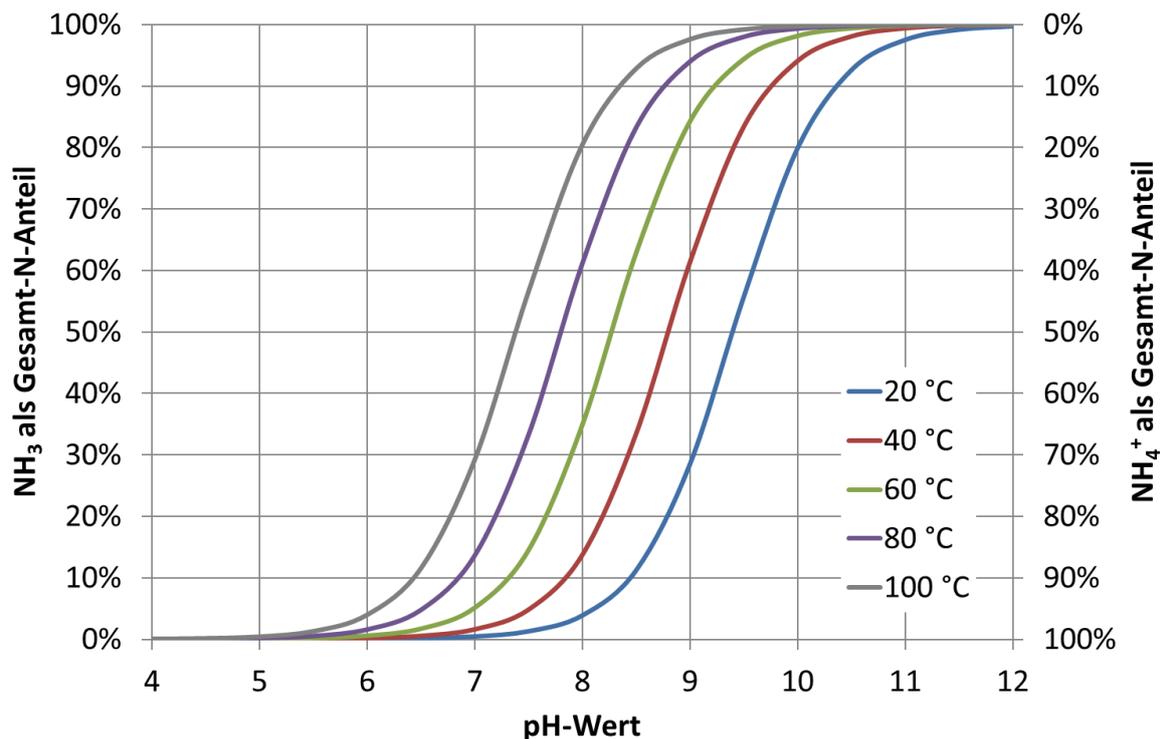


Abbildung 2-2: Ammonium/Ammoniak-Gleichgewicht in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert

Um die Zugabemengen zu bilanzieren befindet sich der Umwandler auf Wiegezellen und über Temperatursensoren kann der Temperaturverlauf während der Behandlungszeit überwacht werden. Zur Bindung der Ammoniak-Emissionen ist ein Schwefelsäurewäscher vorgesehen, in dem mit Schwefelsäure der Ammoniak aus der Abluft gebunden wird. Die ammoniakreiche Abluft aus dem Umwandler wird im Umluftverfahren durch den Wäscher geleitet, in dem diese durch Berieselung mit Schwefelsäure gewaschen wird und sich eine Ammoniumsulfatlösung bildet. Nach Beendigung eines Durchlaufs wird der behandelte Mist mit Hilfe einer weiteren Förderschnecke aus dem Umwandler transportiert.

Abbildung 2-3 zeigt den Aufbau einer Pilotanlage zur Behandlung von Geflügelmist. Zu Beginn der Versuchsreihen wurde der Ist-Zustand der Anlage aufgenommen. Dabei stellte sich heraus, dass es zu einem erheblichen Staubeintrag in den Wäscher kommt. Darüber hinaus zeigten die ersten Versuchsreihen große Abweichungen in der Kalkmenge bei gleichbleibender Einstellung. Diese Probleme wurden im Rahmen des Projektes durch technische Veränderungen an der Anlage verringert.

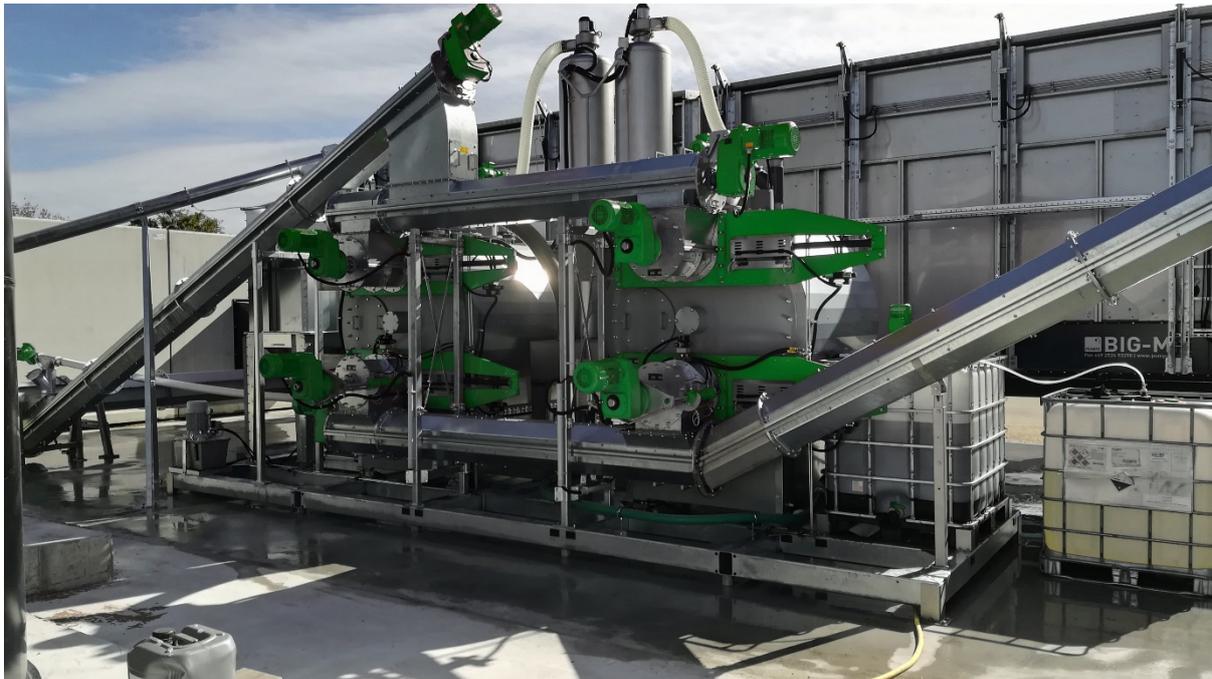


Abbildung 2-3: Pilotanlage zur Behandlung von Geflügelmist

Außerdem wurden Versuchsreihen zu den Versuchsparametern durchgeführt. Durch einen effizienteren Einsatz von Branntkalk und eine optimierte Behandlungszeit sollten eine maximale Stickstoffentfrachtung von 70 % erreicht und gleichzeitig Kosten eingespart werden. Zu den untersuchten Parametern gehörten der Branntkalkanteil, die Behandlungszeit, die Branntkalksorte und die Substratzusammensetzung. Untersuchungen zum Substrateinsatz identifizierten ebenfalls Grenzen der Behandlung in Abhängigkeit vom Trockenrückstand. So konnten bei Versuchsreihen mit erhöhtem HTK-Anteil ( $> 50\%$ ) nur noch relativ geringe Stickstoffentfrachtungen erreicht werden. Ziel der Untersuchungen war es Grenzbereiche für den Einsatz von HTK zu ermitteln. Neben der Stickstoffentfrachtung von Geflügelmist, kann die Anlage auch zur Hygienisierung eingesetzt werden. Ziel der Optimierungen war es, die Hygienisierung ohne externe Heizquelle wie zum Beispiel einen Heizölbrenner durchführen zu können. Darüber hinaus sollte eine Berechnungsgrundlage gefunden

werden, die je nach den Eigenschaften des eingesetzten Mists den Branntkalkanteil anpasst. Zum Abschluss der Versuchsreihen wurden durch eine ökonomische Bewertung die größten Kostenpunkte und optimalen Einstellungen analysiert und beschrieben.

### **Praxischeck an einer Biogasanlage**

Im Rahmen dieses Projektes wurde, über einen Zeitraum von 11 Monaten, der Einsatz von ammoniumreduzierten Geflügelmist in einer Biogasanlage begleitet, die Prozessdaten aufgenommen und analysiert. So konnte überprüft werden, ob aufgrund der Substratbehandlung eine größere Menge Geflügelmist in der Biogasanlage eingesetzt werden kann und ob biologische Hemmungen des erhöhten Einsatzes von Geflügelmist (Ammoniak-hemmung) auftreten.

Im Projekt wurden Daten der am Standort befindlichen Biogasanlage aufgenommen. Diese verwendete seit ca. 1,5 Jahren Geflügelmist, der mit Hilfe der oben beschriebenen Anlage behandelt wurde. Bei der Überwachung wurden neben dem Ammoniakgehalt auch Prozessparameter wie der pH-Wert, der Trockensubstanz (TS)-Gehalt und das Verhältnis von flüchtigen Fettsäuren zur Pufferkapazität (FOS/TAC)-Wert betrachtet. Diese wurden den erfassten Gasmengen gegenübergestellt, um damit eine Beurteilung über den Einsatz des behandelten Mists in der Biogasanlage zu ermöglichen.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden verschiedene Analysen im Rahmen der technischen Optimierung der Pilotanlage, zur Ermittlung der Stickstoffentfrachtung und der Erstellung von Stoffstrombilanzen oder TR-Abhängigkeiten durchgeführt. In Tabelle 2-1 sind die Nährstoffanalysen und die dafür verwendete Analytik Normen dargestellt.

Tabelle 2-1: Nährstoffanalysen

Nährstoffe	Einheit	Norm
Calcium (CaO)	kg/t	DIN 38414-7; DIN EN ISO 11885
Kalium (K <sub>2</sub> O)	kg/t	DIN 38414-7; DIN EN ISO 11885
Magnesium (MgO)	kg/t	DIN 38414-7; DIN EN ISO 11885
Gesamt-Stickstoff (N)	kg/t	VDLUFA Bd. II. 1, 11.5.1
Ammonium-Stickstoff (NH <sub>4</sub> -N)	kg/t	DIN 38406-5 (E 5-1/ E 5-2), 1983-10
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg/t	DIN 38414-7; DIN EN ISO 11885
NH <sub>4</sub> -N – Ammonium-Stickstoff	mg/l	DIN 38406-5
Trockensubstanz	%	DIN EN 15934 2012-11
Organische Trockensubstanz	%	DIN EN 15934 2012-11

Zusätzlich wurde der Fermenter der Test-Biogasanlage vor Ort einmal pro Monat analysiert. Diese Analysen beinhalteten die Parameter pH-Wert, Trockensubstanz, Ammonium-Stickstoff, FOS/TAC-Wert und Essigsäureäquivalenz.

### 3 ERGEBNISSE

Wesentliches Ziel des Projektes war die Optimierung der Anlage zur Erreichung einer effizienten Abtrennung von Ammoniumstickstoff aus Geflügelmist. Dazu wurde zunächst der Ist-Zustand der Anlage und entsprechende Optimierungspotentiale durch gezielte Versuchsreihen identifiziert. Zum Schluss erfolgte eine wirtschaftliche Bewertung der optimierten Anlage. Zu Beginn der Versuchsreihen wurden die verwendeten Substrate (Hühnertrockenkot, Hähnchenmist, Putenmist) analysiert. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 3-1 dargestellt. Die Substrate wurden aufgrund von logistischen Vorteilen ausgewählt. Die Versuchsanlage befindet sich am Standort eines Lohnunternehmers. Dieser stellte während den Versuchsreihen ausreichende Mengen von den genannten Substraten zur Verfügung. Im Verlauf des Projektes wurden die verschiedenen Substrate in unterschiedlichen Zusammensetzungen getestet.

Tabelle 3-1: Analysenergebnisse der verwendeten Substrate

Nährstoffe	Einheit	Putenmist	Hähnchen- mist	Hühner- trockenkot
Calcium (CaO)	kg/t	10,57	14,18	25,79
Kalium (K <sub>2</sub> O)	kg/t	18,95	19,09	10,75
Magnesium (MgO)	kg/t	6,35	5,42	5,04
Gesamt-Stickstoff (N)	kg/t	26,66	22,95	15,57
Ammonium-Stickstoff (NH <sub>4</sub> -N)	kg/t	3,00	7,10	3,90
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg/t	8,30	13,98	13,43
Trockensubstanz	%	53,60	47,10	38,60

#### 3.1 DIE PILOTANLAGE

Zu Beginn der Untersuchungen wurde der Status quo der Anlage ermittelt. Dazu wurden die für die Bewertung des Prozesses entscheidenden Parameter Behandlungszeit, Kalkanteil und Substratmenge aufgenommen. Anschließend wurden Stoffstrombilanzen für Feststoff und Ammonium-Stickstoff erstellt. Abbildung 3-1 zeigt die Stoffströme bei der Erstaufnahme der Anlage. Die Darstellung der ersten Versuchsergebnisse dient als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Optimierungen. In der Anlage wurden 450 kg Substrat behandelt, das sich aus

Hähnchenmist (45 %), Putenmist (45 %) und Hühnertrockenkot (10 %) zusammensetzten. Die Anlage wurde mit den Einstellungen von 2 % Brantkalk (9 kg von 450 kg Gesamtbeladung) und einer Behandlungszeit von 7 Minuten betrieben. Durch Analyse des unbehandelten Substrates und des Produktes sowie der Ammoniumsulfatlösung wurde eine Ammonientfrachtung von 48,3 % aus dem Mist ermittelt.

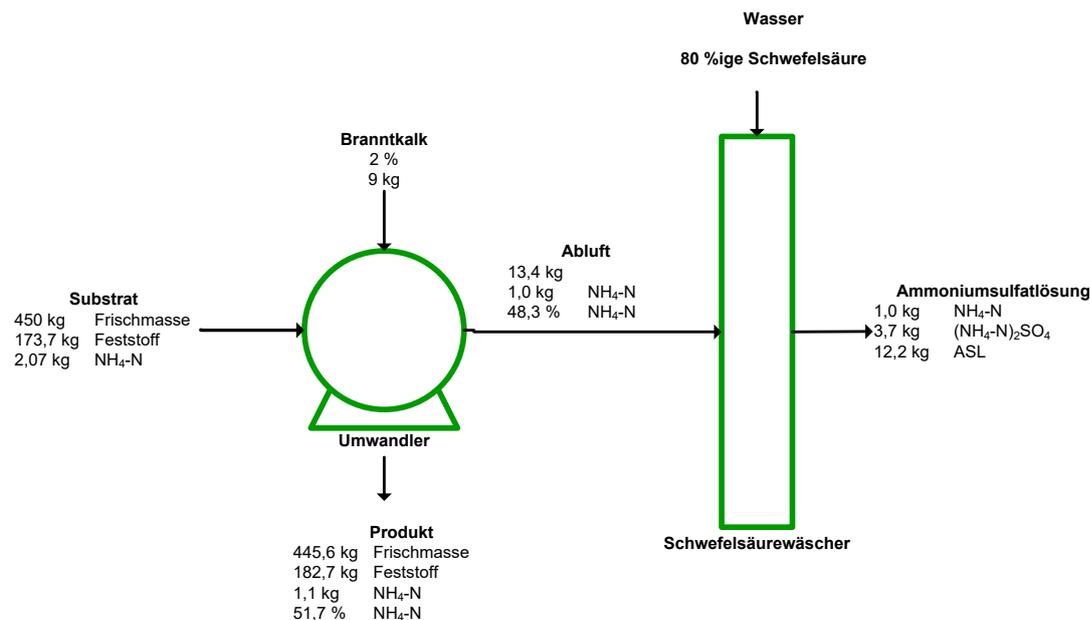


Abbildung 3-1: Darstellung der Stoffströme bei Erstaufnahme der Anlage

Gleichzeitig befand sich auch die gesamte Förderung und Lagerung von Brantkalk in einem geschlossenen System, um hier mögliche Emissionen in die Umwelt auszuschließen. Das behandelte Material wurde am Ende des Prozesses vom Umwandler in einen Produktbehälter gefördert. Dieser war geschlossen und mit einem Absaugsystem inklusive eines Schwefelsäurewäschers versehen. Aufgrund der geschlossenen Fahrweise der gesamten Anlage wurden keine Emissionen an die Umwelt abgegeben.

### 3.2 OPTIMIERUNGSVERSUCHE

Die Anlage wurde durch technische Optimierungsmaßnahmen ergänzt und verbessert. Um Verschmutzungen durch Staubeintrag in der Ammoniumsulfatlösung (ASL) zu reduzieren und dadurch ein höherwertiges Produkt zu erzielen, ist ein Filterpaket in dem Wäscher verbaut worden. Aufgrund der verschiedenen technischen

und verfahrenstechnischen Anpassungen der Anlage konnte als Produkt eine 30 %ige Ammoniumsulfatlösung erzielt werden. Die 30 %ige ASL ist mit den Qualitäten von handelsüblicher ASL vergleichbar. Da in dem Prozess konzentrierte Schwefelsäure verwendet wird, wurde ein besonderer Wert auf die Sicherheit gelegt. Die Anlage ist so konstruiert, dass auch bei Leckagen keine gefährlichen Stoffe austreten können.

Neben den beschriebenen technischen Optimierungen wurden im Verlauf des Projektes Versuche zum optimalen Branntkalk- und Substrateinsatz sowie zur Beurteilung der Funktion des Schwefelsäurewäschers und zur Wirtschaftlichkeit durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihen dazu werden in diesem Kapitel beschrieben.

### 3.2.1 BETRIEBSBEDINGUNGEN

Die optimale Einstellung der Parameter Branntkalkanteil, Behandlungszeit und Substratzusammensetzung führen zu einer maximalen Ammoniumentfrachtung. In diesem Abschnitt werden die Untersuchungen in folgender Reihenfolge dargestellt:

- Untersuchungen zum Kalkeintrag
- Vergleich von zwei verschiedenen Branntkalksorten
- Optimierung des Wäschers
- Untersuchung des Einflusses der Behandlungszeit
- Untersuchung verschiedener Substratzusammensetzungen

#### **Untersuchungen zum Kalkeintrag**

Ausgehend von den bisherigen Erfahrungen wurde zur Durchführung der ersten Versuchsreihe an der Anlage ein Branntkalkanteil von 3,5 und 6,5 % sowie eine Behandlungszeit von 5 und 10 Minuten eingestellt. Diese wurden in Dreifachansätzen durchgeführt und analysiert. Nach Auswertung der analysierten Proben wurden stark schwankende Ammoniumentfrachtungen, trotz gleichbleibender Versuchsparameter, festgestellt.

Um die stark schwankenden Ergebnisse zu analysieren wurden die verschiedenen Stoffströme bilanziert. Dabei stellte sich heraus, dass es teilweise zu erheblichen Abweichungen des Branntkalkeintrags kam. Tabelle 3-2 zeigt die Messwerte für den Branntkalkanteil in der Probe inklusive der Mittelwerte und der Standardabweichungen. Dem gegenüber werden die eingestellte Branntkalkmenge und Behandlungszeit gestellt.

Tabelle 3-2: Analyseergebnisse der eingestellten Zugabemengen Branntkalk und der analysierten Branntkalkeinträge im Vergleich

Probenbezeichnung	Branntkalkmenge eingestellt (%)	Branntkalkmenge gemessen (%)	Behandlungszeit (min)
1-1a	3,5	6,7	5
1-1b	3,5	3,5	5
1-1c	3,5	1,3	5
1-2a	3,5	1,3	10
1-2b	3,5	1,0	10
1-2c	3,5	0,3	10
Mittelwert	3,5	2,4	-
Standardabweichung	0,0	2,5	-
1-3a	6,5	7,2	5
1-3b	6,5	7,9	5
1-3c	6,5	7,8	5
1-4a	6,5	5,5	10
1-4b	6,5	1,8	10
1-4c	6,5	5,2	10
Mittelwert	6,5	5,9	-
Standardabweichung	0,0	2,1	-

Bei Einstellung eines Branntkalkanteils von 3,5 % variiert der tatsächliche Branntkalkeintrag von 0,3 bis 6,7 %. Aus den Messwerten ergibt sich ein Mittelwert von 2,4 % mit einer Standardabweichung von 2,5 %. Bei einem eingestellten Branntkalkanteil von 6,5 % ergab sich eine Spannweite der Messwerte von 6,1 %. Der Mittelwert beträgt 5,9 % mit einer Standardabweichung von 2,1 %. Die Ergebnisse sind für den direkten Vergleich in Abbildung 3-2 dargestellt.

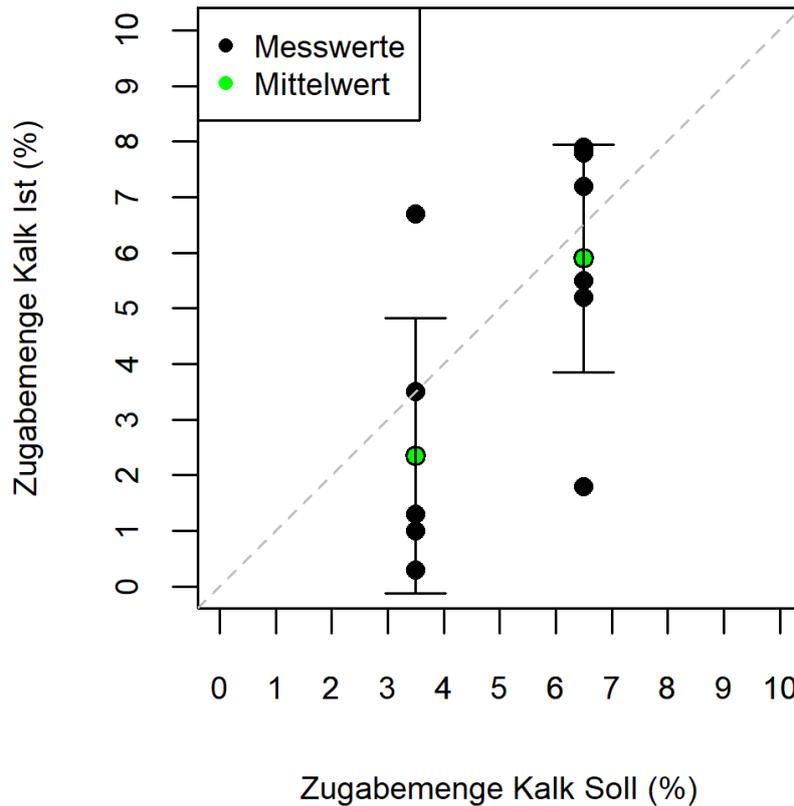


Abbildung 3-2: Abweichungen zwischen eingestellter und tatsächlicher Zugabemenge

Für beide Einstellungen konnten keine akzeptablen Versuchsbedingungen erzielt werden. An der Anlage wurden auf Basis dieser ersten Daten die folgenden technischen Änderungen und Überprüfungen vorgenommen.

- konstruktive Veränderungen am Branntkalksilo, um mögliche Feuchtigkeitseinträge zu verhindern und dadurch Verklumpungen und ungewollte Reaktionen von Branntkalk und Wasser zu vermeiden
- Optimierungen wie freistehende Anlagenteile um Einflüsse auf die Wiegeergebnisse zu vermeiden
- technische Überprüfungen der Wiegeeinrichtung, Rührreinheit für das Substrat im Vorlagebehälter und die gemeinsame Einbringung von Branntkalk und Substrat

Nach den technischen Änderungen an der Anlage wurde die Versuchsreihe zur Überprüfung des Erfolgs der Maßnahmen wiederholt. Dabei wurde bei einer Branntkalkeinstellung von 3,5 % ein Mittelwert von 2,8 %, eine Spannweite der

Versuchsergebnisse von 0,1 % und eine Standardabweichung von 0,1 % erzielt. Bei einer Einstellung von 6,5 % Branntkalk wurde ein Mittelwert 5,6 %, eine Spannweite von 0,8 % und eine Standardabweichung von 0,3 % erreicht. Die Branntkalkdosierung wurde eingestellt, bis die Werte der Einstellung mit den gemessenen Werten übereinstimmten.

**Ergebnis:** Aufgrund der beschriebenen technischen Anpassungen können nun kontinuierlich präzise Kalkmengen eingetragen und reproduzierbare Versuchsergebnisse erzielt werden.

### **Vergleich von zwei verschiedenen Branntkalksorten**

Nach der Anpassung der Anlage wurden Untersuchungen zur näheren Betrachtung des Branntkalkeinsatzes durchgeführt. Hierfür wurden sowohl die Branntkalkqualität als auch die Einsatzmenge untersucht. Die untersuchten Branntkalkqualitäten wurden in Folge von Fachgesprächen mit Vertretern aus der Kalkindustrie ausgewählt. Branntkalksorte 1 beinhaltet einen Calciumoxidanteil von ca. 95 % und Branntkalksorte 2 einen Calciumoxidanteil von 90 %. Außerdem handelt es sich bei beiden um schnell reagierenden Kalk (gemahlen). Diese wurden ausgewählt, um auch eine kürzere Behandlungszeit zu erzielen. Betrachtet wurden beide Branntkalksorten darüber hinaus mit der Zielsetzung eine maximale Ammoniumentfrachtung und möglichst geringe Betriebskosten zu erreichen. Hintergrund dafür ist, dass die Behandlungszeit einen großen Anteil der Betriebskosten ausmacht. Kurze Behandlungszeiten führen zu einem höheren Durchsatz und haben somit maßgeblich Anteil an der Optimierung der Betriebskosten.

Die nachfolgende Versuchsreihe ermittelt den optimalen Betriebspunkt hinsichtlich der Ammoniumentfrachtung und Wirtschaftlichkeit. Dafür sind in Tabelle 3-3 die Versuchsparameter und die aus den Ammonium-Stickstoffanalysen resultierenden Ammoniumentfrachtungen für die beiden untersuchten Branntkalksorten dargestellt.

Tabelle 3-3: Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff in Abhängigkeit von der Branntkalksorte, dem Branntkalkanteil und der Behandlungszeit

Probenbezeichnung	Behandlungszeit (min)	Branntkalkanteil (%)	Ø Abscheidung NH <sub>4</sub> -N (%)	Branntkalksorte
2-1	5	1,5	0	1
2-2	5	4	25,3	1
2-3	5	6,5	29,3	1
2-4	10	1,5	32,1	1
2-5	10	4	43,4	1
2-6	10	6,5	49,1	1
3-1	5	1,5	5,2	2
3-2	5	4	36,2	2
3-3	5	6,5	43	2
3-4	10	1,5	24,6	2
3-5	10	4	38,9	2
3-6	10	6,5	46,3	2

Bei der Probe 2-1 konnte keine Ammoniumentfrachtung festgestellt werden. Mit einem Branntkalkeintrag von 1,5 % und einer Behandlungszeit von 5 Minuten ist nicht genügend Branntkalk in den Umwandler gelangt bzw. hatte nicht ausreichend Zeit zu reagieren. Bei Probe 3-1 wurde, mit einer Behandlungszeit von 5 Minuten und einem Branntkalkanteil von 1,5 %, eine Ammoniumentfrachtung von 5,2 % ermittelt. Die Erhöhung von Behandlungszeit und Branntkalkanteil führte in allen Fällen zu einer Erhöhung der Ammoniumentfrachtung.

Bei einem Branntkalkanteil von 6,5 % ist prinzipiell ausreichend Branntkalk im Umwandler, jedoch sind 5 Minuten Reaktionszeit zu kurz, sodass nur eine Ammoniumentfrachtung von 29,3 % (Probe 2-3) erreicht werden konnte. Bei gleichem Branntkalkanteil und einer Erhöhung der Behandlungszeit auf 10 Minuten wurde eine gute Ammoniumentfrachtung von 43 % erzielt. Bei der Branntkalksorte 2 führte ein Branntkalkanteil von 6,5 % und eine Behandlungszeit von 5 Minuten zu 43 % Ammoniumentfrachtung. Die maximal erreichte Ammoniumentfrachtung beträgt 49,1 % bei 10 Minuten Behandlungszeit und einer Zugabe von 6,5 % der Branntkalksorte 1 (Probe 2-6).

Die maximal erreichte Ammoniumentfrachtung für Branntkalksorte 2 war 46,3 % bei einem Branntkalkanteil von 6,5 % und eine Behandlungszeit von 10 Minuten (Probe 3-6).

Über die längere Behandlungszeit von 10 Minuten lässt sich somit eine höhere Abscheidung des Ammonium-Stickstoffs erzielen. Weitere Versuchsreihen mit einer Behandlungszeit > 10 Minuten und einem Branntkalkanteil von > 6,5 % zeigten keine weitere Erhöhung der Ammoniumentfrachtung. Aufgrund der besseren Ammoniumentfrachtung bei der Behandlung mit Branntkalksorte 1 wurde im Verlauf der nächsten Versuchsreihen die Branntkalksorte 1 verwendet.

Die Behandlungskosten bei einer Einstellung von 6,5 % Branntkalk, 10 Minuten Behandlungszeit und Verwendung von Branntkalksorte 1 (49,1 % Ammoniumentfrachtung) betragen 15,11 €/t. Grundsätzlich lassen sich auch Erlöse durch den Verkauf der entstehenden ASL erzielen. Diese Erlöse können zur Reduzierung der Betriebskosten beitragen.

**Ergebnis:** Ziel der Optimierungsmaßnahmen war eine maximale Stickstoffentfrachtung von 70 %. Nach diesen ersten Versuchsreihen wurde eine Ammoniumentfrachtung von 49,1 % erreicht. Um diese weiter zu erhöhen wurden technische Anpassungen und weitere Versuchsreihen durchgeführt, die nachfolgend dargestellt werden.

1. Neuauslegung und Überprüfung des Schwefelsäurewäschers
2. Erneute Versuchsreihen zu den Versuchsparametern
3. Untersuchungen zu verschiedenen Substratzusammensetzungen

### Optimierung des Wäschers

Der bei der Behandlung entstehende Ammoniak in der Abluft muss für einen sicheren Betrieb der gesamten Anlage aus der Abluft gewaschen werden. Dies erfolgt durch eine gezielte Abluftabsaugung im Umwandler, der sauren Wäsche und der Rückführung der gereinigten Luft. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

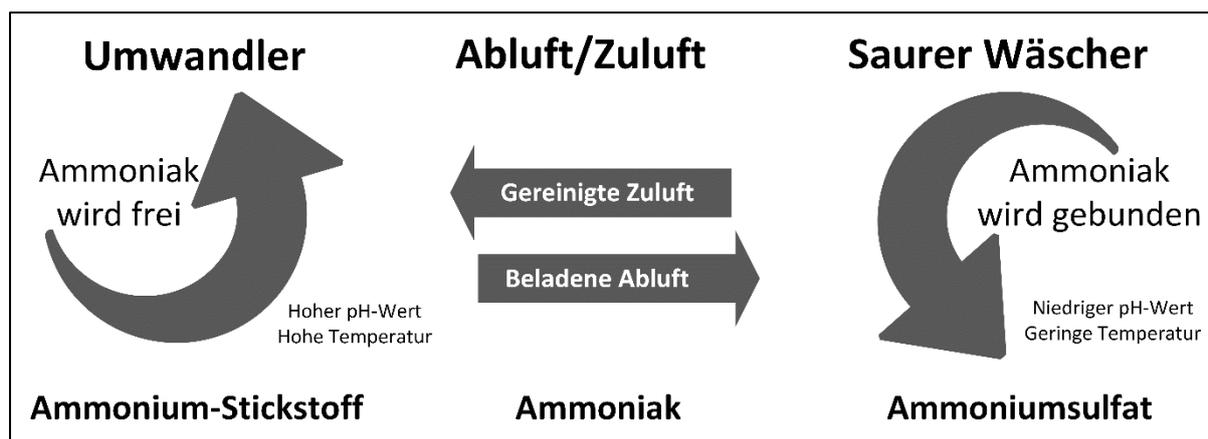


Abbildung 3-3: Prinzip der Stickstoffrückgewinnung mittels Ammoniakwäsche  
Aufgrund der erfolgten Optimierungen an der Anlage entstehen größere Mengen Ammoniak als zuvor, weshalb eine Anpassung und technische Auslegung des Wäschers notwendig wurde.

Aufgrund von Staubeinträgen in den Wäscher war zu Beginn kein regulärer Betrieb möglich. Nachdem dieser Defekt, durch Einbau eines zusätzlichen Luftfilters, behoben werden konnte, wurde die Bilanzierung der Stoffströme des Wäschers durchgeführt.

Die für die Auslegung relevanten Daten sind in der Tabelle 3-4 dargestellt. Der Volumenstrom der Abluft wurde aufgrund der hohen Ammoniakkonzentration von 200 m<sup>3</sup>/h auf 2.000 m<sup>3</sup>/h erhöht.

Tabelle 3-4: Auslegungsdaten für die Modellierung des sauren Wäschers

<b>Ströme</b>	Flüssigkeit	Gas	Betriebstemperatur 50 C Betriebsdruck 1.013 bar
	<b>Wasser</b>	<b>Luft</b>	
Molmasse	18 kg/kmol	29 kg/kmol	
Dichte	988 kg/m <sup>3</sup>	1,09 kg/m <sup>3</sup>	
Viskosität	0,57 cP	0,0192 cP	
Oberflächensp.	0,0684 N/m		
Dampfdruck	1,25E4 Pa		
Molbeladung Eintritt	0	0,0154	
Molbeladung Austritt	0,0021	4,61E-5	
Konzentration Eintritt	0 g/m <sup>3</sup>	10 g/m <sup>3</sup>	
Konzentration Austritt	1,99E3 g/m <sup>3</sup>	0,03 g/m <sup>3</sup>	
Diffusionskoeffizient	3,67E-5 cm <sup>2</sup> /s	0,268 cm <sup>2</sup> /s	
Stoffübergangskoeffizient	2,7E-4 m/s	4,9E-2 m/s	
Molenstrom	5,4889E5 mol/h	75172 mol/h	
Massenstrom	9880 kg/h	2180 kg/h	
Volumenstrom	10 m <sup>3</sup> /h	2000 m <sup>3</sup> /h	

Die Ammoniakbeladung der Abluft wurde auf Basis der Versuchsergebnisse auf 10 g/m<sup>3</sup> festgelegt. Die Austrittsbeladung mit Ammoniak der Abluft aus dem Wäscher wurde mit einem Zielwert von 0,3 g/m<sup>3</sup> gesetzt. Dieser ist abgeleitet aus den Anforderungen der TA Luft zur sicheren Einhaltung der Luft „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft“. Die Anlage ist als Umluftsystem aufgebaut.

Die technische Auslegung des Wäschers erfolgte mit Hilfe der Software „Rapsody“ der Firma Rauschert Verfahrenstechnik. Die Ergebnisse der Auslegung sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

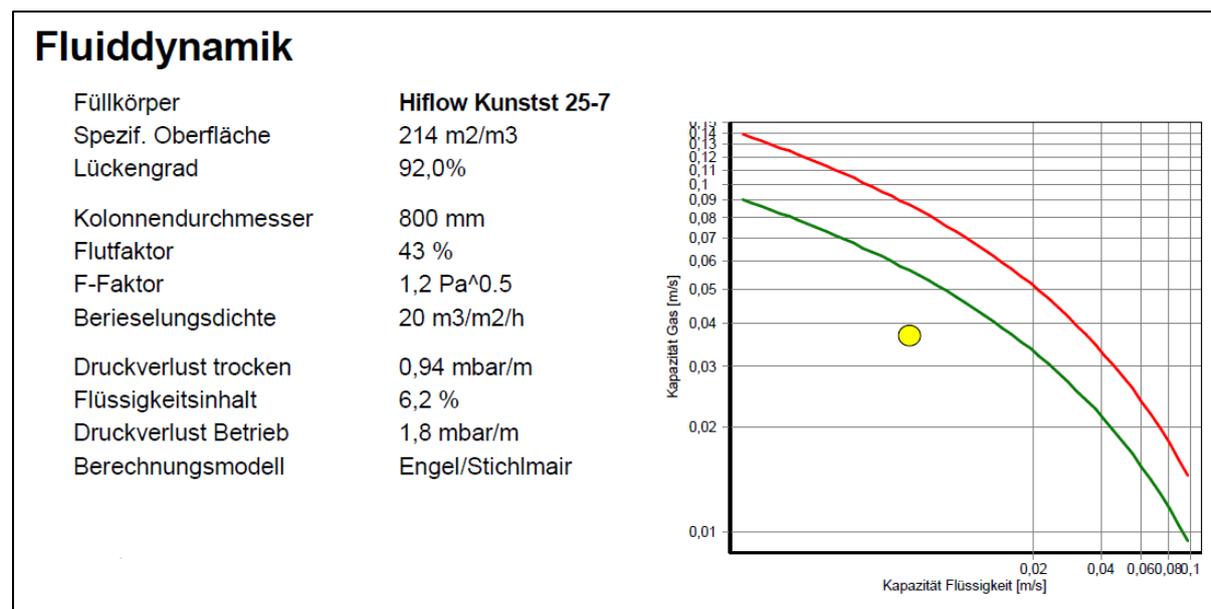


Abbildung 3-4: Simulationsbericht zur sauren Wäsche von Ammoniak

Ziel der Auslegung war es auf Basis der gegebenen Stoffströme von Luft und Waschlösung den optimalen Betriebspunkt in Bezug auf die verwendeten Füllkörper und die Geometrie der Kolonne zu ermitteln. Im Vorgängerprojekt wurden die Füllkörper „Hiflow 15-7“ verwendet. Die Auswahl der Füllkörper in dieser Auslegung wurde nochmals evaluiert. Aufgrund ihrer Eignung gegenüber erhöhter Schmutzfrachten (wie vorherige Füllkörper auch) und durch ihre etwas geringere aber dennoch hohe spezifische Oberfläche wurden in dieser Auslegung die Füllkörper „Hiflow 25-7“ ausgewählt.

Das Diagramm zeigt die Staugrenze (grün) und die Flutgrenze (rot). Der gewählte, optimale Betriebspunkt der Anlage ist gelb dargestellt. Bei einem Betriebspunkt oberhalb der Staugrenze wird die Waschflüssigkeit von der aufströmenden Luft behindert. Dadurch ist ein intensiver Stoffaustausch nicht mehr gewährleistet und es kommt zu Druckverlusten in der Kolonne. Oberhalb der Flutgrenze wird die Waschflüssigkeit vollständig von der Luft am Abfließen gehindert. Ein Betrieb oberhalb dieser Kurve ist technisch nicht möglich. Die Auslegung des Wäschers erfolgte deswegen auch unter Berücksichtigung von Beladungsspitzen. In diesem Fall wurde ein Kolonnendurchmesser von 800 mm gewählt. Basierend auf den Daten und den technischen Werten ergaben sich die in Tabelle 3-6 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 3-5: Simulationsergebnis für den sauren Wäscher

<b>Stoffübergang</b>	
Übergangskomponente	<b>Ammoniak</b>
Molmasse	17,3 kg/kmol
Henrykoeffizient	2,64 bar
Effektive Austauschfläche	112 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Übergangseinheitenzahl (NTU)	8,3
Übergangseinheitshöhe (HTU)	0,27 m
Schüttungshöhe nach Modell	2,2 m
Gewählte Schüttungshöhe	2,5m
Berechnungsmodell	Onda

**Ergebnis:** Nach diesem Modell ergab sich eine Höhe der Füllkörperschüttung von 2,2 m. Zum sicheren Umgang mit den bereits erwähnten Beladungsspitzen wird eine Gesamtschüttungshöhe für den Wäscher von mindestens 2,5 m empfohlen. Im Vergleich zum Vorgängerprojekt wurden durch die Auslegung die Luftmenge verzehnfacht und die Kolonnengeometrie vergrößert. Der Kolonnendurchmesser hat sich von 400 mm auf 800 mm verdoppelt und die Höhe der Füllkörperschüttung von 1,5 m auf 2,5 m erhöht.

### Untersuchung des Einflusses der Behandlungszeit

Nach der Optimierung des Wäschers wurde der Einfluss der Behandlungszeit auf die Ammoniumentfrachtung, mit dem Ziel die Betriebskosten zu reduzieren, untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Tabelle 3-6 aufgeführt.

Tabelle 3-6: Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff nach Optimierung des Schwefelsäurewäschers

Probenbezeichnung	Behandlungszeit (min)	Brantkalkanteil (%)	Ø Abscheidung NH <sub>4</sub> -N (%)
4-1	5	3	26,3
4-2	5	5	59,3
4-3	10	3	54,7
4-4	10	5	70,2
4-5	15	3	53,9
4-6	15	5	68,3
4-7	20	3	57,4
4-8	20	5	70,2

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die optimale Einstellung von Brantkalk und Behandlungszeit in Verbindung mit der Optimierung des Wäschers eine Ammoniumentfrachtung von 60-70 % realisierbar ist. Die in Abbildung 3-5 dargestellten Versuchsergebnisse beschreiben den Verlauf der Ammoniumentfrachtung.

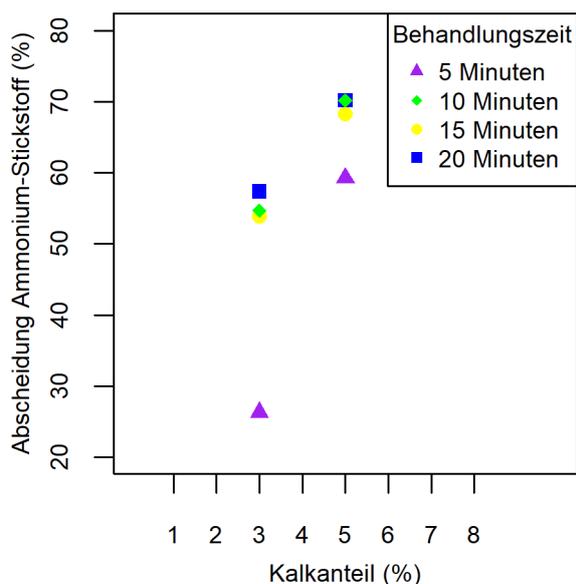


Abbildung 3-5: Abscheidungsraten von Ammonium-Stickstoff nach Optimierung des Schwefelsäurewäschers

Somit konnte nach der Umstellung und Anpassung der Anlage die Zielgröße der Ammoniumentfrachtung von 70 % erreicht werden. Dies wurde erreicht bei einem Branntkalkanteil von 5 % und einer Behandlungszeit > 10 Minuten.

Dem Substrat wird durch die Behandlung nicht nur der Ammoniumanteil entzogen, es verändert sich auch optisch und strukturell stark. Daraus verbessert sich das Substrathandling beim Einsatz in einer Biogasanlage (z.B. Rührfähigkeit) sowie die Verfügbarkeit für Mikroorganismen aufgrund des Substrataufschlusses. Dies zeigt der optische Vergleich der unbehandelten und behandelten Probe in der Abbildung 3-6.



Abbildung 3-6: Vergleich der behandelten (links) und unbehandelten (rechts) Probe

Nach Abschluss dieser Versuchsreihen erfolgte eine wirtschaftliche Betrachtung auf Basis der ermittelten Betriebsparameter. Zielsetzung der nachfolgenden Analyse war es, die Kostenbestandteile zu identifizieren und die jeweils erreichte Ammoniumentfrachtung in Bezug auf die jeweiligen Behandlungskosten zu setzen. Nachfolgend werden die Behandlungskosten für eine Behandlung mit 5 % Branntkalk und 10 Minuten Behandlung (Abbildung 3-7), bei einer Ammoniumentfrachtung von 70 %, dargestellt.

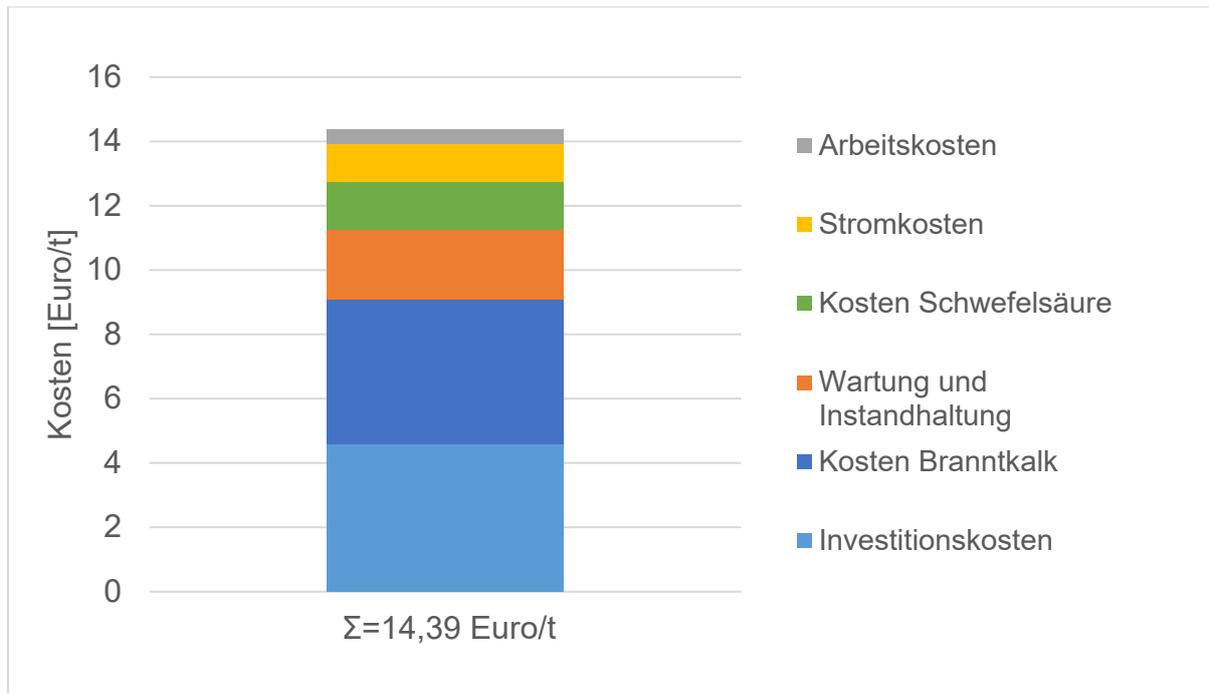


Abbildung 3-7: Kosten bei drei verschiedenen Einstellungen an der Anlage

Die Kosten für Strom, Instandhaltung, Wartung sowie Arbeitskosten bilden einen festen und wenig beeinflussbaren Teil der Gesamtkosten ab. Die Kosten für die Schwefelsäure sind abhängig von dem Bezugspreis und von der erreichten Ammoniumentfrachtung. Durch Auswahl einer 80 %igen Schwefelsäure wurde in diesem Projekt die wirtschaftlichste Variante ausgewählt. Die Investitionskosten bilden zusammen mit den Branntkalkkosten den großen Anteil der Behandlungskosten. Aufgrund der in den Versuchsreihen optimierten Behandlungszeit und Branntkalkmenge konnten bereits die Behandlungskosten deutlich reduziert werden. Dennoch besteht weiteres Optimierungspotential. Je nach Betriebskonzept könnte eine Ammoniumstickstoffentfrachtung von 55 % - 60 % bereits ausreichend sein. Je nach Zielsetzung lässt sich der Betrieb der Vorbehandlung optimieren und die Behandlungskosten reduzieren.

In Abbildung 3-8 sind unter Berücksichtigung der optimalen Anlageneinstellungen die Kosten in Abhängigkeit von der Ammoniumabscheidung aufgezeigt. Dafür wurde eine konstante Behandlungszeit von 10 Minuten betrachtet. Durch Erhöhung des Branntkalkanteils wurde die Ammoniumentfrachtung erhöht. Eingestellt wurde ein Branntkalkanteil von 1,5 %, 3 % und 5 %. Dabei wurde eine Ammoniumentfrachtung von 19,6 %, 54,7 % und 70,2 % erreicht (Tabelle 3-7).

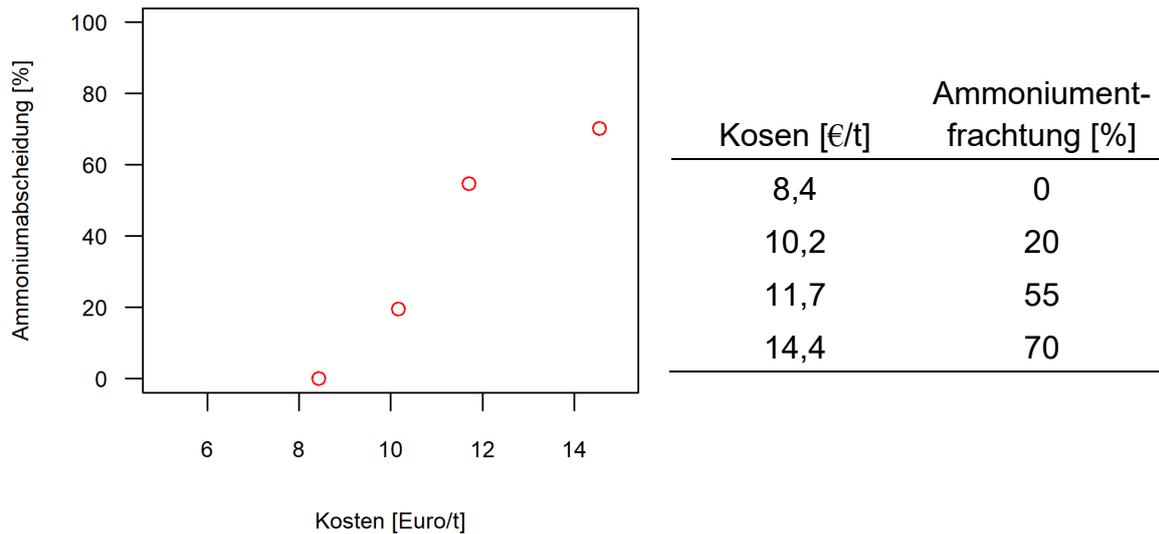


Abbildung 3-8: Kosten der Behandlung in Abhängigkeit von der Ammoniumabscheidung

**Ergebnis:** Bei einem Branntkalkanteil von 5 % und einer Behandlungszeit von 10 Minuten konnte eine Abscheidung von 70 % Ammonium-Stickstoff erreicht werden. Die Behandlungskosten lagen bei diesem Betrieb bei 14,39 €/t. Für eine Ammoniumentfrachtung von 55 % belaufen sich die Kosten auf 11,70 €/t.

### Untersuchungen verschiedener Substratzusammensetzungen

In weiterführenden Versuchsreihen wurde die Substratzusammensetzung untersucht. Hintergrund war vor allem, dass es in den Versuchsreihen bei Einsatz höherer HTK-Anteile vermehrt zu Verklebungen in der Anlage kam. Diese Beobachtung und weitere Erkenntnisse zur Substratzusammensetzung wurden auf Basis dieser Versuchsreihe untersucht. Darüber hinaus wurde nach möglichen optimalen Substratzusammensetzungen gesucht, um gegebenenfalls die Behandlungszeit weiter zu verkürzen. In dieser Versuchsreihe wurden insgesamt vier verschiedene Substratzusammensetzungen überprüft. In der nachfolgenden Abbildung 3-9 werden diese dargestellt.

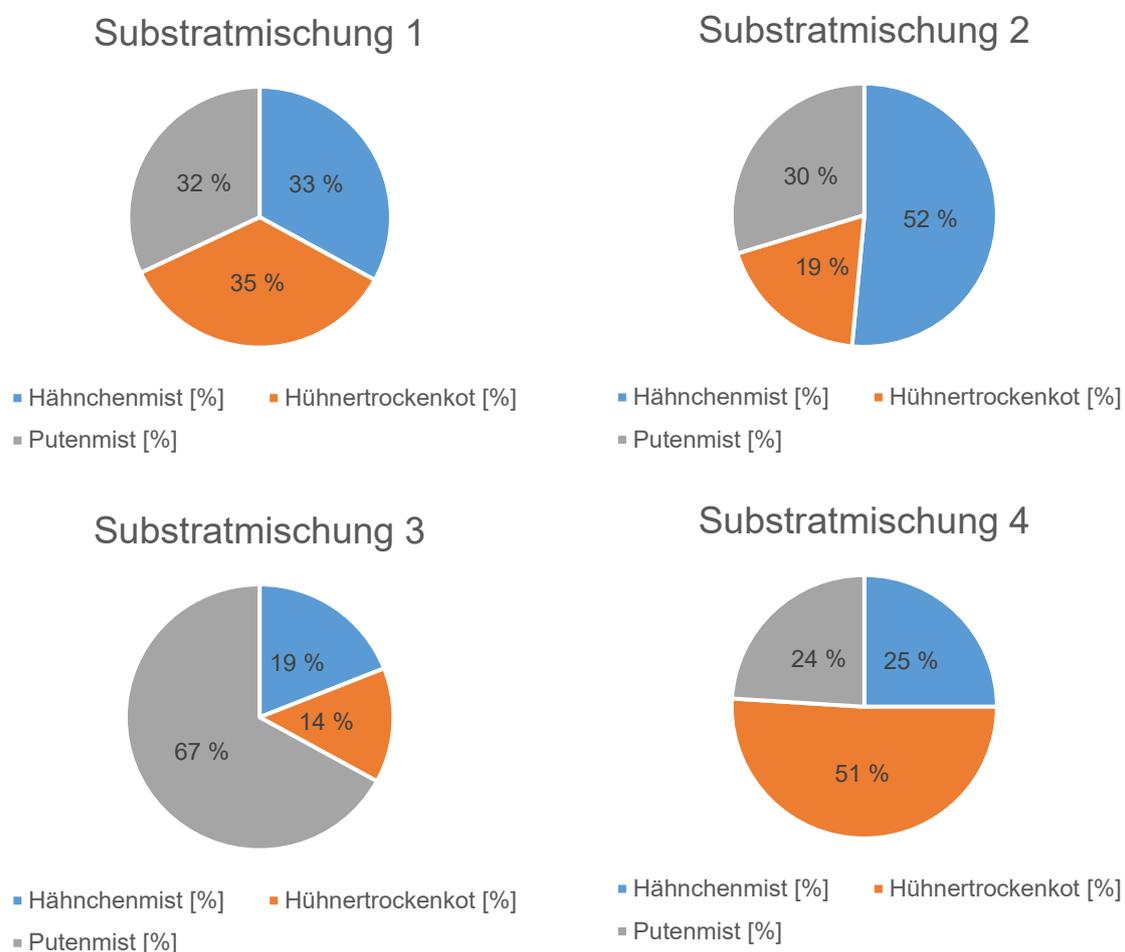


Abbildung 3-9: Substratzusammensetzungen

Wie ermittelt wurde, hatte sich die Verwendung von 5 % Branntkalk als Optimum herausgestellt. Die Substratzusammensetzungen wurden jeweils bei 7 und 10 Minuten Behandlungszeit untersucht. Die erreichten Ammoniumabscheidungen der anderen Substrate sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7: Ammoniumentfrachtungen abhängig vom Trockenrückstands des Ausgangsubstrates

Nr.	Einheit	Trockenrückstand	Abscheidung NH <sub>4</sub> -N 10 min	Abscheidung NH <sub>4</sub> -N 7 min
1	[%]	46,2	65	64
2	[%]	47,9	61	53
3	[%]	50,3	62	50

Die Abscheidegrade von Ammoniumstickstoff liegen bei drei Substratzusammensetzungen in einem Bereich zwischen 50 und 65 %. Bei den Substraten 2 und 3 wurde durch eine längere Behandlungszeit von 10 Minuten eine Steigerung der Abscheidegrade um ca. 10 % erreicht. Bei einer Zusammensetzung von Hühnertrockenkot (HTK), Putenmist und Hähnchenmist zu gleichen Anteilen (Substrat 3) wurde eine maximale Abscheidung von ca. 65 % erreicht. Eine verlängerte Behandlungszeit hatte keinen weiteren Einfluss. Die Behandlung von Substrat 4 führt zu keiner Ammoniumabscheidung. Die Versuchsergebnisse zeigen die bekannte Abhängigkeit der Ammoniumentfrachtung vom Trockenrückstand des Ausgangsubstrates.

Je geringer der Trockenrückstand des Ausgangssubstrates, desto höher die Ammoniumentfrachtung. Damit einher geht ebenfalls eine schnellere Reaktion mit dem Branntkalk.

Die Beimischung von HTK kann aufgrund des geringeren Trockenrückstandes gegenüber Hähnchenmist und Putenmist, ein gutes Mittel zur Senkung des Trockenrückstandes der Mischung sein und damit zur Verbesserung der Ammoniumentfrachtung führen. Dabei erscheint eine Beimischung von etwa 33 % HTK als optimal. In Abbildung 3-10 sind die Versuchsergebnisse und beschriebenen Schlussfolgerungen dargestellt.

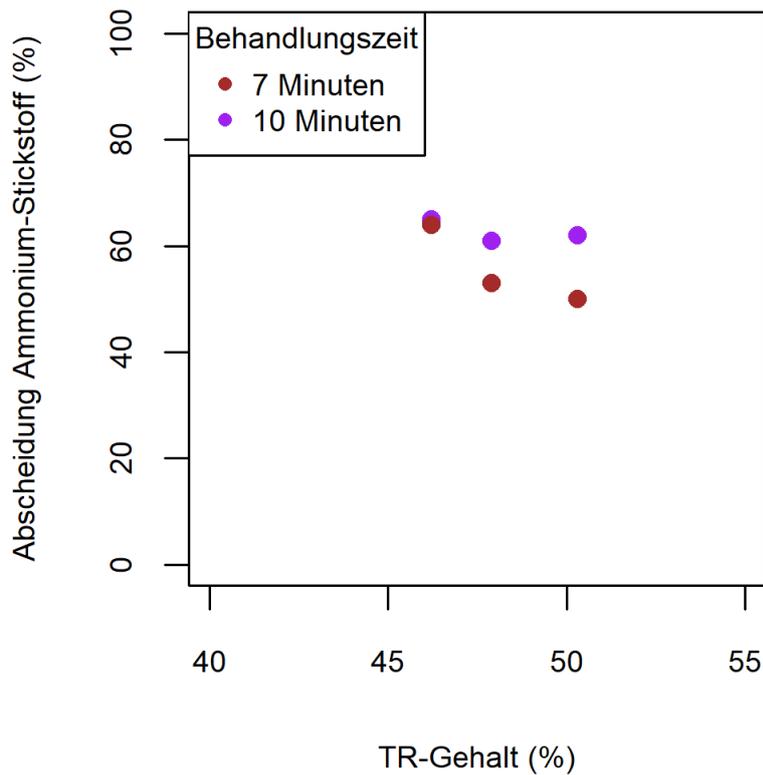


Abbildung 3-10: Ammoniumentfrachtungen in Abhängigkeit vom Trockenrückstand (TR) des Ausgangssubstrates und der Behandlungszeit

**Ergebnis:** Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen zeigten geringfügige Abweichungen in der Ammoniumentfrachtung bei einer Substratzusammensetzung mit gleichen Anteilen. Auf Basis der erfolgten Untersuchungen konnte bei dieser Zusammensetzung mit einem Branntkalkanteil von 5 % und einer Behandlungszeit von 7 Minuten eine Ammoniumentfrachtung von 65 % erzielt werden.

### 3.2.2 HYGIENISIERUNG

Für eine hygienische Unbedenklichkeit müssen biogene Reststoffe oftmals entsprechend behandelt werden. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass eine Vielzahl von Mikroorganismen in Geflügelmist enthalten sind. Unter den Bakterien, Pilzen und Viren können auch eine Vielzahl pathogener Erreger isoliert werden. Darunter befinden sich beispielsweise Coronaviren, Rotaviren, Vogelgrippeviren, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas* spp., *Escherichia coli*, *Camphylobacter* spp., *Clostridium perfringens*, *Salmonella* spp. und *Eimeria* spp. (Kelley et al., 1994; Lopes et al., 2013; Stringfellow et al., 2010). Hygienisierung beschreibt ein Verfahren bei dem die Anzahl der koloniebildenden Organismen um bis zu 5 log<sub>10</sub>-Stufen (99,999 %) reduziert wird (Pospiech et al., 2014). Dabei steht eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren zur Verfügung.

Die Hygienisierung/Stabilisierung über das Halten eines pH-Wertes über 12 für mindestens 2 Stunden ist nur für die Stabilisierung von Klärschlämmen zugelassen. Für die Hygienisierung von landwirtschaftlichen Nebenprodukten sind die Bedingungen wie in der EG-Verordnung 1069/2009 vorgeschrieben (*VERORDNUNG (EG) Nr. 1069/2009*. Europäische Union, 2009). Hier ist der Stand der Technik das Einbringen von pumpbaren Schlämmen in beheizte Behälter und das dortige Halten mit Homogenisierung von 70 °C über eine Stunde, wobei die Herkunft der Wärmequelle unerheblich ist. Die hier geplante Verfahrenstechnik ist innovativ, da diese sowohl mit pumpbaren Schlämmen als auch mit stichfesten Substraten arbeiten kann. Die Ammoniakrückgewinnung ist integraler Bestandteil. Jegliche Reaktionswärme wird effizient genutzt und zur Hygienisierung und anteilig auch zur Trocknung eingesetzt. (Wetter et al., 2017)

Neben der regionalen Verwertung ist auch die Aufbereitung zu transportwürdigen Feststoffen bzw. Schlämmen und einleitbaren Flüssigkeiten möglich. Der Export der überschüssigen Nährstoffe führt zu einer Entlastung der regional überfrachteten Ackerflächen und insbesondere zu einer Verringerung der Grundwasserbelastung. Für die hygienische Unbedenklichkeit müssen schlammartige Biomassen für die Produktion eines Düngemittels mit geeigneten Verfahren hygienisiert werden. Die Ergebnisse der Hygienisierung werden nachfolgend dargestellt. In den Versuchsreihen des Vorgängerprojektes erfolgte die Hygienisierung durch Verwendung einer externen Heizquelle in Form eines Heizölbrenners. In diesem Projekt wird zur Hygienisierung der Branntkalk Einsatz so optimiert, dass auf den Heizölbrenner verzichtet werden kann. Abbildung 3-11 zeigt dazu den Temperaturverlauf über eine Stunde bei Einsatz von 8 % Kalk in Putenmist.

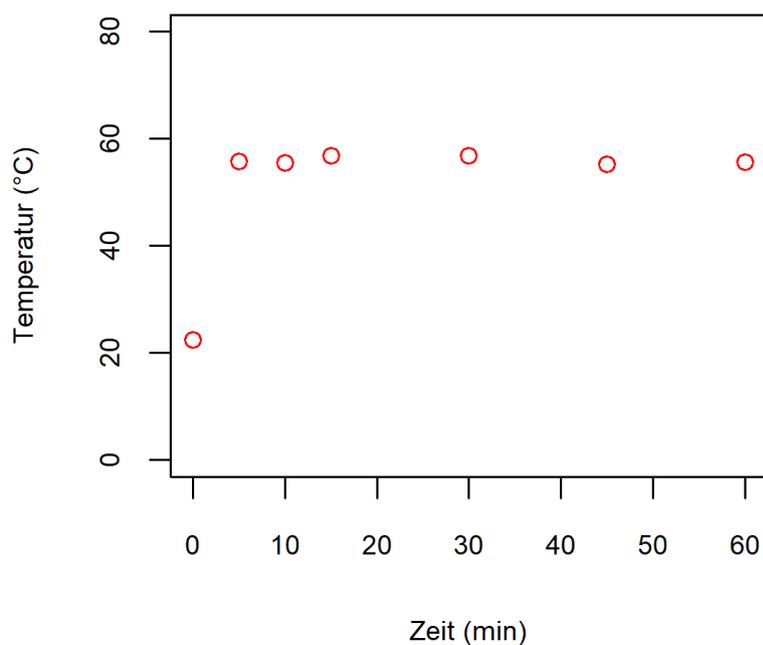


Abbildung 3-11: Temperaturverlauf über eine Stunde bei Einsatz von 8 % Branntkalk in Putenmist

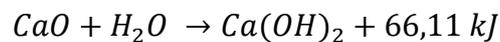
Im dargestellten Versuch wurde Putenmist mit einem TR von 44,9 % und 8 % Branntkalk behandelt. Die Zugabe des gesamten Branntkalks erfolgte zu Beginn und auf Basis der Versuchsreihen aus dem vorherigen Projekt. In der so durchgeführten Versuchsreihe konnten keine 70 °C erreicht werden. Die erreichten 60 °C konnten jedoch über einen Zeitraum von einer Stunde gehalten werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Sondergenehmigung für den Betrieb der Anlage zu diesem

Zeitpunkt des Projektes erlosch, konnten keine Optimierungsversuche zur Hygienisierung an der Praxisanlage durchgeführt werden. Daher wird im nachfolgenden Abschnitt die Branntkalkmenge zur Hygienisierung theoretisch ermittelt.

### **Berechnungen der Branntkalkmenge zur Hygienisierung**

Ein weiterer Schritt zur automatisierten Betriebsweise, wäre die Steuerung über ein Berechnungstool. Um dies zu realisieren wurde eine Berechnungsmethode nach Schirm et. al. genutzt (Schirm et al., 2003). Die Berechnung basiert auf der freigesetzten Energie, die bei der Reaktion von Wasser und Branntkalk entsteht.

Reaktion von Branntkalk mit Wasser:



Die Temperaturerhöhung durch Zugabe von Branntkalk lässt sich in Abhängigkeit von der Trockensubstanz des Ausgangssubstrates berechnen. Dies geschieht ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste (Schirm et al., 2003).

$$\Delta T = \frac{1150 \cdot \%CaO}{4,16(100\% - \%TS) + 0,25 \cdot \%TS + 0,3 \cdot \%CaO}$$

Bei dem in Abbildung 3-11 gezeigten Versuch ergeben sich bei einer Trockensubstanz von 44,9 % und einem Branntkalkeintrag von 8 % eine rechnerische Temperaturerhöhung von 39,9 °C. Bei der gemessenen Ausgangstemperatur von 20,4 °C ergibt sich daraufhin eine Temperaturerhöhung auf 60,3 °C. Die in der Anlage gemessene Temperatur lag bei 55,8 °C. Die Differenz lässt sich durch den nicht betrachteten Wärmeverlust oder Abweichungen bei der Temperaturmessung erklären. Um bei demselben Ausgangssubstrat mit einer Temperatur von 20,4 °C und einem ähnlichen Wärmeverlust nach Branntkalkzugabe 70 °C zu erreichen wird ein Branntkalkanteil von 11,3 % benötigt.

Die hier dargestellte Formel ermöglicht die Berechnung der benötigten Branntkalkmenge um einen Temperaturverlauf über 70 °C für eine Stunde ohne zusätzliche Heizquelle zu ermöglichen. Die Berechnung muss vor jeder Hygienisierung auf den jeweils vorliegenden Trockenrückstand angepasst werden.

### Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Hygienisierung

Darüber hinaus wird die Hygienisierung unter wirtschaftlichen Aspekten betrachtet. Durch die Erhöhung der Behandlungszeit auf ein Sechsfaches (von 10 auf 60 Minuten), erhöhen sich dementsprechend auch die Kosten der Behandlung. Die Kosten werden in Abbildung 3-12 dargestellt.

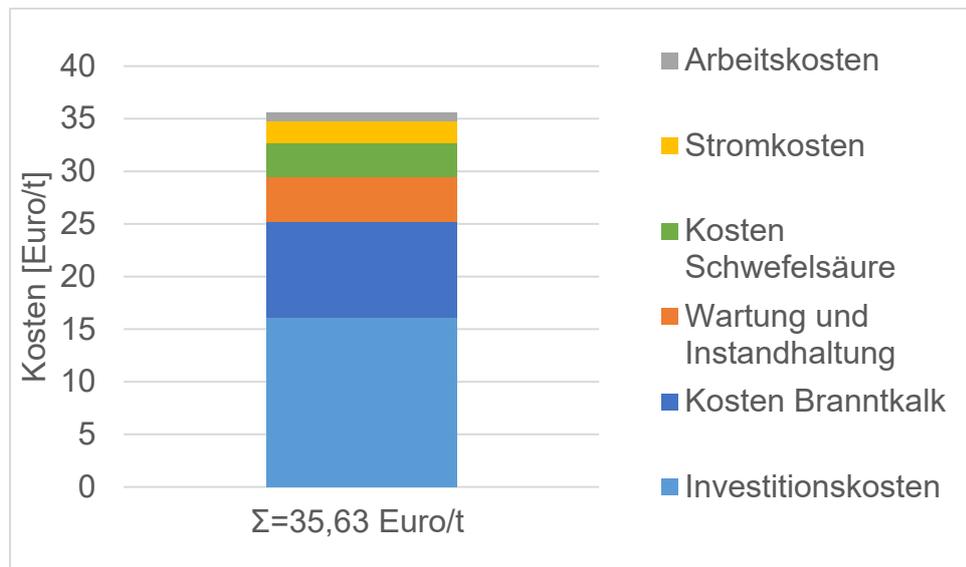


Abbildung 3-12: Behandlungskosten der Hygienisierung

Durch die Hygienisierung vervierfachen sich die Investitionskosten. Alle weiteren Kostenpunkte verdoppeln sich, so dass sich insgesamt Kosten von 35,63 €/t ergeben. Da neben den Kosten der Behandlung zusätzlich noch Kosten für zum Beispiel Lagerung oder Transport anfallen können, macht die Hygienisierung in diesem Zusammenhang (z.B. eigene Verwertung der Gärreste, kein Export vorgesehen) aus ökonomischer Sicht kein Sinn.

## STOFFSTROMBILANZ

Zur Ermittlung der Substratmengen, der Produkte und der benötigten Hilfsstoffe wurde eine Gesamt-Stoffstrombilanz erstellt (siehe Abbildung 3-12). Alle dargestellten Stoffströme beziehen sich auf eine Charge im Umwandler mit 500 kg Substratmix. Der Substratmix setzt sich aus Putenmist, Hähnchenmist und Hühner trockenkot zu gleichen Teilen zusammen. Die Anlage wurde mit optimalen Einstellungen betrieben (7 Minuten Behandlungszeit, 5 % Branntkalk ohne Hygienisierung).

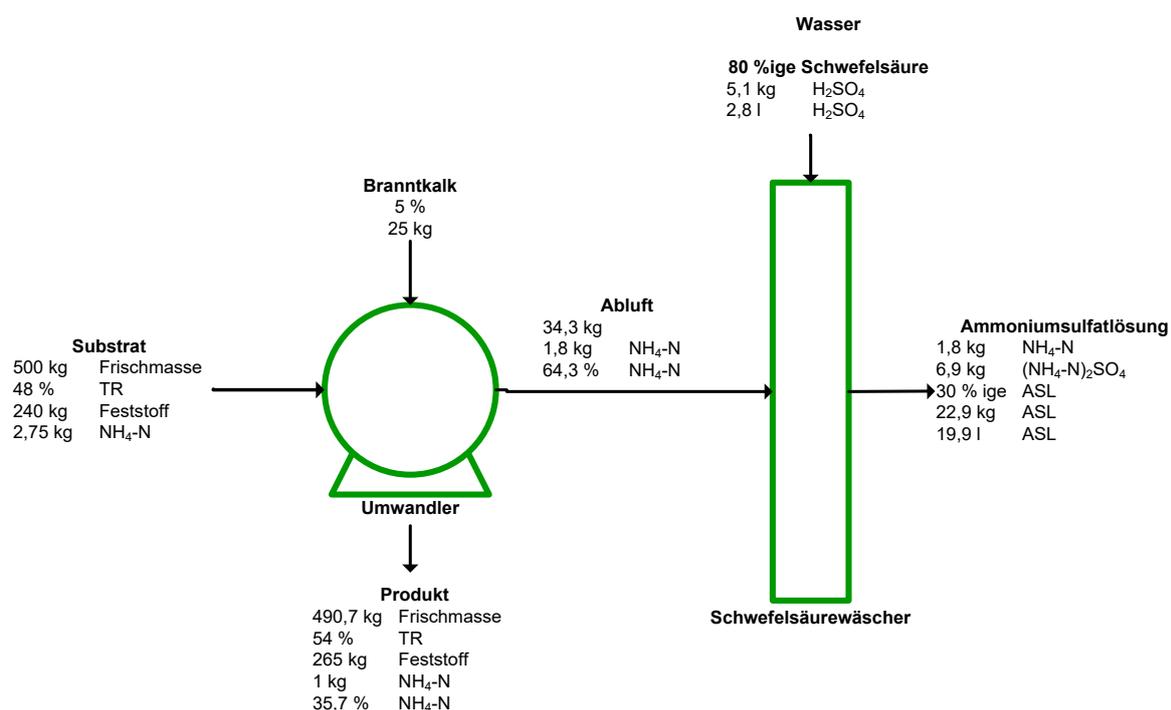


Abbildung 3-13: Stoffstrombilanz für die optimalen Einstellungen (5 % Branntkalk und 7 Minuten Behandlungszeit)

Der Anlage wurden 500 kg Substratmix mit 5 % Branntkalkanteil (10 kg) zugeführt. Im Laufe der 7 Minuten Behandlungszeit wurden dabei 1,8 kg Ammoniak freigesetzt (ca. 70 % des enthaltenen Ammonium-Stickstoffs). Im Wäscher wurde der Ammoniak mit einer Waschlösung aus Schwefelsäure und Wasser gebunden. Als Produkte verlassen 490,7 kg ammoniumentfrachteter Mist und 22,9 kg 30 %ige Ammoniumsulfatlösung die Anlage. Zur Behandlung werden 2,55 kWh<sub>el</sub>/Charge benötigt.

### 3.3 EINFLUSS AUF DEN BIOGASERTRAG

Die in diesem Kapitel dargestellten Versuchsdaten stellen mögliche Auswirkungen des Einsatzes von behandeltem Mist auf den Biogasprozess dar, da es aufgrund einer erhöhten Ammoniakkonzentration zur Hemmung des Biogasprozess kommen kann. Zunächst wurde durch Batch-Tests ermittelt, ob der Einsatz von dem behandelten Mist zu einem niedrigeren Biogasertrag führt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde dann, an der am Standort gelegenen Biogasanlage, ein Praxischeck durchgeführt und der behandelte Mist mit erhöhtem Anteil eingesetzt.

#### 3.3.1 BATCH-TESTS ZUR BIOGASPOTENZIALBESTIMMUNG

Die anaeroben Gärversuche wurden im 1 l-Maßstab mit Eudiometerversuchen durchgeführt. Dieser Aufbau entspricht den Vorgaben der Richtlinie VDI 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ (VDI, 2016). Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 40 °C über eine Versuchsdauer von 60 Tagen durchgeführt. Dabei entstandenes Gas wurde täglich qualitativ und quantitativ analysiert. Die homogenisierten Proben wurden jeweils im 3-fach Ansatz untersucht und zur Qualitätssicherung eine Cellulose sowie eine Inokulum-Probe als Referenzmaterial angesetzt (siehe Abbildung 3-13).



Abbildung 3-14: Aufbau der Eudiometerversuche

Neben der Bewertung des Methan- und Biogasertrags sind mit Hilfe der angewandten Richtlinie Aussagen zur biologischen Abbaubarkeit, zur anaeroben Abbaugeschwindigkeit (qualitativ) sowie zu Hemmungen der Prozessbiologie möglich. Der experimentelle Aufbau ermöglicht keine Aussagen zur Prozessstabilität in kontinuierlichen Systemen und zu Biogasausbeuten unter Praxisbedingungen.

Für die Batch-Tests wurden drei verschiedene Behandlungszeiten und drei verschiedene Branntkalkanteile eingestellt, um möglichst variierende Ammoniumentfrachtungen zu erhalten. Durch die Versuchsreihen soll nachgewiesen werden, dass es trotz unterschiedlicher Behandlungsqualität zu gleichbleibenden Gaserträgen kommt. Die Einstellungen der Proben an der Anlage zur Behandlung und die daraus resultierten Ammoniumentfrachtungen sind in Tabelle 3-8 aufgelistet. Mit diesen Proben wurden dann anschließend Batch-Tests im Dreifachansatz durchgeführt. Die Versuchsreihe wurde zu Beginn des Projektes durchgeführt, sodass es sich noch nicht um die Anlage im optimierten Betrieb handelt.

Tabelle 3-8: Einstellungen an der Versuchsanlage und Ammoniumentfrachtung

Probenbezeichnung	Behandlungszeit (min)	Branntkalkanteil (%)	Abscheidung NH <sub>4</sub> -N (%)
6-1	5	1,5	5,2
6-2	5	4,5	46,2
6-3	5	6,5	43
6-4	10	1,5	24,6
6-5	10	4,5	38,9
6-6	10	6,5	46,3
6-7	15	1,5	13,0
6-8	15	4,5	42,9
6-9	15	6,5	48,7

Nach 60 Tagen Versuchsdauer (Laufzeit der Batch-Tests) ergaben sich die in Tabelle 3-9 dargestellten oTR-spezifischen Methanerträge.

Tabelle 3-9: Versuchsergebnisse der Biogaspotenzialbestimmungen

Probe	TR (%)	Ø oTR (%)	Ø FM-spez. Methanertrag (m <sup>3</sup> N/t <sub>FM</sub> )	Ø oTR-spez. Methanertrag (m <sup>3</sup> N/t <sub>oTR</sub> )
6-1	50,8	79,1	121	300
6-2	55,7	70,0	126	323
6-3	55,5	62,7	117	335
6-4	51,9	77,5	121	302
6-5	55,4	69,2	118	308
6-6	56,9	65,1	126	341
6-7	51,0	78,4	124	310
6-8	55,5	70,8	121	308
6-9	57,9	62,5	109	301
Durchschnittswerte	54,5	70,6	120	314

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Trockenrückstand; FM: Frischmasse

Im Rahmen dieses Batch-Versuches konnten gleichbleibende Methanerträge nachgewiesen werden.

Zur Einschätzung dieser Werte sind in Tabelle 3-10 Werte zum Vergleich die Methanerträge von Silomais und Putenmist aufgeführt (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2013). Demnach kann zum Beispiel Silomais mit dem behandelten Substrat eins zu eins ersetzt werden.

Tabelle 3-10: Spezifische Biogas- und Methanerträge

Probe	TR (%)	davon oTR (%)	FM-spez. Methanertrag (m <sup>3</sup> N/t <sub>FM</sub> )	oTR-spez. Methanertrag (m <sup>3</sup> N/t <sub>oTR</sub> )
Silomais	35	95	112	340
Putenmist	45	84	125	330

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Trockenrückstand; FM: Frischmasse

**Ergebnis:** Durch die Batch-Tests konnten keine signifikanten Einbußen des Methanertrags oder Hemmungen der Vergärung festgestellt werden. Aufgrund der ermittelten Methanerträge des behandelten Mists (rd. 120 m<sup>3</sup>/t<sub>FM</sub>), entspricht er den Erträgen von Silomais und kann ihn 1:1 ersetzen.

### 3.3.2 PRAXISCHECK AN EINER BIOGASANLAGE

Um zu ermitteln, ob der behandelte Mist als Silomaissubstitut in der Praxis vergleichbare Ergebnisse erzielt, wurden in der nächsten Versuchsreihe entsprechende Mengen des behandelten Mists in einer Biogasanlage eingesetzt.

Am Standort der Versuchsanlage aus diesem Projekt, befindet sich eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub>. Die Biogasanlage Vorort erfüllt die Voraussetzungen und hat das Ziel den Anteil des bislang eingesetzten Silomais, ohne Einbuße des Gasertrags, zu reduzieren. Durch den Standort der Behandlungsanlage konnte während der Versuchsreihen eine ausreichende Menge des Geflügelmistes gewährleistet werden. Darüber hinaus konnten auch verschiedene Mistarten getestet werden.

Die Biogasanlage besteht aus einem Fermenter ( $V=2.300 \text{ m}^3$ ) und einem Nachgärer ( $V=2.200 \text{ m}^3$ ). Nach der Vergärung erfolgt eine Separation der Gärreste. Die feste Phase gelangt danach in das Gärrestlager und kann von dort aus bei Bedarf erneut in die Biogasanlage gefördert werden. Die flüssige Phase wird zur Düngung auf dem Feld verwendet. Zusätzlich sind an der Anlage zwei Vorgruben errichtet. In Vorgrube 1 werden die Substrate wie Gülle, Mist und Silomais vermischt und anschließend in Vorgrube 2 geführt. Aus Vorgrube 2 erfolgt die Zudosierung der Biogasanlage. Die Gesamtanlage ist in Abbildung 3-14 schematisch dargestellt.

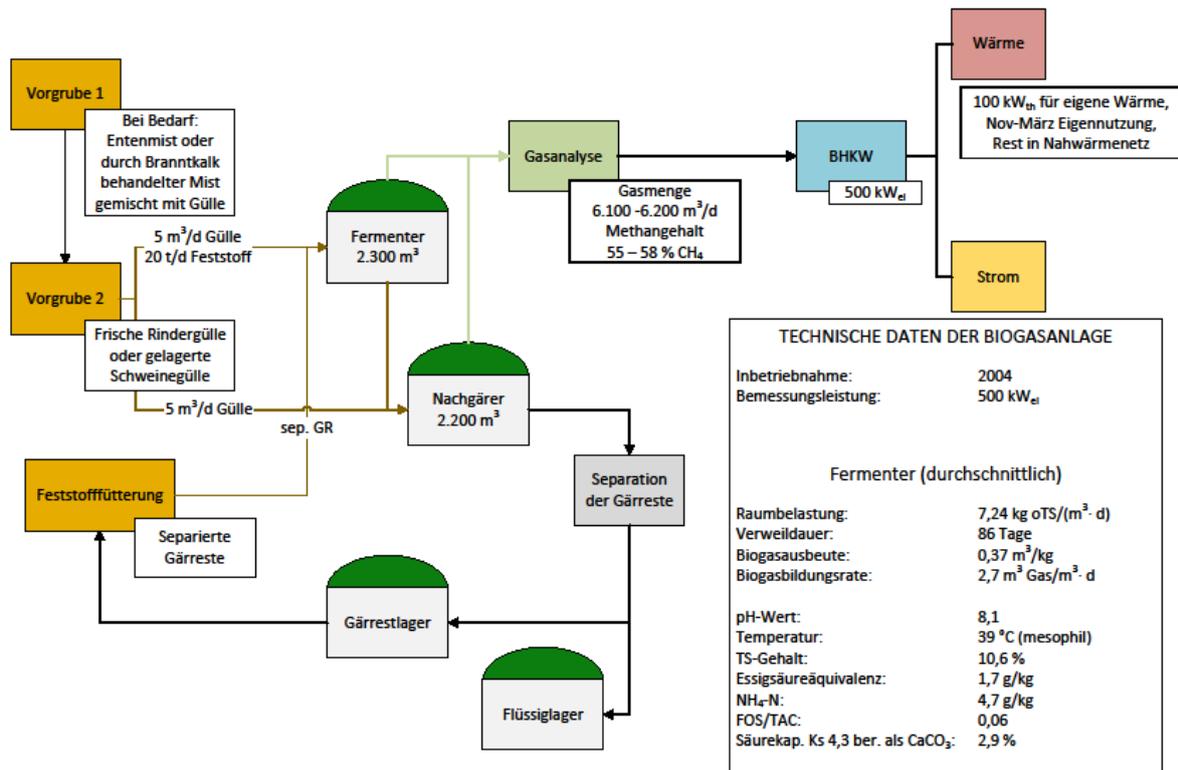


Abbildung 3-15: Fahrweise der Biogasanlage während der 11-monatigen Begleitung

Da die Biogasanlage bereits vor Projektbeginn mit Geflügelmist beschickt wurde und die Fermenterwerte einen erhöhten Gehalt an Ammonium-Stickstoff aufwiesen, konnte von einer gewissen Adaption der Mikroorganismen an einen erhöhten Ammoniumgehalt ausgegangen werden. Laut Angaben des Biogasanlagenbetreibers wurden ca. 200 kg des unbehandelten Mistes pro Tag gefüttert. Dies entspricht ca. 10 % des insgesamt gefütterten Feststoffs. Zusätzlich wurden an der Anlage 5 m<sup>3</sup>/d Gülle hinzugegeben. Um Schwankungen im Biogasprozess durch eine Erhöhung der Dosiermenge des behandelten Mistes festzustellen, wurden die Anteile des eingesetzten Mistes langsam erhöht, sodass nach 3 Monaten Mist und Mais etwa im Verhältnis 1:1 zudosiert wurden. Dies entspricht einer Menge von 10 t/d Mais und 10 t/d behandeltem Mist. In Tabelle 3-11 wird der Mistanteil und der Gasertrag vor und nach dem Einsatz des behandelten Mistes dargestellt.

Tabelle 3-11: Mistanteil und Gasertrag vor und nach den Versuchsreihen des PraxiscHECKS

Zeitpunkt	Fütterung Mistanteil [%]	Gasertrag [m <sup>3</sup> ]	Methangehalt [%]
vorher	0	6.100	55 - 58
nach 11 Monaten	50	6.100 – 6.200	55 - 58

Während der gesamten Versuchsreihe konnte eine kontinuierliche Gasproduktionsrate mit gleichbleibenden Gasqualitäten erreicht werden. Der Methangehalt war dabei stets in einem Bereich zwischen 55 – 58 %, ebenso blieb der Gasertrag konstant.

### **Berechnung der Verweildauer, Raumbelastung und Biogasausbeute**

Nach Beendigung der Versuchsreihe wurden für den Zeitraum (11 Monate) die durchschnittlichen Werte für Verweildauer, Raumbelastung und Biogasausbeute berechnet. Die Parameter sollen Auskunft über die Stabilität des Prozesses geben.

*Mittlere hydraulische Verweildauer:*

$$t_m = \frac{V_R \cdot \rho_O}{m_O} = \frac{2.300 \text{ m}^3}{26,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 86 \text{ Tage}$$

$t_m$  = mittlere hydraulische Verweildauer (Tage)

$V_R$  = Fermentervolumen ( $\text{m}^3$ )

$\rho_O$  = Zulaufdichte ( $\text{t}/\text{m}^3$ )

$m_O$  = Zulaufmasse ( $\text{t}/\text{d}$ )

*Raumbelastung:*

$$B_R = \frac{m_O \cdot c_O}{V_R} = \frac{25.000 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 0,8 \% \text{ oTR}}{2.300 \text{ m}^3} = 8,7 \frac{\text{kg oTR}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

$B_R$  = Raumbelastung ( $\text{kg oTR}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )

$m_O$  = Zulaufmasse ( $\text{kg}/\text{d}$ )

$c_O$  = Zulaufkonzentration ( $\% \text{ oTR}$ )

$V_R$  = Fermentervolumen ( $\text{m}^3$ )

Die mittlere hydraulische Verweilzeit gibt an wie lange sich das Substrat durchschnittlich im Fermenter befindet. Die Raumbelastung gibt an wieviel Kilogramm oTR dem Fermenter pro Kubikmeter und Tag zugeführt wird. Beide Parameter sind abhängig voneinander. Bei Erhöhung der Raumbelastung, sinkt die Verweilzeit

(Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013). Die Parameter werden in dieser Arbeit dargestellt um einen späteren Vergleich mit anderen Biogasanlagen zu ermöglichen. Die FNR gibt für die mittlere hydraulische Verweilzeit Faustzahlen von 22-58 Tage (einstufig) und 37-210 Tage (mehrstufig) an. Dabei liegt die Faulraumbelastung zwischen 1,1 – 9,3 oTR/m<sup>3</sup>d (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2021).

*Biogasausbeute:*

$$y = \frac{Q_B}{m_o \times c_o} = \frac{6.150 \text{ m}^3}{25.000 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 0,8 \% \text{ oTR}} = 0,31 \frac{\text{m}^3}{\text{kg oTR}} = 280 \frac{\text{NI}}{\text{kg oTR}}$$

$y = \text{Biogasausbeute (m}^3/\text{kg OTR)}$

$Q_B = \text{Biogasmenge (m}^3/\text{d)}$

$m_o = \text{Zulaufmasse (t/d)}$

$c_o = \text{Zulaufkonzentration (kg OTR/t)}$

Die Biogasausbeute beschreibt die Biogasmenge pro Kilogramm oTR. Der Wert ist substratabhängig. Für Grassilage beträgt sie 517,1 l/kg oTR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013). Für Maissilage beträgt sie 586,1 NI/kg oTR, für Schweinegülle 400 NI/kg oTR und für Hühner- oder Geflügelkot wird ein Wert von 500 NI/kg oTR angenommen (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021). Im Vergleich ist die ermittelte Biogasausbeute des Substrates in der Biogasanlage etwa 56 % geringer als der Literaturwert für Hühner- und Geflügelkot.

Bei einer durchschnittlichen Verweilzeit von 86 Tagen und einer Raumbelastung von 8,7 kg oTR/m<sup>3</sup>d betrug die Biogasausbeute 280 NI/kg oTR.

Während der gesamten Testphase wurden verschiedene Fermenterwerte untersucht. Diese waren pH-Wert, Trockenrückstand, Essigsäureäquivalenz, Ammonium-Stickstoff, Pufferkapazität als  $\text{CaCO}_3$  und FOS/TAC. In der Abbildung 3-15 sind diese Durchschnittswerte über den Testzeitraum von 11 Monaten abgebildet.

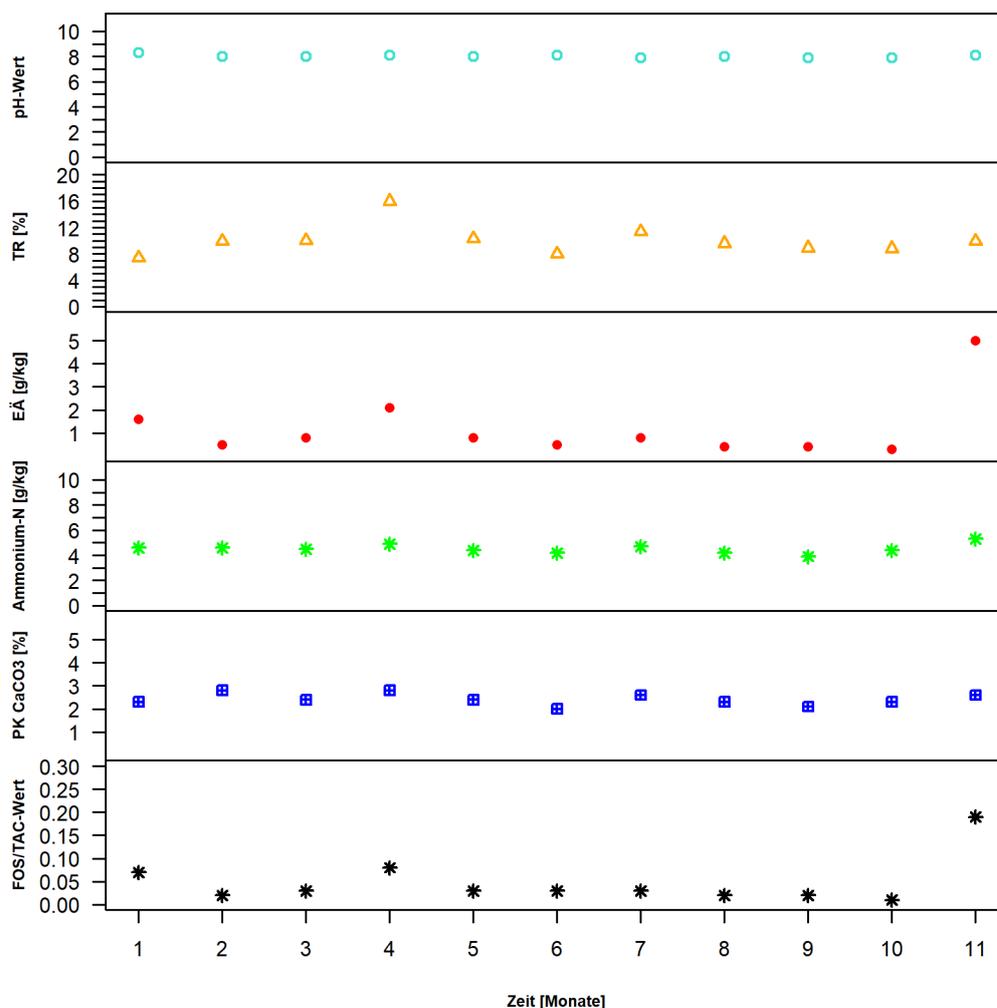


Abbildung 3-16: Fermenterwerte der Biogasanlage bei Fütterung mit Mais und behandeltem Mist über 11 Monate (TR =Trockenrückstand; EÄ = Essigsäureäquivalenz; PK = Pufferkapazität)

Die Fermenterwerte wurden auf Basis der in Tabelle 3-12 dargestellten Werte analysiert und beobachtet. Hohe Stickstoffgehalte können den biologischen Prozess hemmen und sogar zum Erliegen bringen, daher können in der Regel keine großen Mengen an Geflügelmist vergoren werden.

Tabelle 3-12: Erfahrungswerte der Fermenterwerte zur Überwachung des Biogasprozesses durch den Biogasanlagenbauer

Parameter	Einheit	Richtwerte	Ergebnisse der Schwankungsbreite der BGA
pH-Wert		7,2 < Opt.< 8,2	7,9 – 8,3
Trockensubstanz	%	4 < Opt.< 8	7,4 - 16
Essigsäureäquivalenz	g/l	Opt.: 0,5 ± 0,2	0,3 - 5
NH <sub>4</sub> -N	g/l	Max.: 4 ± 1	3,9 – 5,3
Säurekapazität als CaCO <sub>3</sub>	%	Min.: 1	2 – 2,8
FOS/TAC-Wert		< 0,4	0,01 – 0,19

Eine Literaturrecherche zum Thema Vergärung von Hähnchenmist ergab, dass die Hemmkonzentration unterschiedlich sein kann. Bei vorheriger, langsamer Gewöhnung der Bakterien bzw. Archaeen an eine höhere Stickstoffkonzentration zeigten Untersuchungen, dass bei einem pH-Wert von 8 und einem Ammonium-Stickstoffgehalt von 5 g/l eine Vergärung möglich ist (Yenigün and Demirel, 2013). Außerdem konnte in der Untersuchung bei einer Ammonium-Stickstoffkonzentration von 6,7 g/l eine vollständige Hemmung des Prozesses beobachtet werden. Die Biogasanlage am Versuchsstandort wird bereits seit mehreren Jahren mit einem höheren Ammonium-Stickstoffgehalt (5 g/kg) betrieben. Zum Vergleich sind in Tabelle 3-13 Literaturwerte dargestellt.

Tabelle 3-13: Literaturreichtwerte zur Überwachung des Biogasprozesses durch den Biogasanlagenbetreiber

Parameter	Einheit	Richtwerte <sup>a</sup>	Richtwerte <sup>b</sup>
pH-Wert		6,5 - 9	7 < Opt.< 7,5
Trockensubstanz	%	8 - 10	-
Essigsäureäquivalenz	g/l	-	-
NH <sub>4</sub> -N	g/l	abh. von pH und Temp.	< 3
Säurekapazität als CaCO <sub>3</sub>	%	-	-
FOS/TAC-Wert		Verlauf	< 0,8

<sup>a</sup>: (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2010)

<sup>b</sup>: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013)

Während der Vergärung und dem Zeitraum in dem der Mistanteil kontinuierlich erhöht wurde, erhöhte sich der Ammonium-Stickstoffgehalt nicht und blieb konstant.

Während der Versuchsreihen waren pH-Wert und TR erhöht, es zeigten sich allerdings keine negativen Auswirkungen auf den Biogasprozess. Der pH-Wert lag innerhalb des empfohlenen Bereichs der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2010). Der TR lag während der Versuchsreihen hauptsächlich in einem Bereich zwischen 8 und 10 mit gelegentlich höheren Abweichungen, was den Empfehlungen der Literatur entspricht.

Die Werte für FOS/TAC blieben während der Versuchsreihen konstant. Die in der Abbildung 3-15 dargestellten Abweichungen im Monat 11 in den Parametern Essigsäureäquivalenz und FOS/TAC haben nichts mit dem Einsatz des behandelten Mists in der Anlage zu tun, sondern lassen sich auf eine unregelmäßige Beschickung der Biogasanlage in diesem Zeitraum zurückführen.

### **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Substrateinsatzes**

Für den Kostenvergleich der eingesetzten Substrate vor und nach dem Praxischeck wird für den behandelten Mist ein Preis von 12,98 €/t angenommen. Die Preiszusammensetzung wird im folgenden Kapitel 3.6 dargestellt. Für den Silomais wird ein Preis von 28 €/t (Stand: 21.08.2020) angenommen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2020). In Tabelle 3-14 werden die Kosten im Vergleich dargestellt.

Tabelle 3-14: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Substrateinsatzes

Zeitpunkt	Silomais [t/d]	Behandelter Mist [t/d]	Substratkosten [€/d]	Substratkosten [€/a]
vorher	20	-	560	204.400
nachher	10	10	410	149.650
Differenz (Einsparung)			96	54.750

**Ergebnis:** Der Praxischeck an der Biogasanlage bestätigt die Ergebnisse aus den Batch-Tests. Die Ergebnisse führen zu der Erkenntnis, dass der behandelte Mist als Silomaissubstitut (bis zu 50 %) in Biogasanlagen genutzt werden kann. Zur Bestätigung dieser Ergebnisse sollten allerdings weitere Versuchsreihen an verschiedenen Biogasanlagen durchgeführt werden. Bei der betrachteten BGA führt der Einsatz des Geflügelmists zu Kosteneinsparungen von über 50.000 €/a.

## 3.4 ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Wirtschaftlichkeit der Anlage betrachtet. In Tabelle 3-15 werden dazu die Kosten für die Behandlung einer Substratzusammensetzung aus Putenmist, Hähnchenmist und Hühnertrockenkot in gleichen Teilen mit 5 % Branntkalk und 7 Minuten Behandlungszeit berechnet. Die gewählten Einstellungen basieren auf den Ergebnissen der vorherigen Versuchsreihen.

Tabelle 3-15: Darstellung der Kosten für eine 7-minütige Behandlung mit 5,6 % Branntkalk zur Entfernung von 70 % Ammonium

Beschreibung		Zwei Umwandler	
Investitionskosten	€	650.000	
Abschreibung (6 Jahre)	€/a	108.333	
Zinsen (2 %/a)	€/a	2.167	
Anzahl Umwandler	Stück	2	
Behandlungszeit	min	7	
Zeit zum Befüllen und Leeren	min	10	
Betriebsstunden	h/d	24	
	h/a	8.000	
Substratmenge	kg/Charge	500	
	t/d	77	
	t/a	28.235	
<b>Summe Fixkosten</b>	<b>€/a</b>	<b>110.500</b>	
<b>Spezif. Fixkosten pro t Substrat</b>	<b>€/t</b>		<b>3,91</b>
<b>Wartung und Instandhaltung (1 % Afa/a)</b>	<b>€/a</b>	<b>1.083</b>	
Arbeitszeit	h/d	2	2,17
<b>Arbeitskosten (15 €/h)</b>	<b>€/t</b>		<b>0,39</b>
Stromverbrauch	kWh <sub>el</sub> /t	5,1	
<b>Stromkosten</b>	<b>€/kWh<sub>el</sub></b>	<b>0,2</b>	
<b>Spezif. Stromkosten pro t Substrat</b>	<b>€/t</b>		<b>1,02</b>
Verbrauch Branntkalk	t CaO/t	0,05	
<b>Kosten Branntkalk</b>	<b>€/t CaO</b>	<b>80</b>	
<b>Spezif. Branntkalkkosten pro t Substrat</b>	<b>€/t</b>		<b>4</b>
Verbrauch Schwefelsäure	kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t	5,16	
<b>Kosten Schwefelsäure</b>	<b>€/t H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>290</b>	
<b>Spezif. Säurekosten pro t Substrat</b>	<b>€/t</b>		<b>1,50</b>
<b>Gesamtkosten</b>	<b>€/t</b>		<b>12,98</b>
	<b>€/a</b>	<b>366.619</b>	
Produzierte ASL	kg <sub>ASL</sub> /t	22,9	
Erlös ASL (Stand: 08.02.2018)	€/t <sub>ASL</sub>	25	
	€/t		-0,57
<b>Gesamtkosten abzgl. Erlös</b>	<b>€/t</b>		<b>12,41</b>
	<b>€/a</b>	<b>350.454</b>	

Die Kosten für die Behandlung mit Branntkalk ohne Erlöse für die Ammoniumsulfatlösung betragen unter diesen Annahmen 12,98 €/t. Vergleiche mit dem Vorgängerprojekt zeigen, dass eine Senkung der Kosten um mehr als 2 €/t durch die technischen Veränderungen und optimalen Einstellungen der Versuchsparameter erreicht wurde. Der Verkauf der ASL führt zu einer weiteren Reduzierung der Behandlungskosten. Erlöse durch den Verkauf der ASL werden im Projekt nicht weiter betrachtet, da es keinen allgemein gültigen Marktpreis gibt und sich deshalb keine Aussagen über den Verkauf treffen lassen.

## 4 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Das Projekt und die entwickelte Anlage wurden bei den nachfolgenden Veranstaltungen und Medien präsentiert:

- Präsentation des Projektes im Rahmen des Messestandes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) auf der IFAT 2018, der Weltleitmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft vom 14. bis 18. Mai 2018 in München
- Vortrag „poultry profit – Stickstoffentfrachtung und Hygienisierung von Geflügelmist“ auf dem Biogas Innovationskongress am 30. Mai 2018 in Osnabrück
- Vortrag „Stickstoffentfrachtung und Hygienisierung von Wirtschaftsdünger mit Hilfe von Branntkalk“ auf der Internationalen Konferenz zum Thema „Fortschritt Gülle und Gärrest“ am 16. Oktober 2018 in Schwäbisch Hall
- „Dem Mist den Stickstoff austreiben“, Profi Magazin 3/2019 S. 94-96
- „Traum oder Wirklichkeit?“, DGS-Magazin 4/2019 S. 46/47

## 5 FAZIT

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Optimierung einer vollautomatischen Versuchsanlage im großtechnischen Maßstab
2. Optimale Einstellungen für Branntkalk und Behandlungszeit wurden für eine maximale Ammoniumentfrachtung (bis zu 70 %) ermittelt
3. Bei Zugabe von 11,3 % Branntkalk erfolgt eine Erhöhung der Temperatur über 70 °C für 60 Minuten ohne Einsatz einer externen Heizquelle
4. Schwefelsäurewäscher erreicht einen Ammoniakeliminationsgrad aus der Abluft von über 99 %
5. Produktion einer 30 %igen Ammoniumsulfatlösung
6. Optimierung des Stromverbrauchs auf ca. 5,1 kWhel/t bei einem Durchsatz von 3,2 t/h
7. Die Behandlungszeit hat einen höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit als die Branntkalkmenge
8. Die Kosten für die Behandlung der untersuchten Substrate liegt zwischen 11,7 €/t und 13,0 €/t
9. Durch den Einsatz von Mist in der BGA können jährlich 54.750 € eingespart werden
10. Der Biogasertrag von dem behandelten Mist entspricht in etwa dem vom Silomais
11. Der behandelte Mist kann (in einer adaptierten Biogasanlage) bis zu 50 % der täglichen Substratzugabe betragen ohne Einbußen bei Gasertrag und Methangehalt
12. Durch den Einsatz von behandeltem Mist können CO<sub>2</sub>-Emissionen von rd. 214 t/a an der Biogasanlage eingespart werden

Da in dem Prozess konzentrierte Schwefelsäure verwendet wird, wurde besonderer Wert auf die Sicherheit gelegt. Die Anlage ist so konstruiert, dass auch bei Leckagen keine gefährlichen Stoffe austreten können. Ebenfalls befindet sich auch die gesamte Förderung und Lagerung von Branntkalk in einem geschlossenen System, um hier mögliche Gefahren auszuschließen. Das behandelte Material wird am Ende des Prozesses vom Umwandler in einen Produktbehälter gefördert. Dieser ist

geschlossen und mit einem Absaugsystem inklusive eines Schwefelsäurewäschers versehen. Diese geschlossene Fahrweise der gesamten Anlage verfolgt das Ziel keine Emissionen an die Umwelt abzugeben.

Das Ziel des Projektes, die Anlagentechnik zu optimieren, mit der marktfähige Düngemittel aus schlammartigen Biomassen produziert werden können, wurde erreicht. Die Effizienz bei der Ammoniakentfernung bzw. Hygienisierung von verschiedenen Stoffen konnte gesteigert werden und die wirtschaftlichen Risiken wurden weiter gesenkt. Die Stickstoffreduzierung bietet den Vorteil das ein verstärkter Einsatz in Biogasanlage möglich ist, der Mist als Ersatz für Silomais dienen kann und dass es zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Reststoffnutzung kommt. Zur Darstellung dieser CO<sub>2</sub>-Einsparungen werden Daten aus dem Berechnungstool der EnergieAgentur.NRW (GEMIS 4.9.4) verwendet. In diesem wird ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0,067 kg/kWh<sub>el</sub>, bei einem Biogas-Gülle BHKW und 0,194 kg/kWh<sub>el</sub>, bei einem Biogas-Mais BHKW angegeben (EnergieAgentur.NRW, 2015). Bezogen auf die Biogasanlage Vorort ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0,169 kg/kWh<sub>el</sub> vor den Versuchsreihen und 0,118 kg/kWh<sub>el</sub> nach den Versuchsreihen und nach dem dadurch verstärkten Einsatz von behandeltem Mist. Es konnte somit eine ca. 30 %ige CO<sub>2</sub>-Reduzierung der Anlage realisiert werden. An der Biogasanlage werden so insgesamt 214 t/a eingespart (Tabelle 5-1). Bezogen auf den deutschen Strommix (CO<sub>2</sub>-Äquivalent: 0,606 kg/kWh<sub>el</sub>) entstehen bei einer Produktion von 4,2 Mio. kWh<sub>el</sub>/a ca. 2.540 t CO<sub>2</sub>/a. Dem gegenüber stehen die ca. 500 t CO<sub>2</sub>/a, die aktuell an der betrachteten BGA entstehen und somit nur ein Fünftel der CO<sub>2</sub>-Emission bei gleicher Strommenge betragen.

$$500 \text{ kWh}_{el} \cdot 8400 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 4,2 \text{ Mio.} \frac{\text{kWh}_{el}}{\text{a}}$$

Tabelle 5-1: CO<sub>2</sub>-Emissionen an der Biogasanlage

Zeitpunkt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg/kWh <sub>el</sub> ]	CO <sub>2</sub> -Emission der Anlage [t/a]
vorher	0,169	709,5
nachher	0,118	495,6
Differenz (Einsparung)		214,2

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft** (2013) *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*.
- Bioabfallverordnung** (1998) "Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und gärtnerisch genutzten Böden" ("Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und gärtnerisch genutzten Böden") vom 21. September 1998
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit** (2002) *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft*.
- Europäische Union** (2009) VERORDNUNG (EG) Nr. 1069/2009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1069&from=DE> [Zugang am: 14.03.2021]
- EnergieAgentur.NRW** (2015) Berechnungstool Klimaschutzwettbewerbe NRW.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.** (2013) *Faustzahlen*. <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen> [Zugang am: 14.03.2021]
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.** (2013) *Faustzahlen Biogas*, Darmstadt.
- Kelley, T. R., Pancorbo, O. C., Merka, W. C., Thompson, S. A., Cabrera, M. L. und Barnhart, H. M.** (1994) 'Fate of Selected Bacterial Pathogens and Indicators in Fractionated Poultry Litter During Storage', *The Journal of applied poultry research*, vol. 3, no. 3, pp. 279–288.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL)** (2013) *Faustzahlen Biogas*, Darmstadt.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen** (2020) *Maispreis-Rechner*. <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/360/article/36021.html> [Zugang am: 14.03.2021]
- Lopes, M., Roll, V. F. B., Leite, F. L., Dai Prá, M. A., Xavier, E. G., Heres, T. und Valente, B. S.** (2013) 'Quicklime treatment and stirring of different poultry litter substrates for reducing pathogenic bacteria counts', *Poultry science*, vol. 92, no. 3, pp. 638–644.

- Pospiech, J., Ullrich, M., Göttling, S., Truyen, U. und Speck, S.** (2014) *Möglichkeiten zur Hygienisierung von Wirtschaftsdünger und Gärresten.*
- Schirm, V., Philipp, W., Böhm, R., Wecker, A. und Weber, N.** (2003) *Entwicklung einer sicheren Methode zur Bioabfallhygienisierung mit Kalk.*
- Stringfellow, K., Caldwell, D., Lee, J., Byrd, A., Carey, J., Kessler, K., McReynolds, J., Bell, A., Stipanovic, R. und Farnell, M.** (2010) 'Pasteurization of chicken litter with steam and quicklime to reduce Salmonella Typhimurium', *The Journal of applied poultry research*, vol. 19, no. 4, pp. 380–386.
- Umweltbundesamt** (2018) *Umwelt und Landwirtschaft 2018.*  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umwelt-landwirtschaft-2018>  
[Zugang am 14.03.2021]
- VDI** (2016): *VDI-Richtlinie 4630. Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*
- Wetter, C., Brüggling, E. und Baumkötter, D.** (2017) *Entwicklung einer Anlage zur Hygienisierung und Trocknung von schlammartigen Biomassen mit Hilfe von Branntkalk AZ 33083.* [https://www.dbu.de/projekt\\_33083/01\\_db\\_2848.html](https://www.dbu.de/projekt_33083/01_db_2848.html)  
[Zugang am: 14.03.2021]
- Yenigün, O. und Demirel, B.** (2013) 'Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review', *Process Biochemistry*, vol. 48, 5-6, pp. 901–911