



## Abschlussbericht

# Untersuchung zum Emissionsverhalten und Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen



luft





## **Abschlussbericht**

# **Untersuchung zum Emissionsverhalten und Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen**

Projektlaufzeit:  
01.02.2019–30.06.2022  
UmweltProjekt

## Impressum

Untersuchung zum Emissionsverhalten und Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de/](http://www.lfu.bayern.de/)

Angaben zum Auftragnehmer:

LfU, Lukas Stohr, Viktor Kaiser, Gerald Ebertsch

Bildnachweis:

LfU

Stand:

Juni 2022

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

## Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Kurzfassung</b>   | <b>7</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>9</b>  |
| 1.1 Motivation für das Projekt   | 9         |
| 1.2 Entwicklung der Anlagentechnik   | 12        |
| 1.3 Projektziele   | 13        |
| 1.4 Fachlicher Austausch und Mitarbeit bei fachbezogenen Projekten                         | 14        |
| <b>2 Bestandserfassung – Gärresttrochnungsanlagen in Bayern</b>                            | <b>15</b> |
| <b>3 Gärrestaufbereitungsverfahren</b>   | <b>21</b> |
| 3.1 Bandrockner  | 22        |
| 3.2 Schaufelradrockner   | 24        |
| 3.3 Vakuumverdampfer   | 26        |
| 3.3.1 Vakuumverdampfer zur Herstellung von konzentriertem Ammoniakwasser                   | 27        |
| 3.4 BHKW-Abgastrockner (Rotationstrochners)  | 29        |
| 3.5 Rührwerkstrochners   | 31        |
| 3.6 Weitere Verfahren zur Aufbereitung von Gärresten                                       | 32        |
| <b>4 Abgasreinigung bei Gärresttrochnern</b>   | <b>34</b> |
| <b>5 Emissionen von Gärresttrochnungsanlagen</b>   | <b>36</b> |
| 5.1 Emissionen und Emissionsbegrenzungen   | 36        |
| 5.2 Auswertung von Messberichten   | 38        |
| <b>6 Emissionsmessungen an verschiedenen Gärresttrochnern</b>                              | <b>43</b> |
| 6.1 Messumfang   | 43        |
| 6.2 Emissionsmessungen Anlage A (Schaufelradrockner)                                       | 43        |
| 6.3 Emissionsmessungen Anlage B (Bandrockner)  | 55        |
| 6.4 Emissionsmessungen Anlage C (Rotationstrochners)                                       | 65        |
| 6.5 Vergleich der Emissionsmessungen untereinander und mit den ausgewerteten Messberichten | 74        |
| <b>7 Kosten der Gärrestaufbereitung</b>  | <b>77</b> |
| <b>8 Handlungsempfehlungen und Auflagenvorschläge</b>                                      | <b>80</b> |
| <b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>83</b> |
| <b>10 Literaturverzeichnis</b>   | <b>88</b> |
| <b>11 Anhang</b>   | <b>90</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 1:  | Jährlicher Stickstoffüberschuss der Flächenbilanz in den Kreisen Deutschlands in Kilogramm Stickstoff je Hektar Landwirtschaftsfläche (Mittel 2015 bis 2017) nach Umweltbundesamt (2019)                | 9  |
| Abb. 2:  | Gebietskulisse der mit Nitrat belasteten Gebiete (Rote Gebiete nach Ausführungsverordnung Düngeverordnung) nach Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021) | 10 |
| Abb. 3:  | Ammoniakemissionen nach Quellkategorie nach Umweltbundesamt (2022)  | 11 |
| Abb. 4:  | Gesamtübersicht Gärrestaufbereitungsanlagen in Bayern (Bestand und Planung)   | 16 |
| Abb. 5:  | Punktekarte der bayerischen landwirtschaftlichen Biogaserzeugung zum Stichtag 31.12.2021 nach Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2022)  | 17 |
| Abb. 6:  | Gärrestaufbereitungsanlagen in Bayern (in Betrieb)  | 17 |
| Abb. 7:  | Gärrestaufbereitungsanlagen in Bayern (in Planung, Bau oder im Genehmigungsverfahren)   | 18 |
| Abb. 8:  | Zeitlicher Verlauf der Genehmigung von Gärrestaufbereitungsanlagen  | 19 |
| Abb. 9:  | Gärrestaufbereitungsverfahren   | 21 |
| Abb. 10: | Beispielanlage für die Aufbereitung von separiertem Feststoff nach NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH (2018)  | 22 |
| Abb. 11: | Beispielanlage für die Aufbereitung von unsepariertem und flüssigem Gärrest nach <i>NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH</i>  | 23 |
| Abb. 12: | Aufbau einer Kombination aus direkt und indirekt beheizter Trocknung nach <i>NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH</i> . Neben BHKW-Abgas wird auch vorgewärmte Frischluft zum Trocknen zugeführt.         | 23 |
| Abb. 13: | Aufbau eines Schaufelradrockners nach Meiners (2016)  | 24 |
| Abb. 14: | Beispielanlage eines Schaufelradrockners mit zwei Wannen nach <i>Einkammerer</i>  | 25 |
| Abb. 15: | Beispielanlage eines Vakuumverdampfers nach Biogastechnik Süd GmbH (2018)   | 26 |
| Abb. 16: | Beispielhaftes Verfahrensschema eines zweistufigen Vakuumverdampfers nach Biogastechnik Süd GmbH (2021)   | 27 |
| Abb. 17: | AgriFer Plus-Vakuumverdampfer zur Herstellung von konzentriertem Ammoniakwasser nach <i>Buchta</i>  | 28 |
| Abb. 18: | Beispielanlage Rotationstrockner nach <i>jumbo group smart dry GmbH</i>   | 30 |
| Abb. 19: | Schnittbild eines Rührwerkstrockners mit Beschriftung der einzelnen Komponenten nach <i>RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH</i>   | 31 |
| Abb. 20: | Fließbild eines Rührwerkstrockners mit Beschriftung der einzelnen Komponenten nach <i>RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH</i>   | 32 |
| Abb. 21: | Aufbau eines Chemowäschers mit Einzelkomponenten nach Schönhammer Wärmetauscher und Lüftungstechnik GmbH (2018)   | 34 |
| Abb. 22: | Dissoziationsgleichgewicht Ammoniak/Ammonium in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur nach Wetter et al. (2008)   | 36 |
| Abb. 23: | Schaufelradrockner Betrieb A mit Abluftreinigung nach Betreiber Anlage A (2019)   | 44 |
| Abb. 24: | Reingasmessstelle Anlage A nach Betreiber Anlage A (2019)   | 45 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 25: | Rohgasmessstelle Anlage A nach Betreiber Anlage A (2019)  | 45 |
| Abb. 26: | Ammoniakgehalte in Roh- und Reingas und Ammoniakabscheidegrad während der Messung an der Anlage A   | 47 |
| Abb. 27: | Stoffflüsse in Gärresttrocknungsanlage A  | 48 |
| Abb. 28: | Abschlämmvorgänge Anlage A zwischen dem 05.12.2019 und dem 13.12.2019   | 51 |
| Abb. 29: | Loggerdaten Chemowäscher Anlage A der Monate Februar bis April 2020   | 52 |
| Abb. 30: | Störung im Betrieb des Chemowäschers zwischen dem 02.01.2020 und dem 14.01.2020   | 53 |
| Abb. 31: | Kombiniertes Trocknungsverfahren (direkt mit BHKW-Abgas und indirekt über Wärmetauscher) vergleichbar der Anlage B nach <i>NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH</i>               | 56 |
| Abb. 32: | Reingasmessstelle Kamin Anlage B nach Betreiber Anlage B (2020)   | 58 |
| Abb. 33: | Rohgasmessstelle vor Wäscher Anlage B nach Betreiber Anlage B (2020)  | 58 |
| Abb. 34: | Ammoniakgehalte im Rohgas der Anlage B. Die Messungen 1 und 2 erfolgten am hinteren Teil des Trockners (gelb). Die Messungen 3 und 4 wurden im vorderen Teil durchgeführt (rot) | 60 |
| Abb. 35: | Ammoniakgehalte im Reingas der Anlage B. Messwert 3 wurde vom Messinstitut als unplausibel bewertet   | 61 |
| Abb. 36: | Stoffflüsse in Gärresttrocknungsanlage B  | 62 |
| Abb. 37: | Rotationstrockner mit Verwendung der vollständigen BHKW-Abgase nach Betreiber Anlage C (2021)   | 66 |
| Abb. 38: | Reingasmessstelle Anlage C nach Betreiber Anlage C (2021)   | 68 |
| Abb. 39: | Messstelle BHKW-Abgas Anlage C nach Betreiber Anlage C (2021)   | 68 |
| Abb. 40: | Display des Gärresttrockners nach Betreiber Anlage C (2021), ergänzt durch LfU  | 69 |
| Abb. 41: | Bilanzierung des Gärresttrockners C (blau: Bilanzierungsgrenzen)  | 72 |

## Tabellenverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tab. 1:  | Übersicht der in bayerischen Gärrestrocknern zum Einsatz kommenden Abgasreinigungen   | 20 |
| Tab. 2:  | Übersicht relevanter Emissionsgrenzwerte bei Gärrestrocknern gemäß TA Luft 2021. Die Werte beziehen sich auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K; 101,3 kPa)   | 38 |
| Tab. 3:  | Auswertung von 29 Emissionsmessberichten. Angegeben ist die Anzahl der Messberichte mit dokumentierten Grenzwertüberschreitungen. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Messberichte an, in denen der genannte Parameter tatsächlich ermittelt wurde (falls abweichend von Spalte 2).     | 39 |
| Tab. 4:  | Messergebnisse Rohgas Gärrestrocknungsanlage A  | 46 |
| Tab. 5:  | Messergebnisse Reingas Gärrestrocknungsanlage A   | 46 |
| Tab. 6:  | Analyseergebnisse der Gärrestes vor und nach der Trocknung  | 49 |
| Tab. 7:  | Analyseergebnisse des Waschwassers im Chemowäscher der Gärrestrocknung  | 49 |
| Tab. 8:  | Messergebnisse im Rohgas Gärrestrocknungsanlage B. Die Messungen 1 und 2 erfolgten am Verbindungsstück zwischen hinterem Teil des Trockners und Wäscher. Die Messungen 3 und 4 wurden im Verbindungsstück zwischen vorderem Teil des Trockners und Wäscher durchgeführt                         | 59 |
| Tab. 9:  | Messergebnisse im Reingas Gärrestrocknungsanlage B  | 59 |
| Tab. 10: | Messergebnisse BHKW Anlage B  | 60 |
| Tab. 11: | Probenanalyse Gärrestrocknung B   | 63 |
| Tab. 12: | Probenanalyse Waschwasser Gärrestrocknung B   | 64 |
| Tab. 13: | Messergebnisse im Abgas des BHKW-Motors der Anlage C  | 70 |
| Tab. 14: | Messergebnisse im Reingas Gärrestrocknungsanlage C  | 70 |
| Tab. 15: | Makronährstoffgehalte, bezogen auf Trockenmasse, im flüssigen und trockenen Gärrest   | 73 |
| Tab. 16: | Vergleich der relevanten Messergebnisse im Reingas der Anlagen A, B und C (jeweils maximale Emissionen aus der Gärrestrocknung, durchschnittliche Minderungsgrade) mit den Medianen der jeweils maximalen Messwerte der Einzelmessungen der ausgewerteten Emissionsmessberichte aus Kapitel 5.2 | 75 |
| Tab. 17: | Aufschlüsselung von Ausgaben für Gärrestrocknungsanlagen  | 78 |

## Kurzfassung

Die Anzahl von Anlagen zur Trocknung von Wirtschaftsdünger hat in den letzten Jahren in Bayern stetig zugenommen. Der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Bonus des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) und die Novellen der Düngeverordnung (DüV) 2017 und 2020 mit erhöhten Anforderungen an die Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zum Schutz des Grundwassers vor zu hohen Nitratbelastungen führen dazu, dass Betreiber von Biogasanlagen zunehmend Trocknungsanlagen für Gärreste betreiben oder den Betrieb neu beantragen.

Aus Sicht der Luftreinhaltung ist der Blick auf die Emissionen dieser Anlagen zu richten. Besonders von Bedeutung sind Ammoniakemissionen, die beim Trocknungsprozess freigesetzt werden können und vor dem Hintergrund einer ohnehin bereits hohen Ammoniakvorbelastung in der Luft zu vermeiden sind. Stickstoffverbindungen müssen deshalb weitestgehend im Trockengut beziehungsweise im erzeugten Düngemittel verbleiben und dürfen nicht über den Luftpfad als zusätzliche Ammoniakemissionen freigesetzt werden.

Vom Landesamt für Umwelt wurde deshalb ein Projekt zur Untersuchung des Emissionsverhaltens und zum Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen initiiert. Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert. Es hatte die folgenden Zielsetzungen:

- Erhebung der Art und Anzahl von Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen sowie Ermittlung von Genehmigungsanforderungen und Betriebserfahrungen,
- Besichtigung verschiedener Anlagentypen vor Ort und messtechnische Untersuchungen relevanter Luftschadstoffe (Ammoniak, Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff inklusive Methan, Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Geruch) an drei verschiedenen Systemen von Gärresttrocknungsanlagen,
- Bewertung der bestehenden Systeme im Hinblick auf Effizienz, Umweltrelevanz, den Stand der Technik und soweit möglich deren Wirtschaftlichkeit.
- Erstellung von Handlungsempfehlungen beziehungsweise Vollzugshilfen

Das Projekt wurde im Zeitraum von 01.02.2019 bis 30.06.2022 durchgeführt. Der Fokus lag aufgrund der großen Anlagenzahl bei Anlagen zur Trocknung von Gärresten.

### Art und Anzahl der bayerischen Wirtschaftsdüngeraufbereitungsanlagen

Die durchgeführten Recherchen (Stand 20.09.2021) ergaben, dass in Bayern 99 Gärresttrocknungsanlagen in Betrieb sind. Größtenteils sind die Anlagen immissionsschutzrechtlich genehmigt. Weitere 32 Anlagen befinden sich in der Planung. Die häufigsten in Bayern eingesetzten beziehungsweise geplanten Verfahren zur Gärresttrocknung sind Schaufelradrockner (36), Bandrockner (34) und Vakuumverdampfer (33). Es folgen Rührwerkrockner (11), Trockner mit direkter Trocknung durch BHKW-Abgase (BHKW-Abgastrockner) (11) und Sonstige (6). Da der Fokus des Projekts auf der Aufbereitung von Gärresten liegt, wurden Klärschlamm-trocknungen nicht berücksichtigt (51 Anlagen Stand 2015).

### Emissionsuntersuchungen

Im Projekt wurden zunächst die Ergebnisse von vorhandenen Emissionsmessungen an Gärrestaufbereitungsanlagen ausgewertet. Emissionen von verschiedenen Anlagen- und Abgasreinigungstypen wurden miteinander verglichen. Im Weiteren wurden Emissionsmessungen im Abgas von drei unterschiedlichen und häufig in Bayern betriebenen Gärresttrocknungstypen durchgeführt. Untersucht wurden ein Schaufelradtrockner mit Chemowäscher, ein Bandtrockner mit Chemowäscher sowie ein Rotationstrockner mit Gärrestansäuerung und Gewebefilter.

### Ergebnisse

Die Anzahl an Gärresttrocknern im Betrieb beziehungsweise im Genehmigungsverfahren nahm im Zeitraum von 2009 bis 2021 stetig zu. Anstelle von einfacheren Bandtrockner-Systemen kommen zunehmend komplexere Verfahren wie Vakuumverdampfungsanlagen zum Einsatz. Die Zahl der Trocknungsanlagen mit direkter Trocknung durch BHKW-Abgase nahmen zuletzt zu.

Bei allen Trocknersystemen können verfahrensbedingt grundsätzlich erhebliche Mengen an Ammoniak freigesetzt werden. Zur Ammoniakabscheidung sind deshalb geeignete Minderungsmaßnahmen erforderlich. In der Regel werden saure Wäscher oder Brüdenwäscher eingesetzt, ggf. erfolgt eine Säurezugabe direkt in das Trockengut. Es ist darauf zu achten, dass die Abgasreinigung dauerhaft effektiv betrieben wird, um Ammoniakemissionen weitgehend zu vermeiden. Die dauerhafte Funktion der Abgasreinigung beziehungsweise der Säurezugabe ins Trockengut muss durch entsprechende Steuer- und Regelungseinrichtungen für die Säuredosierung sichergestellt werden. Ein Ausfall der Säuredosierung soll durch Alarmierungen rechtzeitig erkannt werden. Die Aufzeichnung und Dokumentation der wichtigsten Betriebsparameter mittels Datenlogger oder das Führen eines elektronischen Betriebstagebuches ist für die Plausibilisierung der dauerhaften Funktion der Abgasreinigung auch aus Überwachungsgründen erforderlich. Weitere Maßnahmen zur Abgasreinigung sind der Einsatz von Gewebefiltern zur Staubabscheidung, sofern die Ammoniakabscheidung durch Säurezugabe ins Trocknungsgut erfolgt.

Die Auswertung von Messberichten ergab, dass die Grenzwerte für Ammoniak in mehreren Fällen überschritten wurden. Die ausreichende Auslegung der Minderungsmaßnahmen für Ammoniak und ein ordnungsgemäßer Betrieb der Anlagen sind aus immissionsschutztechnischer Sicht entscheidend. Die durchgeführten Messungen zeigten, dass die Grenzwerte der TA Luft 2021 grundsätzlich eingehalten werden können.

Mit den Erkenntnissen aus dem Projekt wurden Auflagenvorschläge zur Luftreinhaltung erstellt, die den Genehmigungsbehörden als Handlungsempfehlung dienen. Diese sind diesem Bericht als Anhang beigefügt. Sie werden kontinuierlich fortgeschrieben.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation für das Projekt

In Deutschland sind die landwirtschaftlichen Stickstoffüberschüsse regional unterschiedlich verteilt. Besonders Gebiete mit intensiver Tierhaltung und hohen Viehbesatzdichten sind problematisch und führen zu erheblichen Stickstoffüberschüssen. Dies zeigt die Grafik des landwirtschaftlichen Flächenbilanzüberschusses für Stickstoff in Abb. 1 nach Umweltbundesamt (2019).

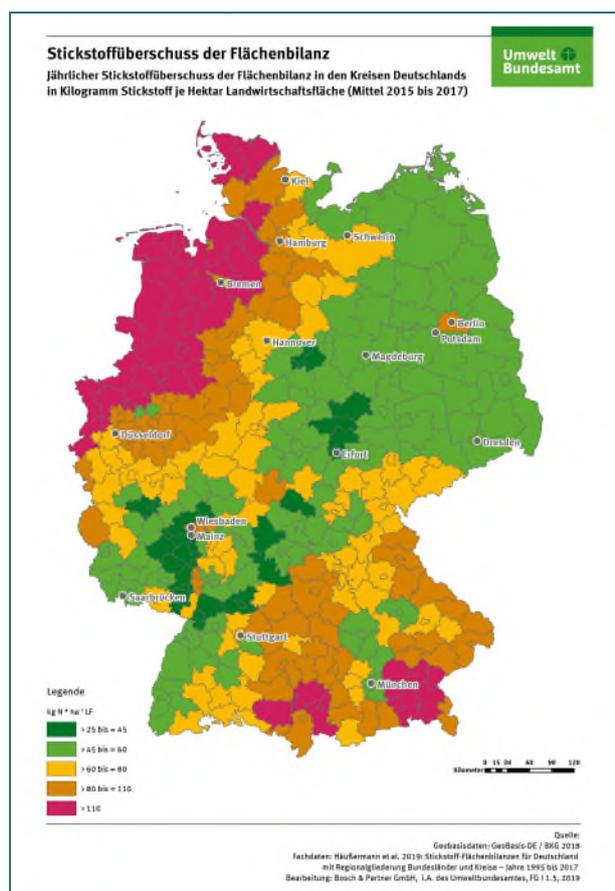


Abb. 1:  
 Jährlicher Stickstoffüberschuss der Flächenbilanz in den Kreisen Deutschlands in Kilogramm Stickstoff je Hektar Landwirtschaftsfläche (Mittel 2015 bis 2017) nach Umweltbundesamt (2019)

Obwohl sich der Fleischkonsum in Deutschland in den letzten Jahren reduziert hat, wird kaum weniger Fleisch produziert. Stattdessen wird Fleisch exportiert und eiweißreiche Futtermittel werden importiert. Dadurch entstehen hohe Stickstoffüberschüsse, die in vielfältiger Weise zu erheblichen Umweltbelastungen führen. Daran haben die Emissionen aus Tierhaltungen sowie die Lagerung und die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, aber auch die Ausbringung von Gärresten aus Biogasanlagen einen erheblichen Anteil. Gelangen durch Düngung mehr Stickstoffverbindungen in die Böden, als durch Kulturpflanzen entzogen werden, wird überschüssiger Stickstoff in angrenzende Gewässer ausgewaschen oder als Nitrat ins Grundwasser eingetragen (Umweltbundesamt 2018).

Auch in Bayern gibt es zahlreiche Gebiete, in denen hohe Stickstoffeinträge zu regionalen Grundwasserbelastungen und zu hohen Vorbelastungen über den Luftpfad führen. Auf diese Weise kann die Biodiversität von empfindlichen Ökosystemen bedroht werden.

Die hohen Stickstoffeinträge sollen unter anderem durch die Novellierungen der Düngeverordnung (DüV) in den Jahren 2017 und 2020 reduziert werden. Diese forderten weitere Minderungsmaßnahmen.

men bei der landwirtschaftlichen Düngung, längere Lagerzeiten für Wirtschaftsdünger und eine detailliertere Bilanzierung der Stickstoffflüsse. Die erhöhten Anforderungen stellen die Landwirtschaft und die Betreiber von Biogasanlagen vor Herausforderungen. Die wohl größte Herausforderung für die Betreiber ist die Einbeziehung von allen organischen und organisch-mineralischen Düngemitteln in die betriebliche Obergrenze, wonach im Durchschnitt der landwirtschaftlich genutzten Flächen des Betriebs  $170 \text{ kg N}/(\text{ha} \cdot \text{a})$  nicht überschritten werden dürfen (§ 6 DüV). Durch diese Ausweitung zählen Gärreste aus Biogasanlagen, Kompost und Klärschlamm zur betrieblichen Obergrenze.

Zusätzlich wurden sogenannte „Rote Gebiete“ und „Grüne Gebiete“ eingeführt. In Gebieten mit einer hohen Nährstoffbelastung („Rote Gebiete“) werden weitere Anforderungen an die Ausbringungen von Wirtschaftsdünger gestellt. Dies bedeutet unter anderem, dass zukünftig für viele Tierhaltungs- und Biogasanlagen eine erhöhte Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger von neun (statt sechs) Monaten und eine genauere Stickstoffbilanzierung gefordert wird. Für viele Betriebe wird es schwieriger, ausreichende Flächen für die Stickstoffausbringung bereitzustellen, wodurch die Wirtschaftsdüngeraufbereitung zunehmend interessant wird. Im Gegenzug erhalten Betriebe in wenig belasteten Gebieten („Grüne Gebiete“) Erleichterungen (Fachverband Biogas e.V. (2019), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2021)).

Abb. 2 zeigt die Verteilung der Roten Gebiete in Bayern.

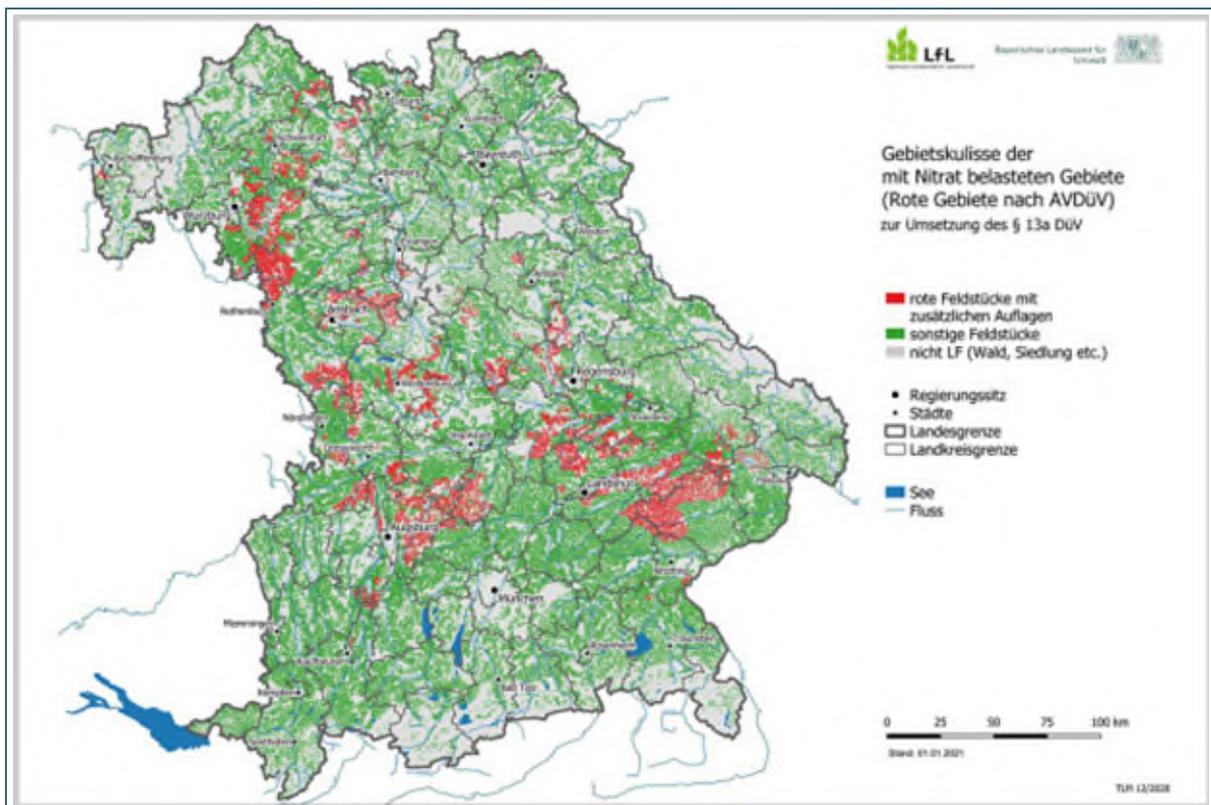


Abb. 2: Gebietskulisse der mit Nitrat belasteten Gebiete (Rote Gebiete nach Ausführungsverordnung Düngerverordnung) nach Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)

Um die Ammoniakemissionen zu mindern, hat die Bundesrepublik Deutschland das Multikomponenten-Protokoll vom 03.07.2004 ratifiziert und sich dadurch verpflichtet, ab Ende 2010 weniger als 550.000 Tonnen Ammoniak pro Jahr zu emittieren (NEC-Richtlinie).

Die Ammoniakemissionen der Bundesrepublik Deutschland der Jahre 1990 bis 2020 sind in Abb. 3 dargestellt. Daraus ist auch ersichtlich, dass der weit überwiegende Teil (> 90 %) der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft stammt.

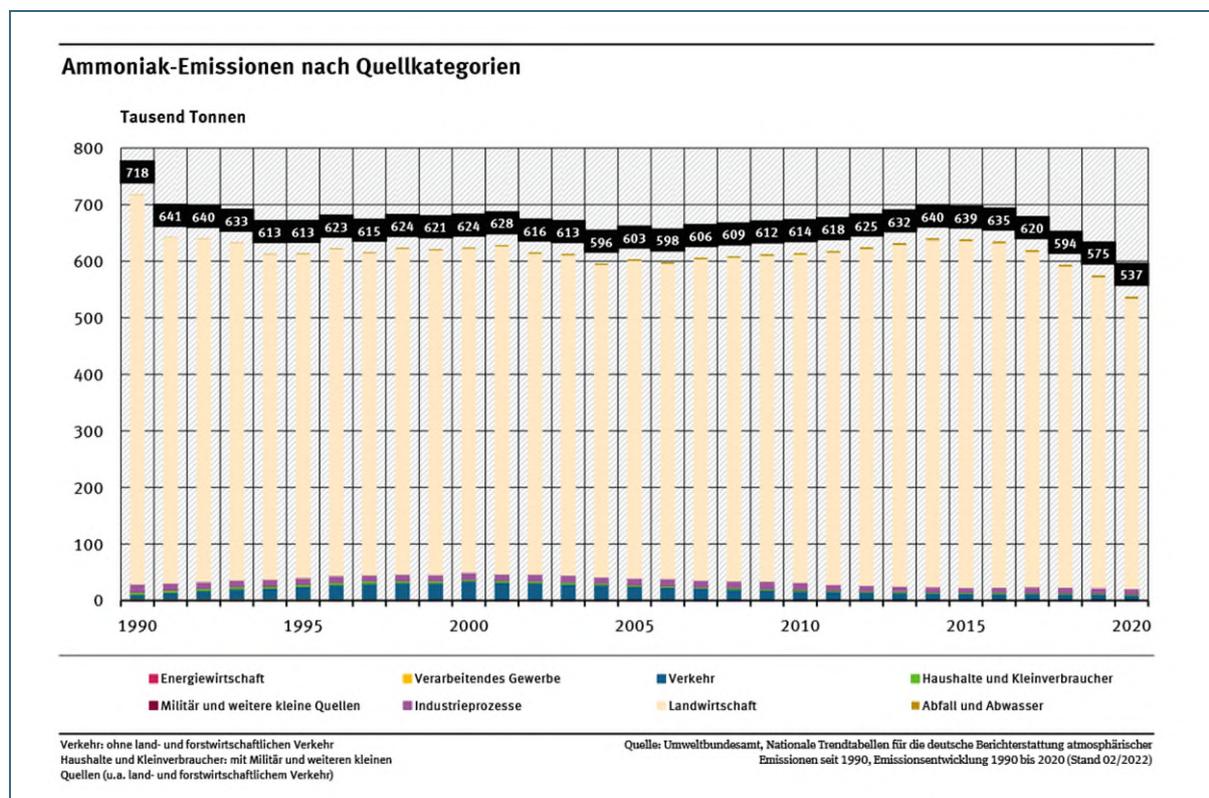


Abb. 3: Ammoniakemissionen nach Quellkategorie nach Umweltbundesamt (2022)

Mit der Richtlinie (EU) 2016/2284 vom 14.12.2016 wurden unter anderem für Ammoniak neue Emissionsreduktionsverpflichtungen festgelegt (NERC-Richtlinie). Diese sind unter anderem in der Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV) in nationales Recht umgesetzt. Die 43. BImSchV verpflichtet Deutschland zur Erstellung eines „Nationalen Luftreinhaltprogramms“. Das nationale Luftreinhaltprogramm Deutschlands wurde mit Kabinettsbeschluss vom 22.05.2019 veröffentlicht. Es ist alle vier Jahre zu aktualisieren. Für das Jahr 2030 ist eine Reduktionsverpflichtung der Ammoniakemissionen um 29 % gegenüber dem Jahr 2005 zu erreichen.

Wirtschaftsdüngertrocknungsanlagen können grundsätzlich einen Beitrag zur Reduzierung der Ammoniakemissionen leisten, indem mit noch nicht vollständig genutzter Abwärme aus Biogasmotoranlagen Wirtschaftsdünger und insbesondere Gärreste fachgerecht aufbereitet beziehungsweise getrocknet werden. Dabei werden flüchtige Ammoniumstickstoffverbindungen, durch Zugabe von Schwefelsäure in nicht flüchtiges Ammoniumsulfat überführt. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Stickstoffverbindungen aus dem Wirtschaftsdünger möglichst vollständig im Trockengut verbleiben. In Deutschland gibt es nach Fachverband Biogas e.V. (2019) rund 9.350 Biogasanlagen, in denen rund 82 Millionen Tonnen Gärrest jährlich anfallen. In Bayern werden nach Strobl (2022) aktuell (Stand 15.02.2022) 2.674 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Nennleistung von 1.445 MW betrieben.

Nach Scholwin et al. (2019) bringt die Mehrheit der deutschen Biogasanlagenbetreiber den anfallenden Gärrest auf den eigenen landwirtschaftlichen Flächen aus. Rund 92 % der Anlagenbetreiber geben an, ihren Gärrest im eigenen Betrieb einzusetzen. Ein Transport des Gärrestes in stickstoffärmere

Regionen oder zu abnehmenden Betrieben erfolgt nur in geringem Umfang. Insgesamt geben lediglich 3 % der Betreiber an, ihren Gärrest an Externe abzugeben, da die Transportwürdigkeit von Gärresten zu niedrig ist. Die Aufbereitung der Gärreste zu einem transportfähigen Düngematerial stellt eine sinnvolle Alternative dar. Besonders in Regionen mit hoher Viehdichte ist dies eine notwendige Maßnahme, um Transporte in Regionen ohne Nährstoffüberschüsse zu ermöglichen und dort Mineraldünger zu ersetzen.

Es ist daher erforderlich, wirtschaftlich, energetisch und technisch erprobte Anlagentechniken zu etablieren, welche den Gewässerschutz und die Luftreinhaltung gleichermaßen berücksichtigen. Aus Sicht der Luftreinhaltung muss daher unbedingt sichergestellt werden, dass bei der Gärrestaufbereitung die Stickstoffverbindungen nicht über den Luftpfad als zusätzliche Ammoniakemissionen freigesetzt werden und zu zusätzlichen Emissionen führen. Aus diesem Grund wurde dieses Projekt initiiert und durchgeführt.

## 1.2 Entwicklung der Anlagentechnik

In den 1990er Jahren wurden die ersten Forschungen zur Wirtschaftsdünger aufbereitung aufgrund der aufwendigen Technik und der hohen Energiekosten wiedereingestellt. Erst mit der Energiewende begannen erneute Untersuchungen im Bereich des Biogassektors. Mit zusätzlichen Vergütungen durch den KWK-Bonus und der Abwärmenutzung zum Zwecke der Düngemittelherstellung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2009) sind Gärrestaufbereitungsanlagen für viele Betriebe wirtschaftlich interessant.

Anfangs wurde in Bandtrocknern ausschließlich der separierte Feststoff getrocknet. Mittlerweile gibt es Systeme, die den gesamten flüssigen Gärrest eindicken und aufkonzentrieren. Die ersten Anlagen setzten große Mengen des im Trocknungsprozess flüchtigen Ammoniaks über den Luftpfad frei, da in der Regel noch keine Abgasreinigungen eingesetzt wurden. Bei einer Anlage mit einem jährlichen Durchsatz von 10 kt Gärrest würde die Menge des frei werdenden Ammoniaks rund 20 t/a betragen und somit den Emissionen einer Schweinemastanlage mit rund 7.000 Schweinen entsprechen. Durch den Verlust an Ammonium im Endprodukt und die zusätzliche Belastung von stickstoffempfindlichen Ökosystemen und Pflanzen durch Ammoniakemissionen bei der Aufbereitung wurden die Förderwürdigkeit und Sinnhaftigkeit dieser Anlagen in Frage gestellt.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) hat in 2015 im Biogasforum Bayern den Anstoß für eine Fachinformation „Gärresttrocknung von Biogasanlagen“ gegeben. Dabei wurden die Anforderungen an Abluftreinigungsanlagen mit gezielter Rückhaltung von Ammoniak definiert und als Stand der Technik festgestellt.

Die Aufbereitung von Gärresten wird durch die Anforderungen der novellierten Düngeverordnung 2017 und 2020 zukünftig auch bei bayerischen Betrieben eine wichtige Rolle spielen. Durch die Erhöhung der Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger von sechs auf neun Monate für bestimmte Anlagen und die Forderung nach einer detaillierteren Stickstoffbilanz wird die Wirtschaftsdünger aufbereitung häufiger in Betracht gezogen. Eine Aufbereitung des Wirtschaftsdüngers vor dem Ausbringen wirkt sich deutlich auf die Lager- und Transportmengen, den Düngegehalt und somit auf die wirtschaftliche und energetische Effizienz der Betriebe aus.

Derzeit werden die meisten Gärrestaufbereitungsanlagen mit nachgeschalteten Chemowäschern zur Ammoniakabscheidung betrieben, jedoch ist bisher noch wenig über die dauerhafte Funktion dieser Systeme bekannt.

Zwischenzeitlich drängt eine Vielzahl von Trocknungssystemen mit unterschiedlicher Komplexität auf den Markt. Darunter befinden sich komplexere Systeme, wie beispielsweise Vakuumverdampfungssysteme mit Brüdenwäschern, die nahezu emissionsfrei arbeiten. Andere Hersteller schalten der Wirtschaftsdüngertrocknung dagegen einfache Biofilter nach, die bisher nur zur Geruchsreduzierung eingesetzt werden.

Aktuell häufen sich weitere Systeme, die den Gärrest vor der Zufuhr in das Trocknungssystem mit Schwefelsäure ansäuern und Abgase aus dem BHKW zur direkt beheizten Trocknung verwenden. Hier stellt sich die Frage, ob eine ausreichende Rückhaltung von Ammonium dauerhaft sichergestellt werden kann.

### 1.3 Projektziele

Das Projekt „Untersuchung zum Emissionsverhalten und Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdünger- aufbereitungsanlagen“ verfolgte folgende Ziele:

Recherche bei Gärrestaufbereitungsanlagen an bayerischen Biogasanlagen:

- Bestandserfassung von Gärresttrocknungsanlagen in Bayern
- Bewertung der Verfahrenstechnik, des Emissionsverhaltens, der emissionsmindernden Maßnahmen und gegebenenfalls der Wirtschaftlichkeit der Systeme und Erfahrungen der Betreiber.
- Einschätzung der dauerhaften Funktion der Systeme inklusive der Abgasreinigung

Durchführung von Emissionsmessungen an drei verschiedenen Gärrestaufbereitungsanlagen:

- Messtechnische Untersuchung relevanter Luftschadstoffe wie Ammoniak, Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff inklusive Methan, Schwefelwasserstoff, Stickstoffoxide und Geruch im Rohgas und Reingas
- Erfassung wichtiger Rand- beziehungsweise Betriebsparameter der Abgasreinigung
- Bewertung der Systeme in Bezug auf den Stand der Technik

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Recherchen, den Ortseinsichten und den Emissionsmessungen sollen als Handlungsempfehlung für Genehmigungsbehörden und Anlagenhersteller dienen. Auflagen- vorschläge für die Genehmigung, einschließlich Anforderungen hinsichtlich Emissionsmessungen und Überwachung von geeigneten Betriebsparametern, waren auszuarbeiten. Die Ergebnisse des Projekts sollten auf verschiedenen Fachtagungen vorgestellt werden und in die Fortschreibung des Biogas- handbuchs Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)) einfließen.

## 1.4 Fachlicher Austausch und Mitarbeit bei fachbezogenen Projekten

Aufgrund der Aktualität des Themas „Gärrestauffbereitung“ sind die folgenden weitere Projekte bekannt:

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Thema „Wirtschaftsdüngeraufbereitung“. Hier stehen eher Themen der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz im Vordergrund.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Referat „Grundwasserbeschaffenheit, Trinkwasseraufbereitung“: Thema „Aufbereitung von Wirtschaftsdünger zur Verminderung von Stickstoffemissionen in Gewässer und Herstellung von transportfähigem Dünger“.
- Vorstudie der Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management (MRM): Thema „Bewertung von Technologien zur Aufbereitung von Fermentationsrückständen aus Vergärungsanlagen“.
- Döhler et al. (2021) im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA): Abschlussbericht „Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF)“. Erfasst und bewertet den Stand der technischen Entwicklungen für die Aufbereitung von flüssigen Wirtschaftsdüngern in Europa und Deutschland unter Berücksichtigung der relevanten BVT-Kriterien.

Insbesondere mit Referat „Grundwasserbeschaffenheit, Trinkwasseraufbereitung“ im LfU bestand und besteht weiterhin reger Austausch. Mit der LfL fand im Oktober 2021 ein Gespräch zur gegenseitigen Information in Freising statt.

Den genannten Projekten gemeinsam ist die Thematik „Wirtschaftsdüngeraufbereitung“. Es zeigte sich, dass unterschiedliche Betrachtungsweisen zugrunde liegen und der Fokus jeweils entsprechend der Fachdisziplin gesetzt wurde und deshalb ein gegenseitiger Informationsaustausch ausreichend war. Das durchgeführte Projekt setzte als einziges Projekt den Fokus auf die Emissionen beziehungsweise den emissionsarmen Betrieb von Gärresttrocknern.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt wurden mit recherchierter Fachliteratur verglichen. Insgesamt wurden 14 Ortseinsichten bei Gärresttrocknungsanlagen durchgeführt. Zusätzlich wurden Fachtagungen besucht, um sich über den neuesten Stand der Technik und die aktuellen Entwicklungen zu informieren. Außerdem wurde mit eigenen Vorträgen über den Aspekt der Emissionsminderung bei der Wirtschaftsdüngeraufbereitung bei den folgenden Tagungen informiert:

- Fachtagung „Fortschritt Gülle und Gärrest“ 2020 des Internationalen Biogas und Bioenergie Kompetenzzentrums (IBBK) Fachgruppe Biogas in Schwäbisch Hall → mit eigenem Vortrag
- Kongress "Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven" 2021 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (online) → mit eigener Poster-Vorstellung
- Umweltschutzingenieurtagungen 2019 und 2021 des LfU in Nürnberg und Gersthofen → jeweils mit eigenem Vortrag
- Seminar „Gärproduktaufbereitung und -vermarktung“ 2022 des Fachverbands Biogas e.V. (online) → mit eigenem Vortrag

Darüber hinaus wurden die bayerischen Vollzugsbehörden bei fachtechnischen Fragestellungen zu Gärresttrocknern insbesondere in Genehmigungsverfahren unterstützt. Außerdem erfolgte eine aktive Mitarbeit bei der Erarbeitung der Richtlinie VDI 3475 Blatt 8 und 9 (Arbeitstitel: „Emissionsminderung – Gärrestauffbereitung und Wirtschaftsdüngeraufbereitung“), um die Erfahrungen aus dem Projekt direkt in die Richtlinienarbeit einzubringen. Das Biogashandbuch Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)) wurde bei dessen Fortschreibung um das Kapitel 2.2.2.2.10 „Gärresttrocknung“ ergänzt.

## 2 Bestandserfassung – Gärresttrocknungsanlagen in Bayern

Die Anzahl und Art der in Bayern im Einsatz befindlichen Wirtschaftsdünger- aufbereitungsanlagen wurden erfasst. Die unterschiedlichen Betriebserfahrungen wurden ermittelt.

Da der Fokus des Projekts auf die Aufbereitung von Gärresten gelegt wurde, wurden Klärschlamm- trocknungsanlagen nicht erfasst. Es wurden nur Aufbereitungsanlagen mit Trocknungsprozessen be- rücksichtigt, bei denen unter Abwärmenutzung eine Mengenreduzierung der Gärreste einhergeht. Rein mechanische oder chemische Aufbereitungsanlagen, wie zum Beispiel die alleinige Separation der Gärreste ohne Wärmenutzung aus den BHKW, wurden nicht erfasst. Letztendlich wurden nur Gär- resttrocknungsanlagen betrachtet.

Um die Art und Anzahl der Systeme zu erfassen, wurden alle Landratsämter und kreisfreien Städte in Bayern zu den Gärresttrocknungsanlagen in ihrem Landkreis beziehungsweise ihrer Stadt befragt. Eine erste Befragung fand im Frühjahr 2019 statt. Im Zuge dessen wurden die Behörden gebeten, das LfU über entsprechende Anlagen in Kenntnis zu setzen. Im August 2021 wurde eine zweite Befragung durchgeführt. Diese wurde individuell an die zuvor ermittelte Anlagensituation in den Landkrei- sen/Städten angepasst. Die Aktualität und die Vollständigkeit der Erfassung können allerdings nicht sichergestellt werden. Stichtag der Erfassung für die nachfolgenden Informationen und Darstellungen war der 20.09.2021. Weiterhin wurden bei einer Vielzahl von Anlagen die Genehmigungsbescheide gesichtet. Bei ausgewählten Anlagen wurden zusätzlich Ortseinsichten durchgeführt.

Zum Stichtag waren 99 Gärrestaufbereitungsanlagen in Betrieb und weitere 32 in Planung, Bau oder im Genehmigungsverfahren. In Summe wurden 131 Anlagen erfasst.

### **Eingesetzte Aufbereitungsverfahren und regionale Verteilung**

In Abb. 4 zeigt eine Gesamtübersicht über 131 erfasste Gärrestaufbereitungsanlagen in Bayern. Die häufigsten in Bayern eingesetzten Verfahren zur Gärresttrocknung sind Schaufelradrockner (36), Bandrockner (34) und Vakuumverdampfer (33). Es folgen Rührwerkstrockner (11), Trockner mit di- rekter Trocknung durch BHKW-Abgase (BHKW-Abgastrockner; 11) und Sonstige<sup>1</sup> (6).

---

<sup>1</sup> Mit „sonstigen“ Gärrestaufbereitungsanlagen sind solare Gärresttrockner und solche, die sich nicht einer der anderen Aufbe- reitungsarten zuordnen ließen, gemeint. Das sind zum Beispiel Schubboden- oder Siebtrockner. Häufig handelt es sich hier- bei um individuelle Anlagen, zu denen keine weiteren Informationen vorliegen.

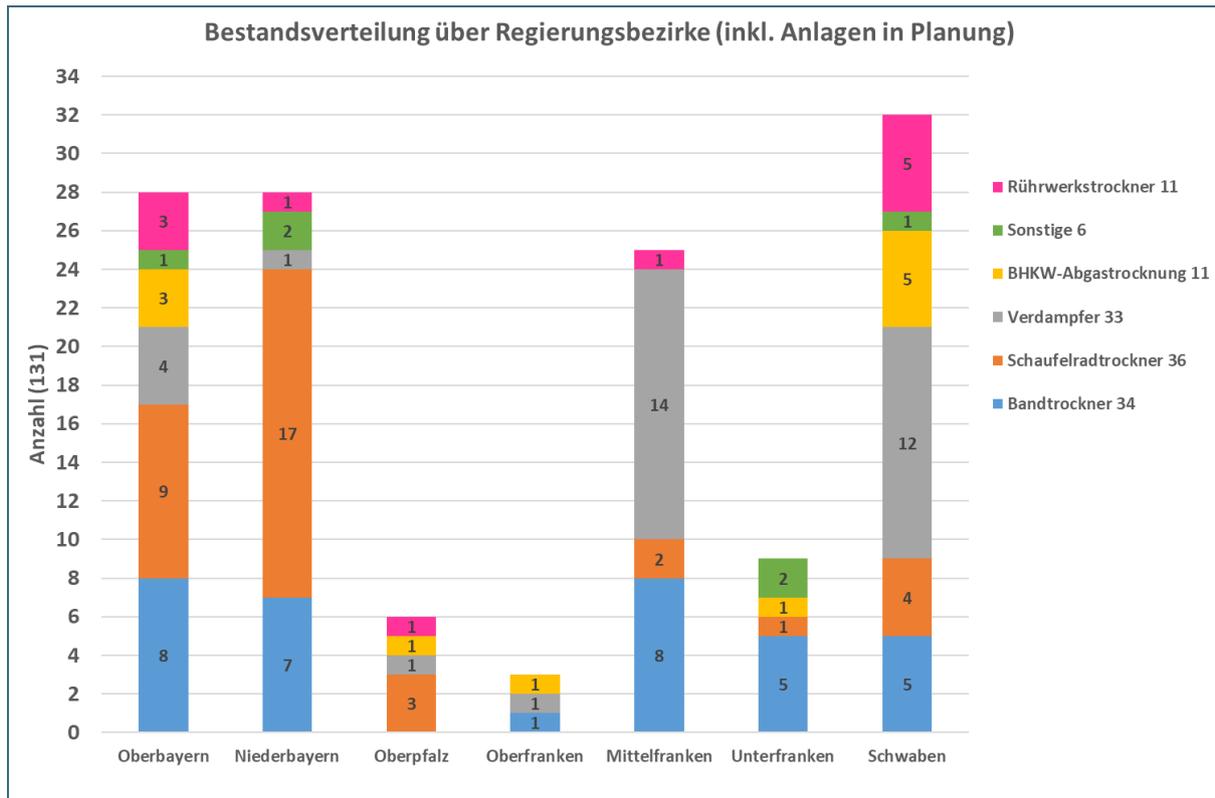


Abb. 4: Gesamtübersicht Gärrestaubbereitungsanlagen in Bayern (Bestand und Planung)

Hinsichtlich der regionalen Verteilung fällt auf, dass sich in den vier Regierungsbezirken Schwaben (32), Oberbayern (28), Niederbayern (28) und Mittelfranken (25) deutlich mehr Anlagen befinden als in den übrigen Regierungsbezirken Unterfranken (9), Oberpfalz (6) und Oberfranken (3).

Bei genauerer, landkreisscharfer Betrachtung zeigt sich auch innerhalb der Regierungsbezirke eine sehr heterogene Verteilung. So befinden sich beispielsweise alleine 17 der 25 mittelfränkischen Anlagen im Landkreis Ansbach. Weitere Landkreise mit einer hohen Anzahl an Gärresttrocknungsanlagen sind Dingolfing-Landau (11), Dillingen an der Donau (9) und Rottal-Inn (9).

In Abb. 5 ist die Verteilung der Biogasanlagen in Bayern nach Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2022) dargestellt. Es zeigt sich, dass Anzahl und Verteilung von Gärrestaubbereitungsanlagen mit Anzahl und Verteilung von Biogasanlagen korrelieren. Diese kommen entsprechend in den oben genannten Regionen häufiger vor.

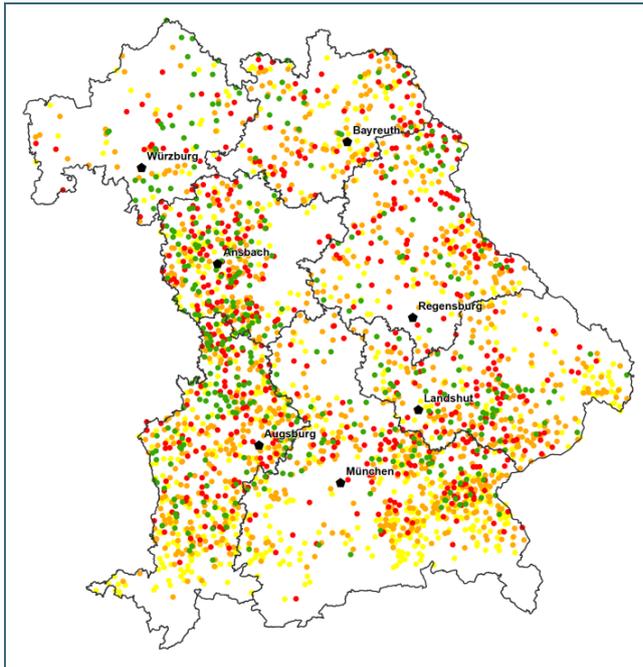


Abb. 5:  
Punktekarte der bayerischen landwirtschaftlichen Biogasproduktion zum Stichtag 31.12.2021 nach Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2022)

Gelb: 0–150 kW<sub>el</sub>  
Orange: 151–500 kW<sub>el</sub>  
Rot: 501–1.000 kW<sub>el</sub>  
Grün: > 1.001 kW<sub>el</sub>

Abb. 6 gibt einen Überblick über die 99 in Betrieb befindlichen Gärrestaufbereitungsanlagen. Im Bestand sind die häufigste Anlagenart Bandrockner (33). Es folgen Schaufelradrockner (25), Vakuumverdampfer (20), BHKW-Abgastrocknung (9), Rührwerkrockner (7) und Sonstige (5). Die meisten bereits in Betrieb befindlichen Anlagen stehen in Schwaben (25), Niederbayern (24), Oberbayern (19) und Mittelfranken (15). In Unterfranken (8), der Oberpfalz (6) und in Oberfranken (2) befinden sich dagegen deutlich weniger Gärrestaufbereitungsanlagen im Einsatz.

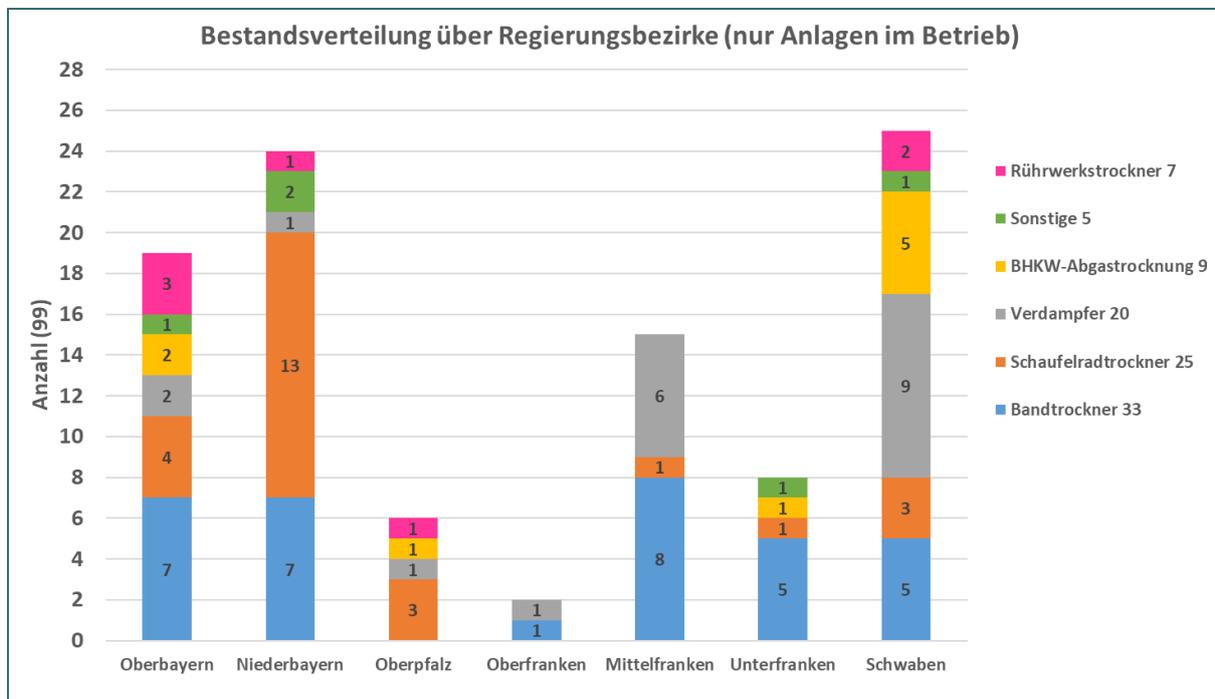


Abb. 6: Gärrestaufbereitungsanlagen in Bayern (in Betrieb)

In Abb. 7 sind die 32 geplanten Gärrestauffbereitungsanlagen dargestellt. Die regionale Verteilung setzt dabei in etwa den Trend bei den Bestandsanlagen fort. In Mittelfranken (10), Oberbayern (9), Schwaben (7) und Niederbayern (4) sind mehr Anlagen in Planung als in den Regierungsbezirken Oberfranken (1), Unterfranken (1) und Oberpfalz (0).

Bei Betrachtung der Aufbereitungsarten lässt sich eine Entwicklung feststellen, die der Verteilung im Bestand entgegenläuft. Waren im Bestand noch Bandrockner das am häufigsten eingesetzte System, sind das bei den geplanten Anlagen Vakuumverdampfer (13), gefolgt von Schaufelradrocknern (11). Weiterhin waren vier Rührwerkstrockner, zwei Trockner mit direkter Trocknung durch BHKW-Abgase (BHKW-Abgastrockner), ein Bandrockner und eine sonstige Aufbereitungsanlage in Planung. Der Trend geht damit weg vom technisch einfachen Bandrockner hin zu den komplexeren Vakuumverdampfern.

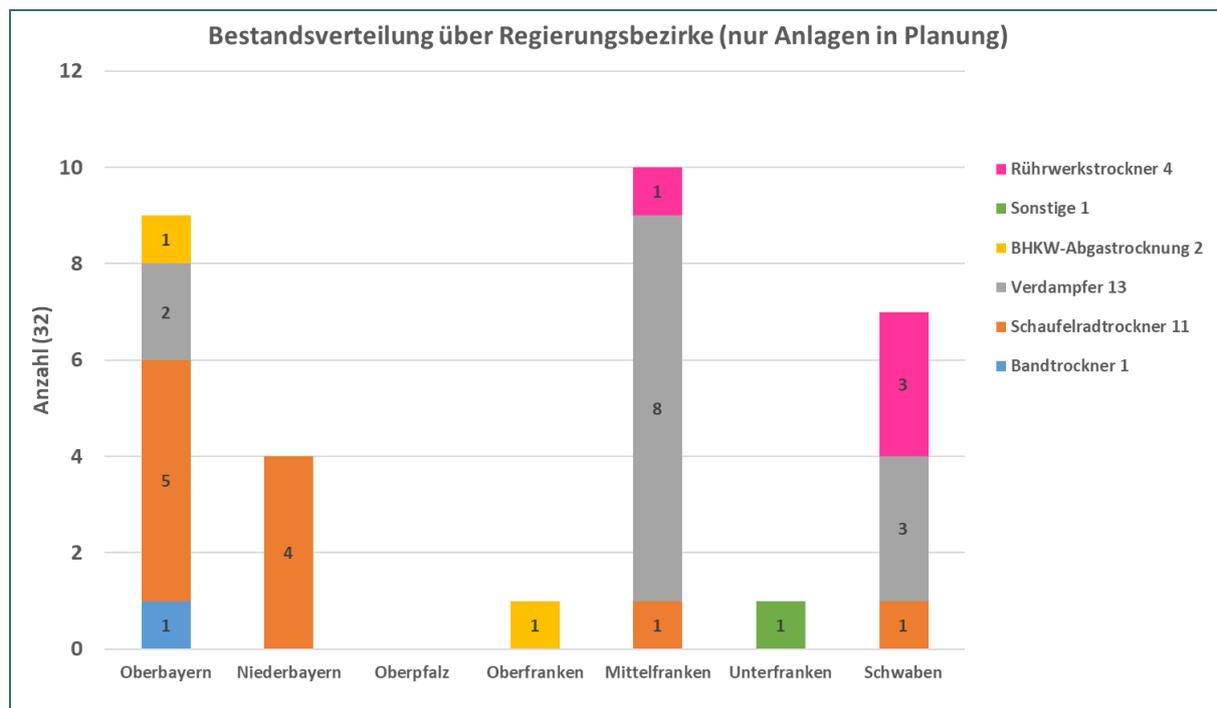


Abb. 7: Gärrestauffbereitungsanlagen in Bayern (in Planung, Bau oder im Genehmigungsverfahren)

Dieser Trend lässt sich auch bei einer Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Genehmigungen erkennen (siehe Abb. 8). Dort sind die 99 Bestandsanlagen sowie acht in Planung befindliche Anlagen abgebildet, die zwar zum Stichtag noch nicht im (Regel-)Betrieb waren, aber bei denen bereits ein Genehmigungsbescheid vorlag.

In den Jahren 2019 bis 2021 wurden nur ein Bandrockner und dafür überdurchschnittlich viele Vakuumverdampfer (9) und sogenannte BHKW-Abgastrockner (5) genehmigt. Dies bestätigt den Trend, der bereits oben bei der Betrachtung der geplanten Gärrestauffbereitungsanlagen beobachtet werden konnte.

Ein Grund für das Zunehmen der Vakuumverdampfersysteme – trotz deren hoher Investitionskosten – könnte darin liegen, dass diese weitgehend automatisiert laufen, ohne dass die Betreiber viel Arbeitszeit investieren müssen. Außerdem können diese sehr emissionsarm betrieben werden. Die BHKW-Abgastrockner könnten an Attraktivität gewonnen haben, weil die Wärmenutzung durch die direkte Verwendung des BHKW-Abgases zum Trocknen meist effizienter realisierbar ist.

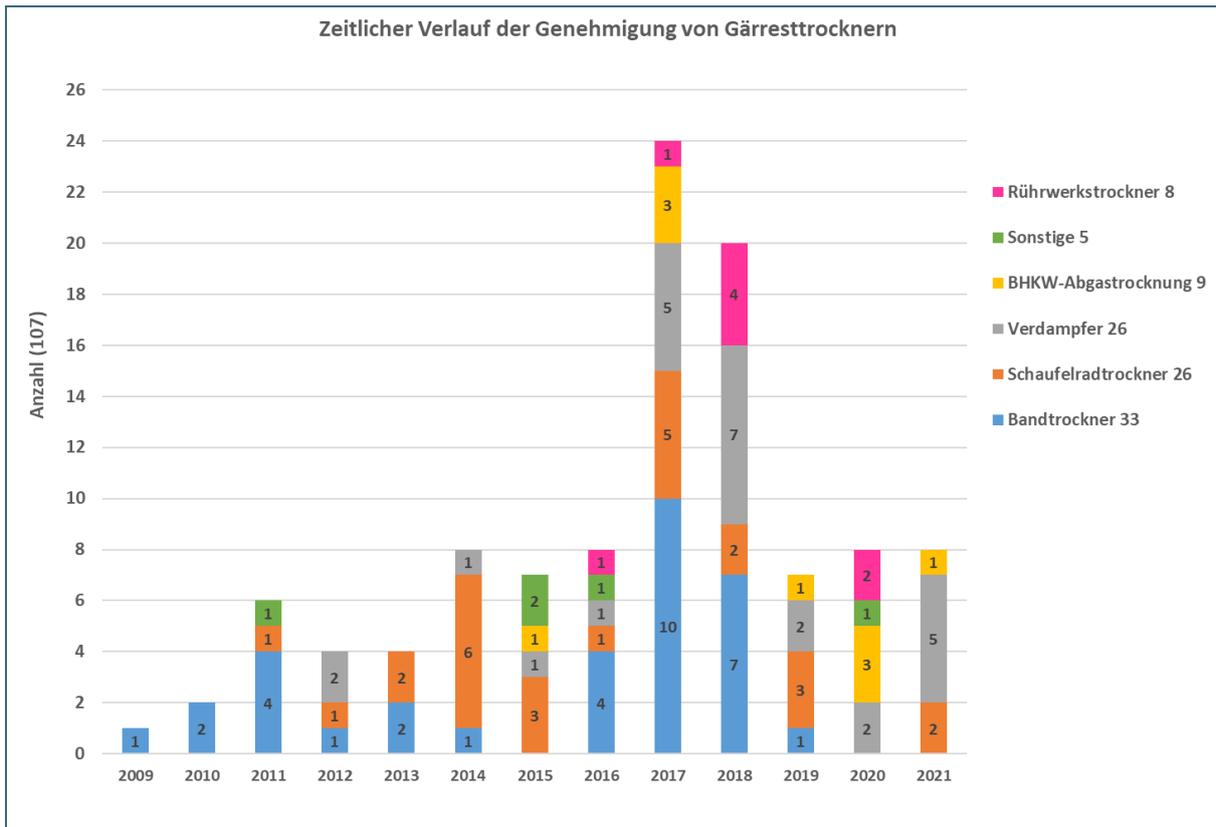


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Genehmigung von Gärrestaufbereitungsanlagen

Weiterhin lässt sich aus Abb. 8 erkennen, dass die erste Gärrestaufbereitungsanlage aus dem Jahr 2009 stammt und die Anzahl betriebener Anlagen seitdem jedes Jahr zunimmt.

Die höchsten Zuwächse innerhalb eines Jahres waren in den Jahren 2017 und 2018 mit 24 beziehungsweise 20 genehmigten Gärrestaufbereitungsanlagen zu verzeichnen. Der deutliche Anstieg in den Jahren 2017 und 2018 ist vermutlich auf die Novellierung der Düngeverordnung 2017 zurückzuführen mit erhöhten Anforderungen an die Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger (Erhöhung der Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger auf neun Monate, siehe Kapitel 1.1).

### Abgasreinigung

Im Folgenden werden die erfassten 131 Anlagen auf die Art der installierten Abgasreinigung untersucht:

Bei 58 Gärresttrochnern, vorwiegend Bandrockner und Schaufelradrockner, kamen saure Wäscher zum Einsatz (Chemowäscher). In den Wäschern wird das Waschwasser mit Schwefelsäure angesäuert.

In den meisten Gärrestvakuumverdampfern waren saure Brüdenwäscher integriert. Konkret konnte dies bei 26 Anlagen dokumentiert werden. Auch die Brüdenwäscher werden mit Schwefelsäure angesäuert.

Bei elf Anlagen wurde verdünnte Schwefelsäure (meist 20 %ig) in den Trockner vor einem Gewebefilter eingedüst. Das ammoniakhaltige Abgas reagiert dort mit der Schwefelsäure zu kristallinem Ammoniumsulfat, welches zusammen mit Staub im Gewebefilter zurückgehalten und wieder dem Gärrest zugemischt wird.

Bei sechs Anlagen wurde der Gärrest selbst mit Schwefelsäure oder Eisen(III)chlorid angesäuert. Dadurch werden Ammoniumverbindungen direkt im Gärrest gebunden. Im Trocknungsprozess freierwerdendes Ammoniak reagiert mit der Schwefelsäure zu kristallinem Ammoniumsulfat, welches zusammen mit Staub aus dem Trocknungsprozess im Gewebefilter zurückgehalten und wieder dem Gärrest zugemischt wird.

Bei fünf Anlagen wurden Biofilter zur Abgasreinigung verwendet. Vier Anlagen kombinierten verschiedene Abgasreinigungen. Drei Anlagen verfügen über „sonstige“ Abgasreinigungen; darunter sind Umkehrosmose und Fotooxidation mit UV-C-Strahlung. Bei sechs Anlagen ist das Vorhandensein einer Abgasreinigung unbekannt. Zwölf Anlagen werden soweit bekannt komplett ohne Abgasreinigung betrieben. Darunter sind mit neun Anlagen auffällig viele Bandtrockner. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine Übersicht der in den 131 bayerischen Anlagen verwendeten/geplanten Abgasreinigungen. Details zur Funktionsweise werden in Kapitel 4 ausgeführt.

| Art der Abgasreinigung                         | Anzahl     |
|--|------------|
| Chemowäscher                                   | 58         |
| Brüdenwäscher                                  | 26         |
| Säureeindüsung in Trockner, Gewebefilter       | 11         |
| Ansäuerung Gärrest, Gewebefilter               | 6          |
| Biofilter                                      | 5          |
| Kombination aus verschiedenen Abgasreinigungen | 4          |
| Sonstige Abgasreinigungen                      | 3          |
| Keine Abgasreinigung                           | 12         |
| Nicht bekannt                                  | 6          |
| <b>Summe</b>                                   | <b>131</b> |

Tab. 1:  
Übersicht der in bayerischen Gärresttrocknern zum Einsatz kommenden Abgasreinigungen

### Durchsatz der Gärresttrocknungen

Von den 99 Gärresttrocknern im Betrieb sind bei 67 Anlagen Informationen über deren Gärrestdurchsatz bekannt. Bei diesen beträgt der durchschnittliche Gärrestdurchsatz rund 11.000 Tonnen pro Jahr. Der dokumentierte Maximaldurchsatz einer Anlage betrug 44.750 t/a, der Minimaldurchsatz lag bei 1.375 t/a.

Die Angaben beruhen auf den maximalen Durchsatzmengen aus den Genehmigungsbescheiden und teilweise auf Betreiberaussagen. Die tatsächliche Durchsatzmenge können daher auch von den oben genannten Zahlen abweichen.

### 3 Gärrestaufbereitungsverfahren

Die Trocknung der Gärreste erfolgt nach dem Prinzip der Konvektion durch Übertragung der Wärmeenergie auf das Trockengut durch den direkten Kontakt mit Heißluft, wie zum Beispiel Abgas oder durch Kontakttrocknung über beheizte Flächen. Bei der Gärresttrocknung wird, wie in Abb. 9 dargestellt, zwischen indirekt beheizter Trocknung und direkt beheizter Trocknung unterschieden. Da die thermische Trocknung sehr energieintensiv ist, wird der Gärresttrocknung häufig ein Separator zur mechanischen Entwässerung vorgeschaltet. Der Gärrest kann jedoch auch ohne Separation der Trocknung zugeführt werden.

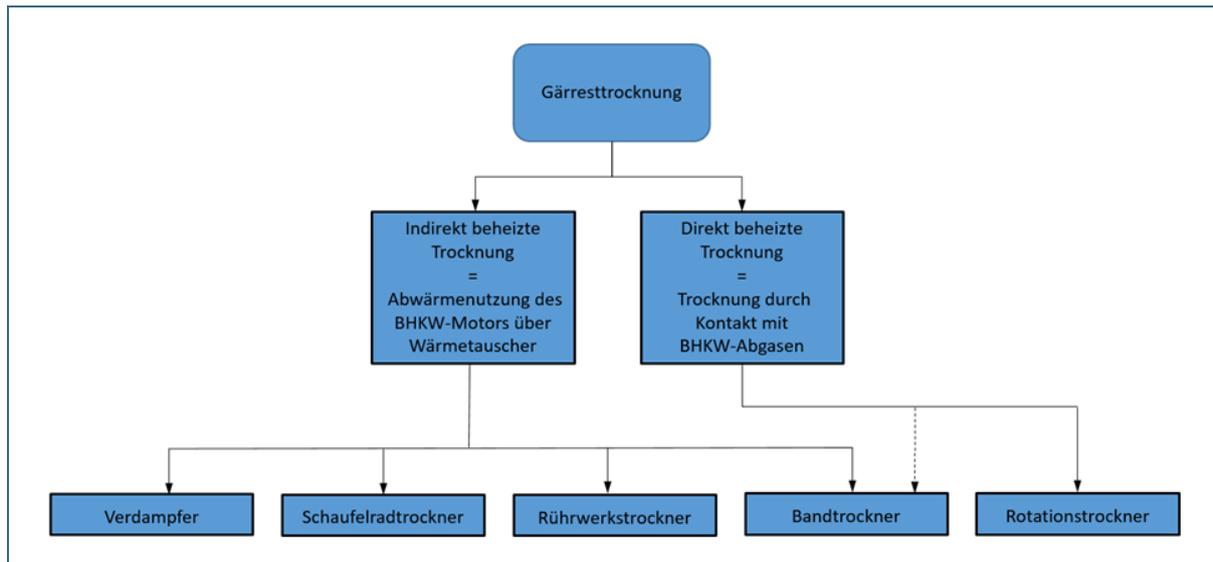


Abb. 9: Gärrestaufbereitungsverfahren

Beim indirekt beheizten Trocknungsverfahren wird die Abwärme des BHKW-Motors genutzt. Die Wärme aus dem Kühlkreislauf wird dazu über einen Wärmetauscher auf einen Luftstrom übertragen, mit dem der Gärrest getrocknet wird. Zu den indirekt beheizten Trocknungsverfahren zählen Vakuumverdampfer beziehungsweise Schaufelradrockner, Rührwerkstrockner und die meisten Bandrockner.

Bei der direkt beheizten Trocknung wird das BHKW-Abgas direkt und unter Beimengung von Frischluft auf den zu trocknenden Gärrest geführt. Diese Trockner werden daher auch als BHKW-Abgastrockner bezeichnet. Durch die hohen Temperaturen von rund 300 °C können deutlich geringere Trocknungszeiten als bei der indirekt beheizten Trocknung erreicht werden. Außerdem ist kein Wärmetauscher erforderlich, der mit Wärmeübertragungsverlusten verbunden ist. Jedoch kann durch die hohen Temperaturen das Brandrisiko steigen. Als Beispiel für die Nutzung der direkt beheizten Trocknung sind Rotationstrockner zu nennen.

Es gibt zwischenzeitlich auch neue Systeme, die zur Trocknung des Gärrestes eine Kombination aus indirekt und direkt beheizter Trocknung verwenden. Dabei wird die Frischluft zuerst mit einem Wärmetauscher vorgewärmt, bevor sie mit den BHKW-Abgasen vor Eintritt in die Trocknung gemischt wird. Eine strikte Zuordnung von Gärresttrocknern zu den verschiedenen Systemen ist daher nicht immer möglich.

### 3.1 Bandtrockner

Mit Bandtrocknern können je nach Ausführung die separierten Feststoffe des Gärrestes (siehe Abb. 10), der unseparierte Gärrest oder die separierte Flüssigphase (siehe Abb. 11) getrocknet werden.

Abb. 10 zeigt beispielhaft ein Bandtrocknersystem nach NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH (2018), bei dem ausschließlich die Trocknung der festen Phase des Gärrestes möglich ist. Diese wird über den Trocknereintrag auf dem Gewebeband verteilt. Frischluft wird mit BHKW-Abwärme über einen Wärmetauscher erwärmt und von oben nach unten durch die feste Phase und das Gewebeband gezogen. Das getrocknete Endprodukt wird mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von bis zu 90 % aus dem Trockner befördert. Weil nur rund 10 % des Gärrestes nach der Separation als Feststoff anfallen, ist diese Art der Trocknung häufig nur selten in Betrieb.

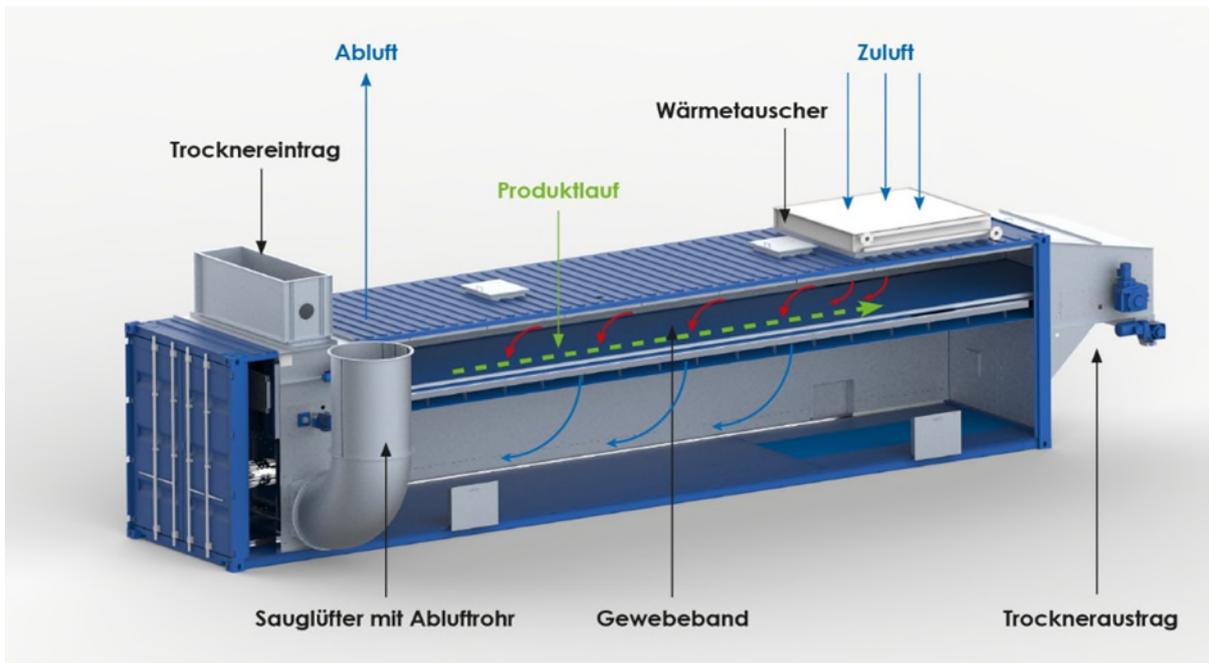


Abb. 10: Beispielanlage für die Aufbereitung von separiertem Feststoff nach NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH (2018)

Häufiger werden Bandtrocknungssysteme verwendet, die den unseparierten Gärrest oder die flüssige Phase trocknen (siehe Abb. 11). Dazu wird der unseparierte Gärrest (rund 5–9 % TS) vor dem Eintritt in den Trockner in einem Schneckenmischapparat mit einem Teilstrom des getrockneten Gärrestes (rund 85 % TS) gemischt. Die Mischung (rund 35 % TS) wird in der gewünschten Schüttdicke gleichmäßig über das gesamte Trockenband verteilt. Die Trocknung des Gärrestgemischs erfolgt durch den Kontakt mit erwärmter Luft. Hierzu wird Frischluft mit der BHKW-Abwärme durch einen Wärmetauscher vorgewärmt und von oben nach unten durch das Produkt und das Trockenband gezogen. Der Gärrest wird auf dem Trockenband kontinuierlich zur Austragsschnecke transportiert. Die Verweilzeit des Gärrestes im Trockner ist auf den gewünschten End-TS-Gehalt angepasst. Der getrocknete Gärrest wird der Lagerung zugeführt. Ein Teil des getrockneten Gärrestes (rund 85 % TS) wird über die Produktrückführung in den Rückmischcontainer gefördert und wieder mit dem flüssigen Gärrest gemischt. Die dabei entstehende Mischung mit rund 35 % TS wird anschließend erneut auf das Trockenband aufgebracht und getrocknet (NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH).

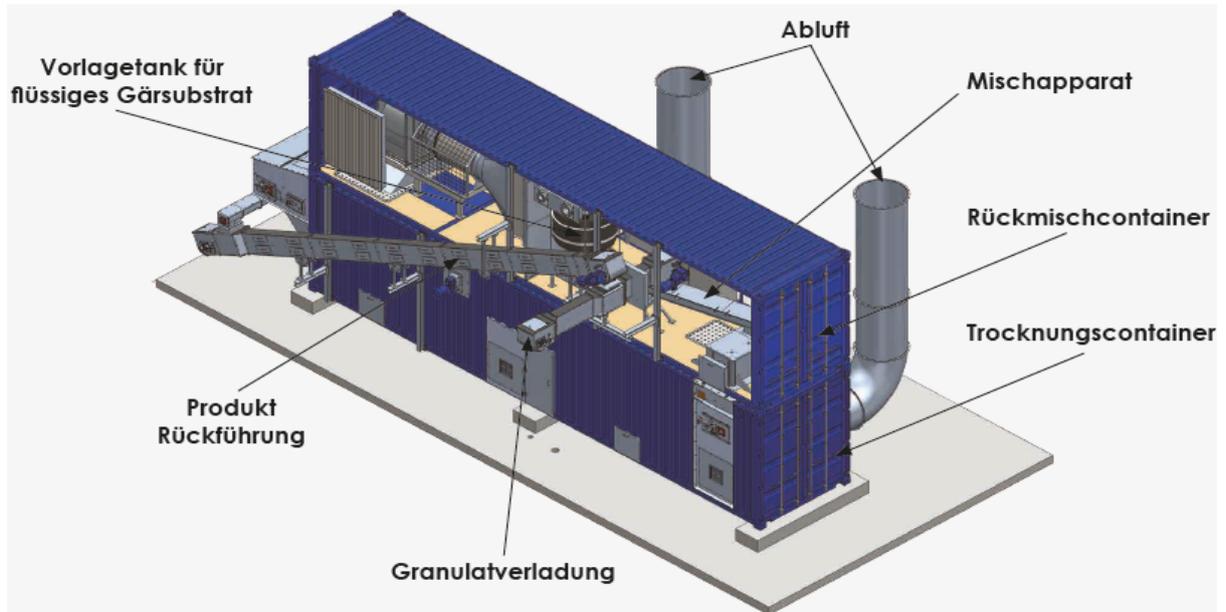


Abb. 11: Beispielanlage für die Aufbereitung von unsepariertem und flüssigem Gärrest nach *NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH*

Abb. 12 zeigt einen Bandrockner, in dem der Gärrest durch eine Kombination aus direkt und indirekt beheizter Trocknung aufbereitet wird. Dabei wird ein Teil der BHKW-Abgase über eine Klappensteuerung und Verdünnung durch vorgewärmte Frischluft auf die gewünschte Trocknungstemperatur gebracht.

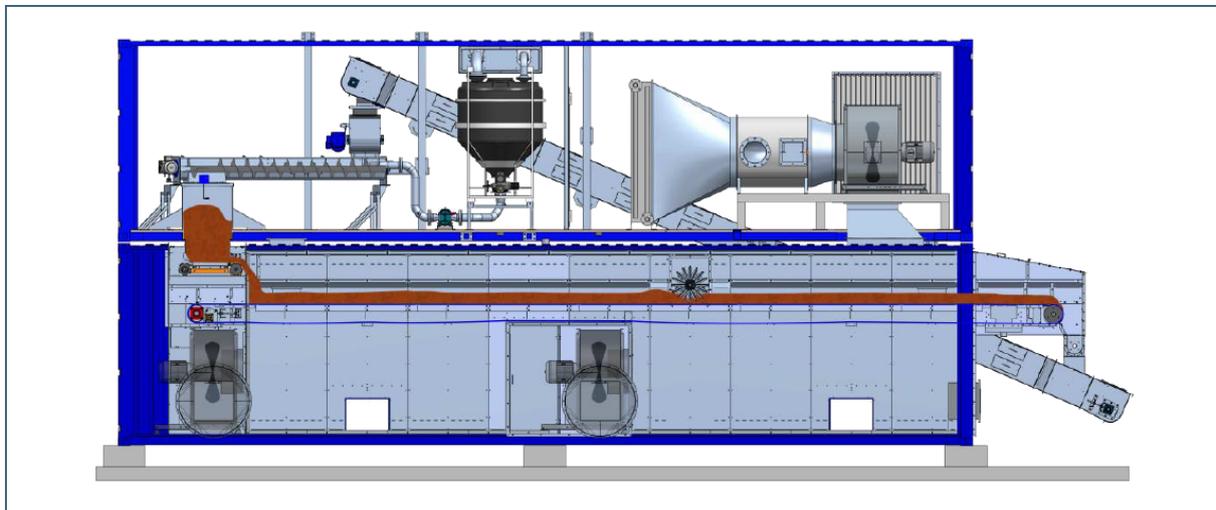


Abb. 12: Aufbau einer Kombination aus direkt und indirekt beheizter Trocknung nach *NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH*. Neben BHKW-Abgas wird auch vorgewärmte Frischluft zum Trocknen zugeführt.

## Emissionen

Um die feuchte Abluft (Brüden) der Bandtrocknungssysteme von Staub und Ammoniak zu befreien, wird diese aus dem Trockner gesaugt und einer Abgasreinigungsanlage zugeführt. In den meisten Fällen werden Chemowäscher nachgeschaltet, in denen freiwerdendes Ammoniak mit Schwefelsäure gebunden und Ammoniumsulfatlösung (ASL) gewonnen wird. Selten werden Biofilter zur Staub- und Ammoniakabscheidung benutzt. In Kapitel 4 wird die Funktionsweise der Abgasreinigungen genauer erläutert.

### 3.2 Schaufelradtrockner

Bei Schaufelradtrocknern wird flüssiger separierter Gärrest (4,5–6,5 % TS) auf rund 10–12 % TS eingedickt. Schaufelradtrocknern muss stets ein Separator vorgeschaltet werden.

Der flüssige Gärrest wird bis zu einem voreingestellten Füllstand in die Gärrestwanne des Trockners gepumpt. Durch den drehenden Rotor mit Schaufelblechen (auch „Mississippi-Rotor“ genannt) werden kontinuierlich Kontaktbleche in das Substrat eingetaucht. Diese führen einen Teil des flüssigen Gärrestes mit sich, welcher dann im erwärmten Luftstrom getrocknet wird. Dem Gärresttrockner ist ein auf die Abwärmemenge des BHKWs angepasster Wärmetauscher vorgeschaltet. Die Außenluft durchströmt mittels Ventilatoren den Wärmetauscher, wird erhitzt und durch den Gärresttrockner geführt. Dabei nimmt der erwärmte Luftstrom Feuchtigkeit des Gärrests auf und trocknet diesen auf einen eingestellten End-Trockensubstanzgehalt von rund 10–12 %. Der eingedickte Gärrest wird abgepumpt. Anschließend wird die Wanne wieder mit frischem, flüssigem separierten Gärrest befüllt und der Zyklus beginnt von neuem (*Josef Romberger Maschinenfabrik GmbH* und Meiners (2016)). Schaufelradtrockner werden damit chargenweise betrieben.

In den Abb. 13 und Abb. 14 sind der Aufbau eines Schaufelradtrockners sowie eine Beispielanlage mit zwei Gärrestwannen zu sehen.

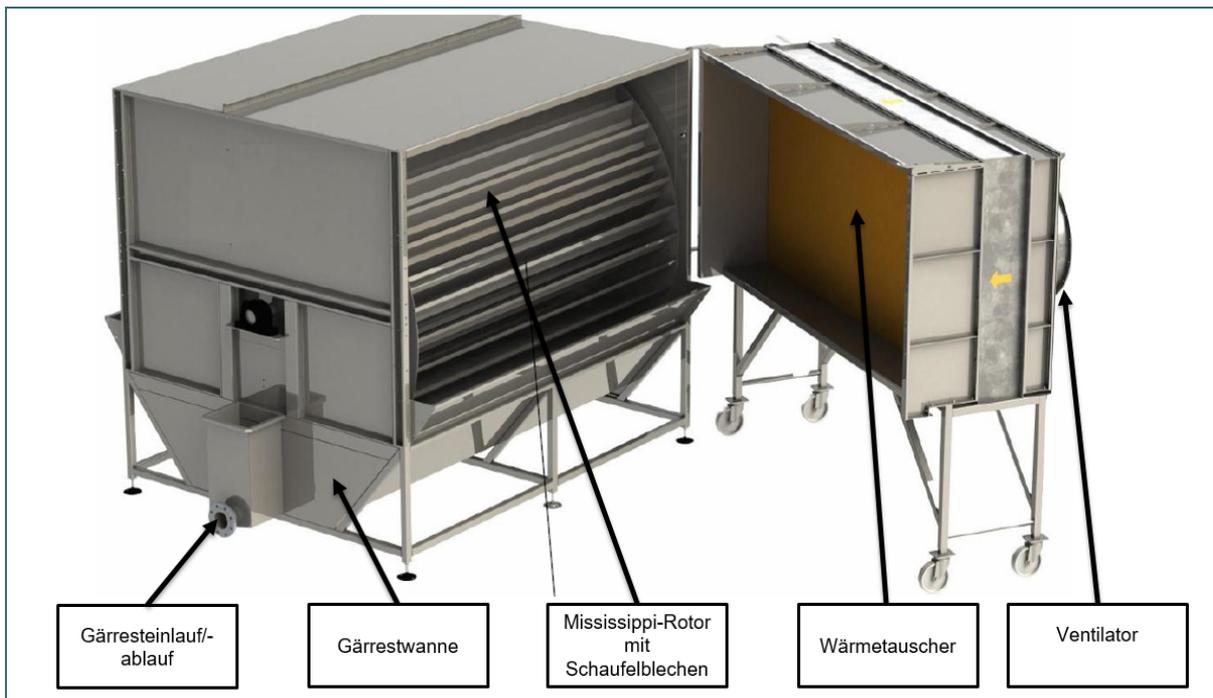


Abb. 13: Aufbau eines Schaufelradtrockners nach Meiners (2016)



Abb. 14: Beispielanlage eines Schaufelradrockners mit zwei Wannen nach *Einkammerer*

### Emissionen

Nach dem Trockner enthält der feuchte Luftstrom unter anderem Ammoniak, weshalb in der Regel eine saure Abgasreinigung (Chemowäscher) nachgeschaltet wird. Dabei wird der Mineraldünger ASL gewonnen. Das Funktionsprinzip von Chemowäschern wird in Kapitel 4 genauer erläutert.

### 3.3 Vakuumverdampfer

Die Abb. 15 zeigt einen Gärrestvakuumverdampfer. Bei Vakuumverdampfern muss ein Separator zur Abtrennung der festen Phase vorgeschaltet werden, da nur die flüssige Phase dem Prozess zugeführt werden kann.

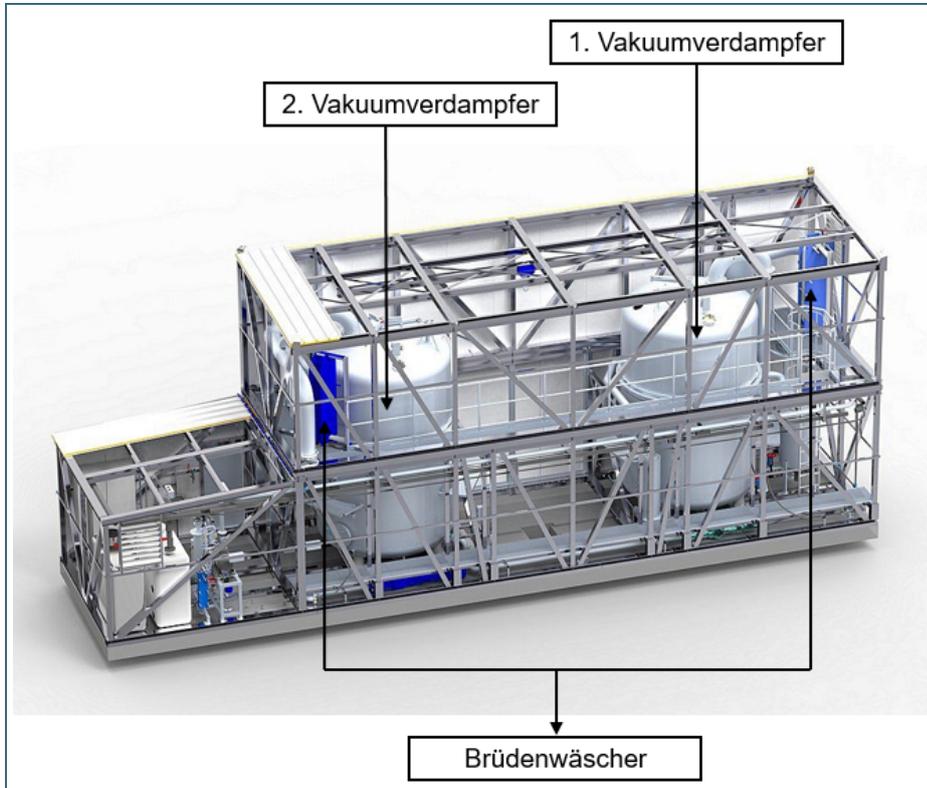


Abb. 15:  
Beispielanlage eines  
Vakuumverdampfers  
nach Biogastechnik  
Süd GmbH (2018)

In Vakuumverdampfern wird die flüssige Phase unter Unterdruck gesetzt. Dadurch wird der Siedepunkt des Gärrestes herabgesetzt. Trocknungstemperaturen um die 80 °C reichen daher aus, um einen Teil der flüssigen Phase zu verdampfen. Damit wird der Gärrest aufkonzentriert und der Trockensubstanzgehalt erhöht sich. Bei der Beispielanlage nach Biogastechnik Süd GmbH (2018) mit zwei Vakuumverdampfern wiederholt sich dieser Vorgang im nachgeschalteten zweiten Vakuumverdampfer. Dabei wird der Wärmeinhalt der erzeugten Gasphase durch deren Kondensation in Wärmetauschern zwischen dem ersten und zweiten Vakuumverdampfer zurückgewonnen. Die Kondensationswärme reicht aus, um den aufkonzentrierten Gärrest im zweiten Vakuumverdampfer bei noch niedrigerem Druck zu verdampfen. Im unteren Bereich der Vakuumverdampfer sammeln sich die aufkonzentrierten Gärreste. Im oberen Bereich entweichen der sogenannte Brüden. Im Brüden ist unter anderem der Großteil des Ammoniaks enthalten, weshalb der Brüden in einem Brüdenwäscher gereinigt werden muss. Dies geschieht unter Zugabe von Schwefelsäure. Der Brüdenwäscher fungiert damit als saurer Wäscher. Die dabei gewonnene ASL wird pH-Wert-gesteuert ausgeschleust und in einem separaten Behälter gelagert. Die gereinigte, feuchte Gasphase wird anschließend in Wärmetauschern kondensiert, zwischengelagert und als Kühlmedium verwendet.

Für die Verwendung beziehungsweise Entsorgung des überschüssigen Kondensats bestehen verschiedene Möglichkeiten. Ein Teil des Kondensats kann zu betrieblichen Zwecken, beispielsweise zum Reinigen von Betriebsflächen, genutzt werden. Je nach Zusammensetzung des Kondensats kann dieses im Fall einer wasserrechtlichen Genehmigung auch versickert oder in den Vorfluter eingeleitet werden. Wenn dies nicht möglich ist, kann das Kondensat über einen Nasskühlturm verdunstet werden.

Abb. 16 zeigt ein beispielhaftes Verfahrensschema eines typischen Vakuumverdampfers nach Biogastechnik Süd GmbH (2021).

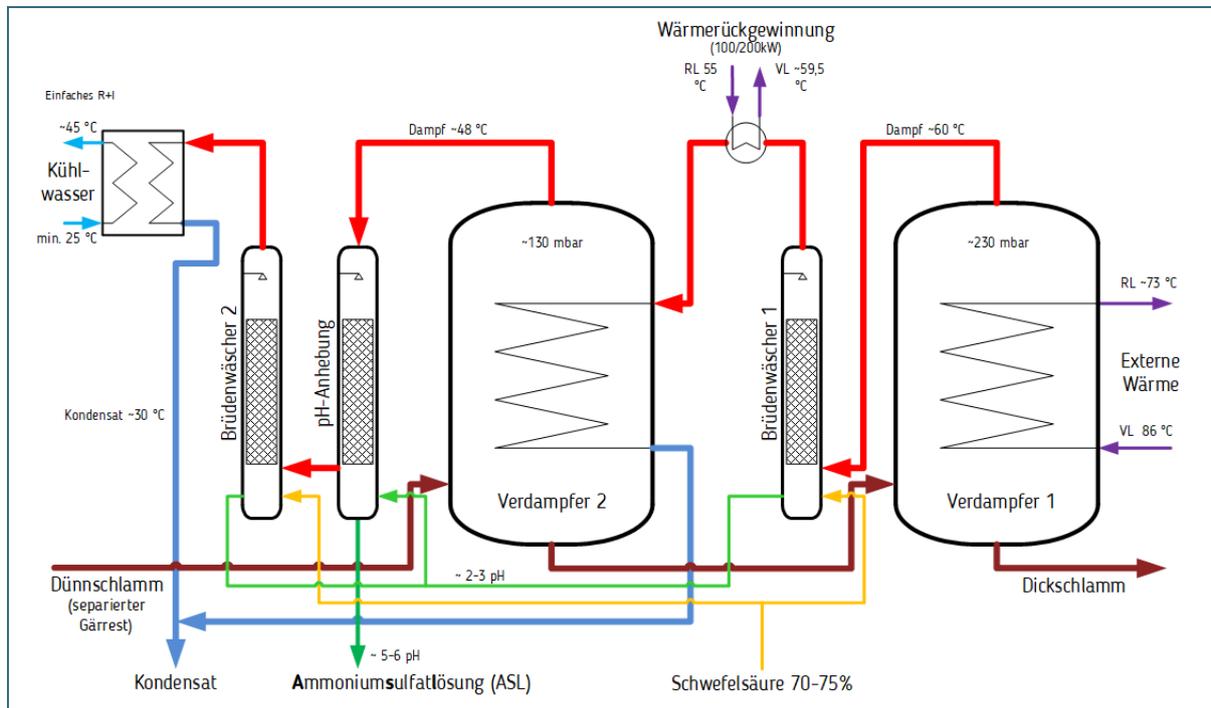


Abb. 16: Beispielhaftes Verfahrensschema eines zweistufigen Vakuumverdampfers nach Biogastechnik Süd GmbH (2021)

## Emissionen

Die Vakuumpumpe, die den für den Prozess notwendigen Unterdruck erzeugt, ist üblicherweise druckseitig an den Gasraum der Biogasanlage angeschlossen. Die verdrängte Luft aus der Vakuumpumpe wird dem Fermenter zugeführt, wodurch es praktisch zu keinen Emissionen über den Luftpfad kommt. Unter Umständen kann sich durch die Zufuhr der Vakuumpumpenabluft der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas erhöhen. Die eingedickte Flüssigphase des Gärrestes (Dickschlamm) wird nach dem letzten Vakuumverdampfer aus dem Prozess ausgeschleust und kann wieder dem Gärrestlager zugeführt werden. Anfallendes Prozesswasser (Kondensat) wird häufig über eine Kaltvernebelung emittiert.

### 3.3.1 Vakuumverdampfer zur Herstellung von konzentriertem Ammoniakwasser

Während bei den meisten Gärresttrocknungsanlagen Ammoniak mit Schwefelsäure gebunden wird, wird bei diesem Verfahren vor allem konzentriertes Ammoniakwasser gewonnen. Das erzeugte Ammoniakwasser kann durch anderweitige Verwendung dem landwirtschaftlichen Stickstoffkreislauf entzogen werden. Im Rahmen des Projekts wurde eine Anlage mit dieser Aufbereitungstechnik im Genehmigungsverfahren begleitet.

### Beschreibung eines Verfahrens nach agriKomp GmbH (2021)

In der Vakuumverdampfungsanlage wird die flüssige separierte Phase durch die Abwärme eines BHKW-Motors erhitzt und so Ammoniak gezielt ausgetrieben. Die Trocknung von 11.040 t/a der flüssigen separierten Phase erfolgt über drei Verdampferstufen. Die Verweilzeit des flüssigen separierten Gärrestes in der Anlage beträgt rund 4 h. Zur Vermeidung von Betriebsproblemen durch Schaumbildung wird während des Verdampfungsprozesses ein biologisch abbaubarer Entschäumer zugegeben. Die flüssige Phase wird in die **erste Verdampferstufe** geleitet und dort bei einem Unterdruck von

0,1 bar auf rund 45 °C erwärmt. Der Ammoniumstickstoff wird aufgrund des temperatur- und druckabhängigen Phasengleichgewichts als Ammoniak freigesetzt. Der Dampf entweicht aus der Siedekammer, kondensiert anschließend und wird als Ammoniakwasser (rund 6–8 % NH<sub>3</sub>-N) einer Rektifikationskolonne zugeführt. In der Rektifikationskolonne wird Ammoniak auf bis zu 25 % aufkonzentriert. Das Ammoniakwasser kann anschließend vermarktet oder landwirtschaftlich genutzt werden. Nach Aussage des Herstellers soll weiter untersucht werden, ob das Ammoniakwasser eventuell in SCR-Katalysatoren von Motoranlagen als Reduktionsmittel eingesetzt werden kann.

Die leicht eingedickte flüssige Phase der ersten Stufe wird in die **zweite Verdampferstufe** geführt, in der ein Unterdruck von 0,1 bar und eine Temperatur von rund 60 °C herrschen. Das verdampfende Wasser-Ammoniak-Gemisch wird in den Neutralisationstank geleitet. In diesem wird das Kondensat pH-Wert-gesteuert (pH-Wert zwischen 4 und 5) mit Schwefelsäure (76 %ig) gemischt. Dabei entsteht eine stark verdünnte Ammoniumsulfatlösung. Zur Zwischenspeicherung wird die entstandene Kondensat in den Kondensattank gepumpt. Anschließend wird es zur Reinigung einer Umkehrosmose zugeführt. Der Rückstand aus dem Vakuumverdampfer 2 wird in einem Zwischentank gelagert, bevor der dritte Vakuumverdampfer mit dem Rückstand beschickt wird.

Im **dritten Vakuumverdampfer** wird der Rückstand aus der zweiten Verdampferstufe bei Temperaturen von rund 75 °C auf einen TS-Gehalt von 13,2 % aufkonzentriert (Dickschlamm). Da der Rückstand mindestens eine Stunde bei Temperaturen über 70 °C in der letzten Verdampferstufe verweilt, werden Hygienevorgaben eingehalten. Durch die fraktionierte Verdampfung liegen im entstehenden Kondensat der dritten Stufe nahezu keine Stickstoffverbindungen mehr vor. Je nach verbleibender Schadstoffkonzentration wird das Kondensat dem Permeattank oder der Umkehrosmose zugeführt.

Zur Direktzuführung in den Permeattank müssen die im Bescheid festgehaltenen Werte von kleiner 100 mg CSB/l, kleiner 50 mg BSB<sub>5</sub>/l und kleiner 20 mg N<sub>ges</sub>/l eingehalten werden (Leitwertmessung). Die eingedickte flüssige Phase (Dickschlamm) wird ins Gärrestlager gepumpt. Abb. 17 zeigt die drei Verdampferstufen. Der Substratfluss verläuft von rechts nach links.



Abb. 17: AgriFer Plus-Vakuumverdampfer zur Herstellung von konzentriertem Ammoniakwasser nach Buchta

Die Umkehrosmose ist ein Verfahren der Membrantechnik zur Reinigung von Flüssigkeiten beziehungsweise zur Aufkonzentrierung von in Flüssigkeiten gelösten Stoffen, bei dem durch Anlegen eines Druckes der natürliche Osmose-Prozess umgekehrt wird und dadurch ein sauberes Permeat (Wasser mit Einleitqualität) und ein Retentat (Konzentrat) entstehen sollen. Im Normalbetrieb werden der Umkehrosmose nur das Kondensat aus der zweiten Verdampferstufe sowie das Prozesswasser aus der Rektifikation zugeführt. Sobald das Kondensat aus der dritten Verdampferstufe einen zu hohen Ammoniumstickstoffgehalt (Leitfähigkeitsmessung) aufweist, muss es zusätzlich über die Umkehrosmoseanlage geführt werden. Bevor die Stoffströme in der Umkehrosmose gereinigt werden, müssen sie im Neutralisationstank pH-Wert-gesteuert mit Schwefelsäure aus einem separaten Tank vermischt und anschließend im Kondensattank zwischengelagert werden.

Aus fachlicher Sicht sollte das ammoniumsulfathaltige Retentat dem Dickschlamm im Endlager nicht beigemischt werden, da es durch den zusätzlichen Schwefeleintrag zur vermehrten Bildung von Schwefelwasserstoff kommen würde. Stattdessen sollte das Retentat einem separaten Lagertank zugeführt werden. Das Permeat wird bis zur Verwertung oder Vernebelung in einem separaten Behälter gelagert. In der Kaltvernebelung wird gereinigtes Wasser über mehrere Vernebelungsdüsen und ein integriertes Gebläse als feiner Nebel an die Atmosphäre abgegeben. Der Input zur Kaltvernebelung ist frei von Feststoffen. Die maximale Endkonzentration von kleiner 20 mg Gesamtstickstoff/l wird im Ablauf der Umkehrosmose durch einen Leitwertsensor kontinuierlich online überwacht. Die zugeführte Wärme wird nach der Nutzung im Prozess über einen Kühlturm an die Umwelt abgegeben.

### Emissionen

Da das Verfahren nahezu im geschlossenen System abläuft, sind nur geringe Emissionsmassenströme zu erwarten. Emissionen entstehen über die verdrängte Luft der Vakuumpumpen mit einem geschätzten Volumenstrom von 40 m<sup>3</sup>/h, die in diesem Fall über einer Ableithöhe von 10 m über Erdgleiche abgeleitet werden. Um Schadstoffemissionen bei der Einstellung des Unterdrucks durch die Vakuumpumpen weitgehend zu vermeiden, wird das Abgas zur Reinigung über einen Aktivkohlefilter (imprägniert mit Schwefelsäure zur Ammoniakabscheidung und Eisenoxid zur Schwefelwasserstoffabscheidung) geleitet.

Bei Vakuumverdampfern kritisch zu sehen ist die häufig vorgesehene Vernebelung von im Prozess anfallendem Kondensat, da dies nicht nur aus energetischen Gesichtspunkten keine nachhaltige Nutzung darstellt. Gegebenenfalls muss bei der Vernebelung mit Nebelbildung als Belästigung für die Nachbarschaft oder Eis- beziehungsweise Schneebildung im Winter auf naheliegenden Straßen gerechnet werden. Grundsätzlich sollte geklärt werden, unter welchen Umständen eine Einleitung in den Vorfluter möglich ist. Favorisiert werden sollte nach Möglichkeit die Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen zu Bewässerungszwecken. Die Rahmenbedingungen für die Ausbringung müssen mit den betroffenen Behörden im Einzelfall abgestimmt werden.

## 3.4 BHKW-Abgastrockner (Rotationstrocker)

BHKW-Abgastrockner sind direkt beheizte Trockner, da das Abgas des BHKW gemischt mit Frischluft direkt zum Trocknen des Gärrestes genutzt wird. Sie sind meistens als Rotationstrocker ausgeführt. Vereinzelt werden indirekt beheizte Bandtrocker auch in Kombination mit Abgastrocknung ausgeführt. Diese Systeme sind entsprechend in Kapitel 3.1 aufgeführt.

Beim Verfahren der Rotationstrockerung zum Beispiel nach *jumbo group smart dry GmbH* wird der unseparierte Gärrest aus dem Endlager zunächst in einen Vorlagebehälter gepumpt. Vor dem Eintritt in den Rotationstrocker wird der Gärrest mit einem Teil des bereits getrockneten Endprodukts (rund

85 % TS) in einer Mischschnecke auf einen TS-Gehalt von rund 30 % gemischt und dort mit Schwefelsäure angesäuert. Über eine Eintragsschnecke wird das Gemisch der ersten Trocknungskammer des Trockners zugeführt. Das Gärrestgemisch wird im Trockner durch rotierende Wurfwellen verwirbelt. Dem Trockner wird eine Mischung aus BHKW-Abgas und Frischluft mit einer Temperatur von rund 300 °C zugeführt. Im Trockner wird nach Angabe des Herstellers durch die Zugabe von Schwefelsäure Ammoniumsulfat gebildet. Das kristalline, feste Ammoniumsulfat wird zusammen mit dem Staub in den Filterkammern des nachfolgenden Gewebefilters abgeschieden. Der Filterstaub wird dem getrockneten Gärrest zugegeben und gemeinsam über eine Schnecke aus dem Trockner der Pelletierung zugeführt. Die erzeugten Pellets können dann in BigBags bis zur Ausbringung gelagert werden. Abb. 18 zeigt eine Beispielanlage eines Rotationstrockners.



Abb. 18: Beispielanlage Rotationstrockner nach *jumbo group smart dry GmbH*

### Emissionen

Bei BHKW-Abgastrocknern entstehen hauptsächlich Ammoniak- und Staubemissionen. Zur Abgasreinigung wird der Gärrest vor dem Eintrag in die Trocknungskammer mit Schwefelsäure angesäuert. Schwefelsäure und Ammoniak reagieren zu kristallinem Ammoniumsulfat. Staub und Ammoniumsulfat werden in Gewebefiltern zurückgehalten und den Gärresten wieder zugeführt. Die Filterschläuche bestehen aus Nadelfilzgewebe und werden in regelmäßigen Zeitabständen vom anhaftenden Filterkuchen durch Abrütteln befreit. In den Kapiteln 4 und 6.4 findet eine genauere Betrachtung der Emissionen bei BHKW-Abgastrocknern statt.

### 3.5 Rührwerkstrockner

Bei Rührwerkstrocknern kann der unseparierte Gärrest unter Nutzung der verfügbaren Motorabwärme von einem TS-Gehalt von rund 6 % auf bis zu rund 85 % aufkonzentriert werden. Dabei erfolgt die Wärmezufuhr über einen Wärmetauscher. Im Rührwerkstrockner (Trocknungstemperatur rund 75 °C) wird der zu trocknende Gärrest über eine Pumpe schubweise in den Trocknungsbehälter befördert und mittels zweier horizontaler Rührwerke mit trockenem Gärrest im Volumenverhältnis von rund 1 : 2,5 vermischt. Gesteuert wird der gesamte Vorgang über eine Waage und Kontrollsensoren. Sobald die eingestellte Restfeuchte (zwischen 15 und 25 %) erreicht ist, wird das Trockengut bis auf eine Mindestfüllmenge über ein Schneckensystem ausgetragen. Der getrocknete Gärrest wird über eine Austragsförderschnecke und eine Transportschnecke in das Lager gefördert. Anschließend besteht die Möglichkeit, den getrockneten Gärrest einem Pelletierer zuzuführen. Zur Abgasreinigung wird bei diesem Anlagentyp Schwefelsäure direkt in den Trockner eingedüst. Dadurch wird Ammonium im Feststoff gebunden. In einem nachgeschalteten Gewebefilter werden Staub und Ammoniumsulfat zurückgehalten. Abb. 19 und Abb. 20 zeigen ein Schnittbild sowie ein Fließbild eines Rührwerkstrockners nach RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH (2021).

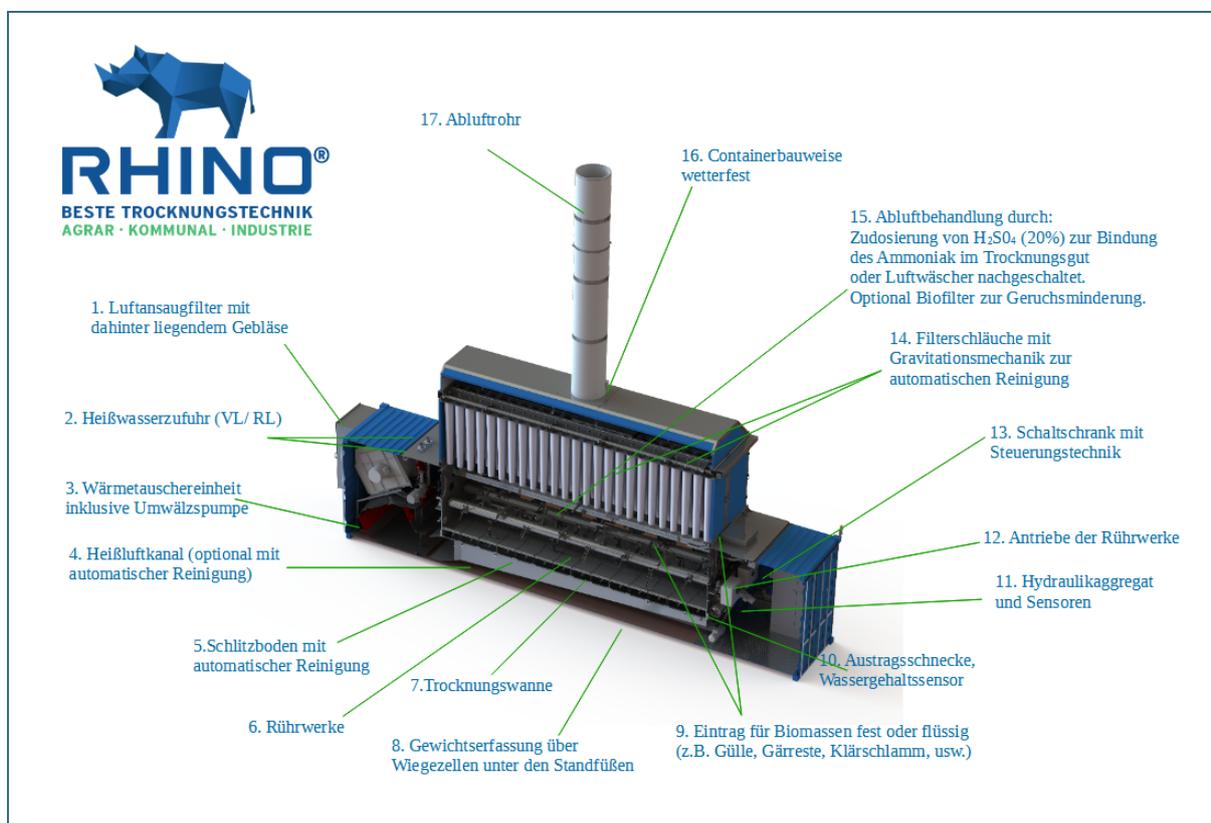


Abb. 19: Schnittbild eines Rührwerkstrockners mit Beschriftung der einzelnen Komponenten nach RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH

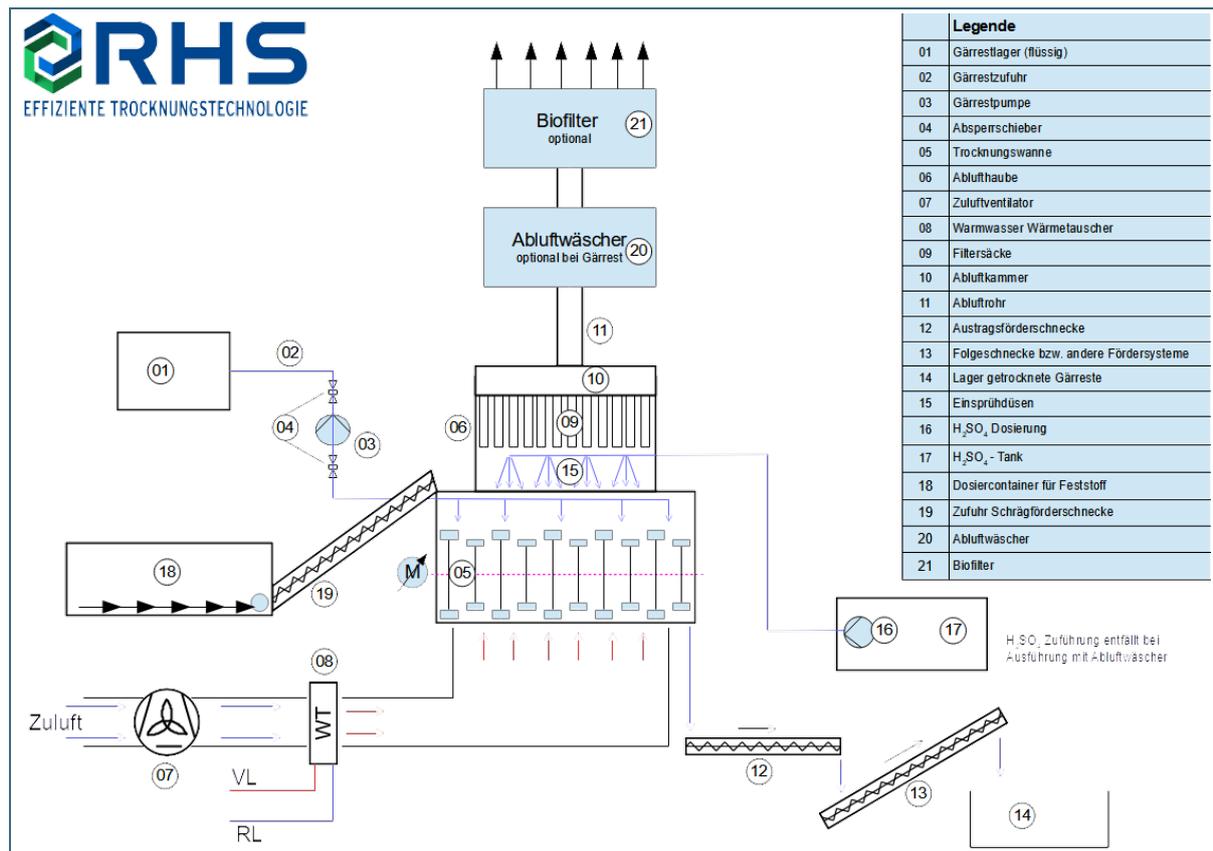


Abb. 20: Fließbild eines Rührwerkstrockners mit Beschriftung der einzelnen Komponenten nach *RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH*

### Emissionen

Das feuchte, mit Ammoniak beladene Abgas wird über einen Düsenstrang in der Trocknungskammer mit 20 %iger Schwefelsäurelösung berieselt. Dabei verbindet sich flüchtiges Ammoniak größtenteils mit Schwefelsäure zu kristallinem Ammoniumsulfat, welches sich an den festen Gärrestbestandteilen anlagert. Anschließend wird das Abgas über eine Staubfilteranlage gereinigt. Die Abreinigung der Filterschläuche erfolgt durch Druckluftstöße beziehungsweise mechanisch durch Rütteln. Der Filterkuchen wird mit dem getrockneten Gärrest ausgetragen und das gereinigte Abgas über einen Kamin an die Atmosphäre abgegeben.

### 3.6 Weitere Verfahren zur Aufbereitung von Gärresten

In der Literatur finden sich noch eine Vielzahl von weiteren Aufbereitungsverfahren. Diese haben sich in der Bestandsabfrage (siehe Kapitel 2) aber als nicht oder noch nicht praxisrelevant herausgestellt. Bislang gibt es zumindest in Bayern solche Anlagen in der Praxis nur vereinzelt. Einige Beispiele werden nachfolgend genannt.

Solare Trockner beziehungsweise solar unterstützte Trockner sind vor allem im Bereich der Klärschlamm-trocknung am Markt etabliert. Dabei wird das Trockengut in einer gewächshausähnlichen Halle ausgebreitet und mittels Sonnenenergie und gegebenenfalls auch einer Fußbodenheizung oder vorgewärmter Luft getrocknet. Mischen, Wenden und Belüften geschehen nach Döhler et al. (2021) meist mit einem selbstfahrenden Aggregat. Zum Trocknen von Gärresten werden in Bayern aktuell zwei solche Trockner eingesetzt.

Aktuell gibt es Entwicklungen, die auf die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern zu Humus abzielen. Nach WITTERRA GmbH (2021) werden hierbei flüssige Gärreste täglich in ein Aufbereitungsbecken mit Trägermaterial eingetragen. Das gesamte Materialbett soll täglich belüftet und durchmischt werden, um Mikroorganismen mit ausreichend Sauerstoff und Nährstoffen für die Humusbildung zu versorgen. Im Materialbett sind Temperaturen bis zu 70 °C bei einem pH-Wert zwischen 7 und 8 vorgesehen, weswegen bei einer offenen Bauweise ohne Abgasreinigung erhebliche Ammoniakemissionen und gegebenenfalls Gerüche zu erwarten sind. Geeignete Maßnahmen zur Erfassung und Behandlung der Abgase sind notwendig.

In der Literatur, beispielsweise in Döhler et al. (2021), finden sich weitere Aufbereitungsverfahren. Diese zielen meist darauf ab, möglichst viele Nährstoffe aus dem Gärrest zurückzugewinnen. Da diese Aufbereitungsverfahren in der Praxis bislang eine eher untergeordnete Rolle spielen, werden sie im Folgenden lediglich nicht abschließend aufgezählt:

- Phosphatfällung
- Ammoniakstrippung
- Membranverfahren
- Flockung
- Flotation
- Pyrolyse
- Verbrennung

Weitergehende Erläuterungen sind beispielsweise in Döhler et al. (2021) zu finden.

## 4 Abgasreinigung bei Gärresttrocknern

Bei der Gärresttrocknung können verschiedene Luftschadstoffe freigesetzt werden, weshalb eine Behandlung des Abgases erforderlich ist. Relevant sind vor allem Ammoniakemissionen, aber auch Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff und gegebenenfalls Gerüche. Die Ausführung der Abgasreinigung muss auf die Art der Trocknungsverfahren der Gärreste abgestimmt sein.

Die häufigste Art der Abgasreinigung sind saure Wäscher, auch Chemowäscher genannt. Diese werden vorwiegend bei **Bandtrocknern und Schaufelradtrocknern** eingesetzt, um die Ammoniakemissionen zu reduzieren. Es handelt sich dabei meist um ein- oder mehrstufige Rieselbettwäscher, bei denen Schwefelsäure dem Washwasser zugegeben wird. Das Abgas durchströmt einen Füllkörper, der mit dem Washwasser berieselt wird. Dabei reagiert Ammoniak aus dem Abgas mit Schwefelsäure im Washwasser zu Ammoniumsulfat. Dabei entsteht eine Ammoniumsulfatlösung (ASL).



Nach den Füllkörpern und vor der Ableitung über einen Kamin befindet sich ein Tropfenabscheider, der den Austrag von mit Schadstoffen belasteten Tröpfchen im feuchten Abgas reduziert. Die Regelung der Schwefelsäurezudosierung ins Washwasser erfolgt über den pH-Wert, der in der Regel bei pH kleiner 4 liegt. Das mit Ammoniumsulfat beladene Washwasser muss regelmäßig abgeschlammmt werden, wenn die Ammoniumsulfatkonzentration einen bestimmten Wert erreicht. Die Regelung der Abschlämmrate erfolgt über eine Leitfähigkeitsmessung. Der Abschlämmvorgang dauert nur wenige Minuten. Während dieser Zeit ist der pH-Wert neutral (7).

Insgesamt werden mittels Chemowäscher zuverlässig Emissionsminderungsgrade für Ammoniak von mehr als 90 % erreicht. Gleichzeitig werden Staub, Gesamt-C und Geruchsemissionen soweit gemindert, dass die Vorgaben der TA Luft 2021 eingehalten werden können.

Abb. 21 zeigen den Aufbau und Komponenten eines typischen Chemowäschers.

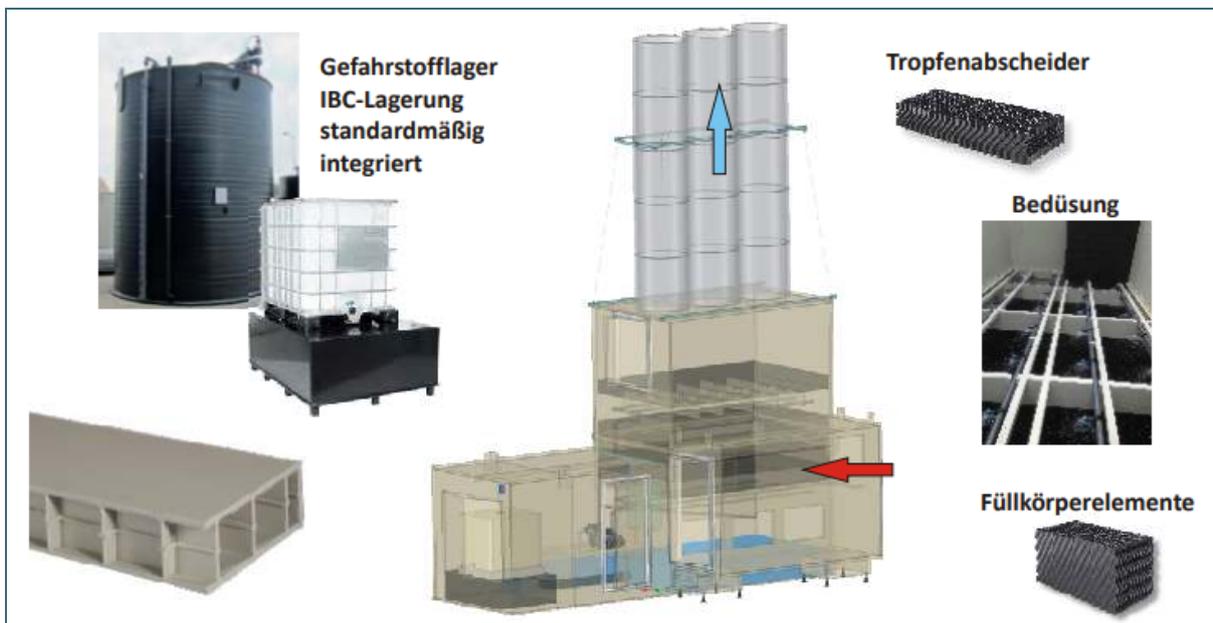


Abb. 21: Aufbau eines Chemowäschers mit Einzelkomponenten nach Schönhammer Wärmetauscher und Lüftungstechnik GmbH (2018)  
links: Schwefelsäurelagerung in IBC-Tanks, Querschnitt Container-Gehäuse; Mitte: Gesamtansicht; rechts: Tropfenabscheider, Bedüsung mit verdünnter Schwefelsäure, Füllkörperelemente

Grundsätzlich kann die erforderliche Menge an Schwefelsäure überschlägig mit folgender Formel (2) abgeschätzt werden:

$$\text{Säuremenge} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{a}} \right] = \text{Gärrestdurchsatz} \left[ \frac{\text{t}}{\text{a}} \right] \cdot \text{Ammoniumgehalt} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \cdot \frac{288}{\text{Säurekonzentration} [\%]} \quad (2)$$

Sofern der Ammoniumgehalt im Gärrest nicht bekannt ist, kann dieser auf der Grundlage vorliegender Gärrestanalysen zu rund 2,4 kg/t angenommen werden. Die in der Formel genannte Zahl 288 leitet sich aus den molaren Massen in Kombination mit der stöchiometrischen Reaktionsgleichung (1) ab.

**Vakuumverdampfer** weisen die Besonderheit auf, dass die saure Abgasreinigung üblicherweise in die Anlage integriert ist. Die bei der Verdampfung entstehenden Brüden enthalten einen Großteil des flüchtigen Ammoniaks aus dem Gärrest. Die Brüden werden in diesem Fall einem Brüdenwäscher zugeführt, dem, vergleichbar den Chemowäschern, pH-Wert-gesteuert Schwefelsäure zugegeben wird. Dabei entsteht ebenfalls Ammoniumsulfatlösung (ASL). Die ASL wird ausgeschleust und wird üblicherweise separat gelagert. Ein beispielhaftes Verfahrensschema ist in Kapitel 3.3 in Abb. 16 dargestellt.

Bei **Trocknern mit direkter Trocknung durch BHKW-Abgase (BHKW-Abgastrockner)** erfolgt üblicherweise eine Ansäuerung des Gärrestes mit Schwefelsäure. Dadurch verschiebt sich das Dissoziationsgleichgewicht von Ammoniak hin zu Ammonium. Das sich bildende Ammoniumsulfat verbleibt im Gärrest. Zur Entstaubung des Trockners werden Gewebefilter eingesetzt. Im Gewebefilter wird Ammoniumsulfat zusammen mit Staub in den Filterkammern abgeschieden. Die Filterschläuche bestehen aus Nadelfilzgewebe und werden in regelmäßigen Zeitabständen vom anhaftenden Filterkuchen durch Druckluftstöße oder Abrütteln befreit. Der Filterstaub wird dem getrockneten Gärrest beigegeben.

Bei **Rührwerkstrocknern** wird vor dem Gewebefilter Säure an geeigneter Stelle in die Trocknungsluft eingedüst. Dabei verbindet sich flüchtiges Ammoniak größtenteils mit Schwefelsäure zu Ammoniumsulfat, welches in der Staubfilteranlage zurückgehalten wird. Die Abreinigung der Filterschläuche erfolgt durch Druckluftstöße beziehungsweise mechanisch durch Rütteln. Der Filterkuchen wird mit dem getrockneten Gärrest ausgetragen. Das gereinigte Abgas wird über einen Kamin an die Atmosphäre abgeleitet.

### Biofilter

**Biofilter** sind grundsätzlich gut geeignet zur Emissionsreduzierung von organischen Geruchsstoffen. Sie sind jedoch nur bedingt geeignet zur Reduktion von Ammoniakemissionen. Biofilter werden daher in Gärrestrocknern nur selten als alleinige Abgasreinigungseinrichtung eingesetzt. Geeignet ist laut Richtlinie VDI 3477 Biologische Abluftreinigung (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2016)) ein vorgeschalteter saurer Wäscher zur Ammoniakabscheidung. Ammoniak, aber auch Schwefelwasserstoff, können gemäß der Richtlinie VDI 3477 im Biofilter erhebliche Probleme durch das Entstehen saurer Reaktionsprodukte verursachen. Die dadurch verursachte pH-Wert-Absenkung im Filtermaterial kann zu einer stetigen Abnahme der Reinigungsleistung führen. Abhilfe schaffen laut VDI Richtlinie Wäscher oder Absorber, die dem Biofilter vorgeschaltet werden. Sie haben die Aufgabe, Ammoniak- und H<sub>2</sub>S-Gehalt auf jeweils weniger als 5 mg/m<sup>3</sup> zu reduzieren.

In Einzelfällen werden in Gärrestrocknern auch spezielle Reinigungstechnologien eingesetzt. Betrieben werden Umkehrosmose und Fotooxidation mit UV-C-Strahlung erfasst worden. Sofern die Nährstoffrückgewinnung im Fokus der Gärrestaubbereitung steht, sind aus der Literatur beispielsweise auch Fällung, Strippung und weitere Verfahren bekannt (zum Beispiel in Döhler et al. (2021)). Da hierauf nicht der Fokus dieses Berichts liegt, wird bezüglich genauerer Beschreibungen auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

## 5 Emissionen von Gärresttrocknungsanlagen

### 5.1 Emissionen und Emissionsbegrenzungen

#### Ammoniak

**Ammoniak** ist aus umweltfachlicher Sicht der relevanteste Luftschadstoff unter den Emissionen aus Gärresttrocknern. Gärreste enthalten typischerweise etwa 2,4 kg/t OS Ammonium. Ammonium und Ammoniak bilden ein Dissoziationsgleichgewicht, das abhängig von pH-Wert und Temperatur ist. Gärreste sind leicht alkalisch mit einem pH-Wert zwischen 8 und 9. In Gärresttrocknern liegen typischerweise Temperaturen zwischen 70 und 100 °C vor. Wie der nachfolgenden Abb. 22 zu entnehmen ist, verschiebt sich unter diesen Bedingungen im Trockner das Gleichgewicht vom im Gärrest enthaltenen Ammonium hin zu Ammoniak. Da Ammoniak leicht flüchtig ist, wird es ohne Abgasreinigungsmaßnahmen größtenteils emittiert. Unter der Annahme, dass unter den Bedingungen der Gärresttrocknung rund 90 % des Ammoniumstickstoffs als Ammoniak vorliegt, wäre bei einem typischen Anlagendurchsatz von etwa 10.000 Tonnen Gärrest pro Jahr überschlägig mit etwa 20 t/a an Ammoniakemissionen zu rechnen. Eine effektive Begrenzung und Minderung der Ammoniakemissionen sind daher unerlässlich.

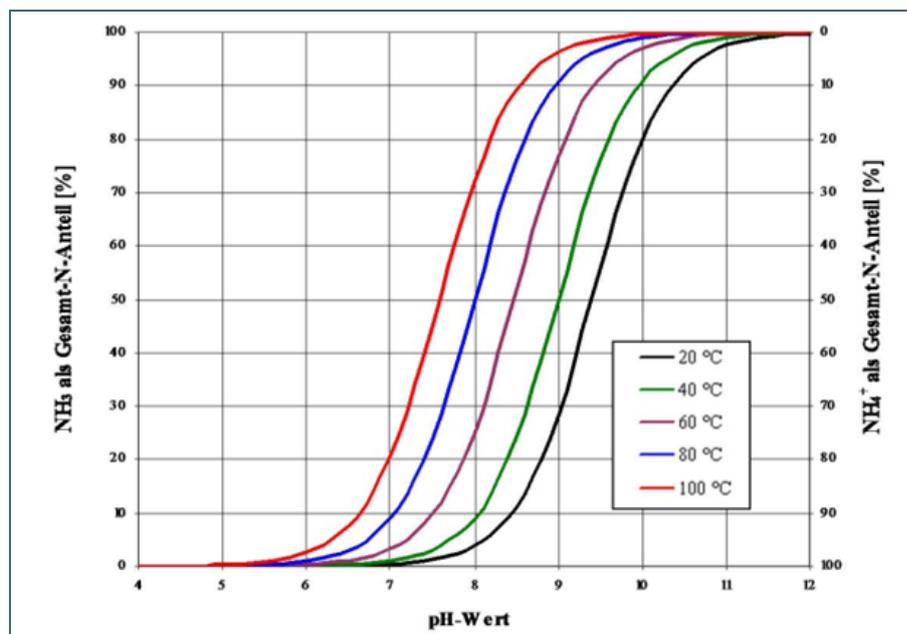


Abb. 22:  
Dissoziationsgleichgewicht Ammoniak/Ammonium in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur nach Wetter et al. (2008)

Die TA Luft 2002 enthielt im speziellen Teil (Nummer 5.4) noch keine Ammoniakemissionswert für Gärresttrocknungsanlagen. Würde der Emissionswert des allgemeinen Teils (Nummer 5.2.4) der TA Luft 2002 von 30 mg/m<sup>3</sup> herangezogen, würde das aufgrund der erheblichen Verdünnung des Abgases durch die zugeführte Trocknungsluft zu keiner wirksamen Emissionsminderung führen. Mit der TA Luft 2021 wurden deshalb unter Berücksichtigung der Erfahrungen dieses Projektes in der Nummer 5.4.1.15 Anforderungen zur Begrenzung der Ammoniakemissionen an Gärresttrockner wie folgt eingeführt:

Abgase aus der Trocknung von Gärresten sind einem sauren Wäscher oder einer gleichwertigen Abgasreinigungseinrichtung zur Entfernung von Ammoniak zuzuführen. Die Emissionen an Ammoniak dürfen im Abgas eine Massenkonzentration von 10 mg/m<sup>3</sup> nicht überschreiten. Zusätzlich ist ein Emissionsminderungsgrad von mindestens 90 % einzuhalten.

Systembedingt kann allerdings nicht bei allen Gärresttrocknern der Abscheidegrad bestimmt werden. Dies betrifft zum Beispiel Bandtrockner oder Rührwerkstrockner mit Gärrestansäuerung oder einer Säureeindüsung. In diesem Fall kann Roh- und Reingas nicht differenziert werden, sodass die Anforderung an den Abscheidegrad nicht bei allen Anlagen umgesetzt werden kann.

Für den Fall des Einsatzes von Biofiltern im Abgas von Gärresttrocknungsanlagen ist außerdem die Nummer 5.4.8.6.2 Buchstabe d) TA Luft 2021 zu beachten, auf die in Nummer 5.4.1.15 Buchstabe n) verwiesen wird. Bei Trocknungsanlagen ist demnach einem Biofilter zur Ammoniakabscheidung ein saurer Wäscher oder ein gleichwertiges Aggregat zur Entfernung von Ammoniak mit einem Emissionsminderungsgrad von mindestens 90 Prozent vorzuschalten. Der saure Wäscher ist nicht erforderlich, wenn der Ammoniakemissionswert vor der biologischen Abluftreinigung (Biofilter) unterschritten wird. Für die Auslegung und den Betrieb von Biofiltern sind die Anforderungen der Richtlinie VDI 3477 (Ausgabe März 2016) zu beachten.

### Gesamtstaub

Je nach Verfahrensart der Trockner ist mit **Staubemissionen** zu rechnen. Dies ist insbesondere bei Bandtrocknern, Rührwerkstrocknern und BHKW-Abgastrocknern der Fall, die den Gärrest auf einen hohen Trockensubstanzgehalt trocknen. Bei Schaufelradtrocknern und Vakuumverdampfern sind Staubemissionen nur von untergeordneter Bedeutung. Gemäß TA Luft 2021 Nummer 5.4.1.15 dürfen im Abgas von Gärresttrocknungs- und -pelletierungsanlagen die Emissionen an Gesamtstaub eine Massenkonzentration von  $10 \text{ mg/m}^3$  nicht überschreiten.

### Gesamtkohlenstoff

Sofern der Gärrest in der Biogasanlage ausreichend ausgoren wurde, ist mit keinen relevanten Emissionen an **Gesamtkohlenstoff** zu rechnen, da aus dem Trocknungsprozess selbst keine nennenswerten Gesamt-C-Emissionen zu erwarten sind. Entsprechend dem allgemeinen Teil der TA Luft 2021 sollte in Genehmigungsbescheiden eine Emissionsbegrenzung von  $50 \text{ mg/m}^3$  für Gesamt-C festgelegt werden. Auf die Mindestverweilzeitenregelungen der TA Luft 2021 der Nummer 5.4.1.15 des Buchstaben j) bei der Vergärung von Substraten in Biogasanlagen wird hingewiesen.

### Gerüche

Für die **Geruchsemissionen** gilt gemäß der Nummer 5.4.8.2 der TA Luft 2021 grundsätzlich ein Emissionswert von  $500 \text{ GE}_E/\text{m}^3$ . Erfahrungsgemäß treten bei der Gärresttrocknung nur untergeordnete Geruchsbelastungen im Vergleich zur Biogasanlage selbst oder den Fahrhilfen auf. Dies haben unter anderem die Begehungen von Anlagen mit Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen oder Wirtschaftsdünger im Rahmen dieses Projektes gezeigt. Aus fachlicher Sicht kann deshalb in solchen Fällen auf eine Geruchsemissionsbegrenzung bei Gärresttrocknungsanlagen in der Regel verzichtet werden. Bei empfindlicher Nachbarschaft oder im Fall einer Beschwerdesituation kann im Einzelfall eine Begrenzung der Geruchsemissionen auch bei NawaRo-Anlagen (Nachwachsende Rohstoffe) angebracht sein. Bei der Trocknung von Gärresten aus Abfallbehandlungsanlagen sollte dagegen auf eine Geruchsemissionsbegrenzung gemäß Nummer 5.4.8.2 der TA Luft 2021 nicht verzichtet werden.

Weitere Luftschadstoffe aus Gärresttrocknungsanlagen (zum Beispiel  $\text{H}_2\text{S}$ ) sind nicht relevant. Zu berücksichtigen ist, dass beim Ansäuern von Gärresten durch eine Überdosierung von Schwefelsäure gegebenenfalls Schwefelwasserstoffemissionen entstehen können. Beim Betrieb der Anlagen ist dies auch aus Sicherheitsgründen zu vermeiden.

Eine Übersicht über die relevanten Grenzwerte bei Gärresttrocknern ist der nachfolgenden Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Übersicht relevanter Emissionsgrenzwerte bei Gärresttrocknern gemäß TA Luft 2021. Die Werte beziehen sich auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K; 101,3 kPa)

| Luftschadstoff    | Grenzwert   |
|-------------------|---|
| Ammoniak          | 10 mg/m <sup>3</sup><br>Emissionsminderungsgrad von mindestens 90 % |
| Gesamtstaub       | 10 mg/m <sup>3</sup>  |
| Gesamtkohlenstoff | 50 mg/m <sup>3</sup> oder 0,50 kg/h                                 |
| Gerüche           | 500 GE <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>                                 |

Bei immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen sind nach Nummer 5.3.2 der TA Luft 2021 die Emissionen aller luftverunreinigenden Stoffe, für die im Genehmigungsbescheid Emissionsbegrenzungen festzulegen sind, Emissionsmessungen nach Errichtung oder wesentlicher Änderung und wiederkehrend nach drei Jahren durchzuführen. Die Messungen sind von Stellen, die nach § 29b BImSchG bekannt gegeben sind, durchzuführen.

## 5.2 Auswertung von Messberichten

Im Rahmen des Projekts wurden 29 Emissionsmessberichte (LAI-Messberichte) von Emissionsmessungen bei einer entsprechenden Anzahl an Gärrestaubbereitungsanlagen ausgewertet, um die Emissionen der verschiedenen Anlagentypen beziehungsweise der verschiedenen Abgasreinigungstechniken zu vergleichen. Darunter waren auch drei Messberichte von Messungen dieses Projektes. Neben den Emissionen wurde auch der Betriebszustand während der Messung betrachtet. Es wurde – soweit möglich – geprüft, ob die Anlagen während den Messungen bestimmungsgemäß betrieben wurden. Wichtige Betriebsdaten sind zum Beispiel Inputmenge an Frischmaterial, pH-Wert sowie Daten zur Abgasreinigung wie Leitfähigkeit und Säureeinsatz im Wäscher.

### Die Auswertung der Messberichte ergab Folgendes:

Die Emissionsgrenzwerte der untersuchten Luftschadstoffe werden in den meisten Fällen eingehalten. Betrachtet wurden die maximalen Messwerte zuzüglich Messunsicherheit. Bei sechs Anlagen kam es zu Überschreitungen des Ammoniakgrenzwerts von 10 mg/m<sup>3</sup>. Der Staubgrenzwert von 10 mg/m<sup>3</sup> wurde einmal überschritten. Der Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> für Gesamtkohlenstoff wurde in zwei Fällen überschritten. Geruchsemissionen wurden in 14 Fällen gemessen. Dabei kam es zu sechs Überschreitungen des Grenzwertes von 500 GE<sub>E</sub>/m<sup>3</sup>. Zur detaillierten Analyse der Emissionen wurden die Daten nach unterschiedlichen Abgasreinigungstechniken differenziert (Chemowäscher, Gärrestansäuerung, Säureeindüsung vor Gewebefilter, Biofilter, ohne Abgasreinigung; siehe Tab. 3).

Tab. 3: Auswertung von 29 Emissionsmessberichten. Angegeben ist die Anzahl der Messberichte mit dokumentierten Grenzwertüberschreitungen. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Messberichte an, in denen der genannte Parameter tatsächlich ermittelt wurde (falls abweichend von Spalte 2).

| Art der Abgasreinigung                                 | Anzahl der Messberichte | Ammoniak > 10 mg/m <sup>3</sup> | Gesamtstaub > 10 mg/m <sup>3</sup> | Gesamt-C > 50 mg/m <sup>3</sup> | Geruch > 500 GE/m <sup>3</sup> |
|--|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Chemowäscher   | 14                      | 3                               | 0<br>(von 10)                      | 0<br>(von 9)                    | 2<br>(von 9)                   |
| Gärrestansäuerung bei BHKW-Abgastrocknern              | 4                       | 0                               | 1                                  | 1<br>(von 1)                    | 1<br>(von 1)                   |
| Säureeindüsung vor Gewebefilter bei Rührwerkstrocknern | 7                       | 1                               | 0                                  | 0                               | 2<br>(von 3)                   |
| Biofilter  | 1                       | 1                               | 0                                  | 1                               | 1                              |
| Ohne Abgasreinigung                                    | 3                       | 1                               | 0<br>(von 2)                       | 0                               | 0<br>(von 1)                   |
| <b>Σ</b>   | <b>29</b>               | <b>6</b><br>(von 29)            | <b>1</b><br>(von 24)               | <b>2</b><br>(von 21)            | <b>6</b><br>(von 15)           |

### Auswertung der Berichte nach Emissionen

**Ammoniak:** Laut den Messberichten wurden bei allen 29 Anlagen Grenzwerte für Ammoniak festgelegt. Demzufolge wurden die Ammoniakemissionen in allen 29 Messberichten erfasst. Es kam in sechs Fällen, das heißt bei 21 % der untersuchten Anlagen, zu Überschreitungen des Ammoniakgrenzwerts. Die jeweils an einer Anlage gemessenen Maximalwerte der Einzelmessungen zuzüglich Messunsicherheit lagen zwischen 0 und 36 mg/m<sup>3</sup>. Der Median der gemessenen Maximalwerte lag bei 1 mg/m<sup>3</sup>. Das heißt es ist bei geeigneter Betriebsweise der Abgasreinigung grundsätzlich möglich, die Anlagen im Hinblick auf Ammoniak sehr emissionsarm zu betreiben.

In acht von 29 Fällen wurden Rohgasmessungen von Ammoniak durchgeführt. In den acht Anlagen wurden Chemowäscher zur Abscheidung von Ammoniak betrieben. Rohgasmessungen sind zur Ermittlung des in der TA Luft 2021 geforderten Emissionsminderungsgrades für Ammoniak erforderlich. In Fällen der Gärrestansäuerung und der Säureeindüsung vor dem Gewebefilter ist keine Unterscheidung zwischen Roh- und Reingas möglich, weil die Abgasreinigung direkt in der Trocknungskammer stattfindet, ebenso beim Fehlen einer Abgasreinigung. Dies berücksichtigend wurde bei acht von 15 der betroffenen Anlagen die Rohgaskonzentration an Ammoniak gemessen und der Emissionsminderungsgrad ermittelt. In sechs Fällen lag der Minderungsgrad bei dem in der TA Luft geforderten 90 %. In zwei Fällen wurde der Minderungsgrad von 90 % nicht erreicht (87,5 % und 76 %). Der Median des Ammoniakabscheidegrads betrug bei den acht Anlagen 96,7 %. Damit können grundsätzlich hohe Minderungsgrade erreicht werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Emissionsbegrenzungen der TA Luft 2021 von 10 mg/m<sup>3</sup> und 90 % Abscheidegrad grundsätzlich eingehalten werden können. Bei den Anlagen mit Überschreitungen müssen die Ursachen der Überschreitungen ermittelt werden und die Abgasreinigungsanlagen optimiert werden.

**Gesamtstaub:** Bei 24 Messberichten wurden die Staubkonzentrationen ermittelt. Der Grenzwert für Gesamtstaub der TA Luft 2021 wurde mit einer Ausnahme eingehalten. Die verzeichnete Überschreitung war mit 11 mg/m<sup>3</sup> geringfügig. Der Median der Maximalwerte der Einzelmessungen zuzüglich Messunsicherheit beträgt 1 mg/m<sup>3</sup>. Die Staubemissionen der untersuchten Gärresttrocknungsanlagen waren damit in der Regel nicht relevant.

**Gesamtkohlenstoff:** Die Emissionen an Gesamt-C wurde in 21 Messberichten dokumentiert. In zwei Fällen kam es zu Grenzwertüberschreitungen. Eine Überschreitung lag mit  $52 \text{ mg/m}^3$  nur knapp über dem Grenzwert der TA Luft 2021. Der Median der Maximalwerte der Einzelmessungen zuzüglich Messunsicherheit beträgt  $4 \text{ mg/m}^3$ . Damit lagen die Emissionen von Gesamt-C grundsätzlich in einem niedrigen Bereich. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die getrockneten Gärreste in der Regel gut ausgegoren waren.

**Gerüche:** Geruchsemissionen wurden in 15 von 29 Fällen gemessen. In vielen Fällen war kein Geruchsgrenzwert im Bescheid festgelegt, sodass auch keine Messungen erforderlich waren. Bei sechs von 15 Anlagen kam es zu Grenzwertüberschreitungen. Die jeweils an einer Anlage gemessenen Maximalwerte der Einzelmessungen zuzüglich Messunsicherheit lagen in einer Bandbreite von  $22 \text{ GE/m}^3$  bis  $9.798 \text{ GE/m}^3$ . Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wert von  $9.798 \text{ GE/m}^3$  eher eine Ausnahme ist. Dieser Wert wurde im Abgas eines Biofilters ermittelt. Der zugehörige Median der Geruchsmessungen lag bei  $220 \text{ GE/m}^3$ .

### Auswertung der Berichte nach Art der Abgasreinigung

**Chemowäscher:** Bei den 14 gemessenen Chemowäschern kam es in drei Fällen zu Überschreitungen des Ammoniakgrenzwertes. Bei zwei Überschreitungen lag Informationen zum Gärrestdurchsatz und Säureverbrauch vor. Ein Wäscher setzte rund 30–50 Liter 96 %ige Schwefelsäure pro Tag ein bei einem Gärrestdurchsatz von 50 t/d. Nach überschlägiger Rechnung mittels Formel (2) wären jedoch etwa 360 kg/d beziehungsweise 200 l/d erforderlich gewesen. Das wäre eine plausible Erklärung für die hohen Ammoniakwerte (bis zu  $36 \text{ mg/m}^3$ ) im Reingas. Im zweiten Wäscher wurden rund 61 l/d an 96 %iger Schwefelsäure eingesetzt. Für den angegebenen Gärrestdurchsatz von 13,44 t/d wären theoretisch mindestens 53 l/d erforderlich gewesen. Für diesen Wäscher ist eine zu geringe Säuremenge keine Erklärung für die Ammoniakemissionen in Höhe von maximal  $15 \text{ mg/m}^3$ . Offensichtlich lagen die Probleme deshalb bei der Funktion des Wäschers.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit ausreichend dimensionierten und ordnungsgemäß betriebenen Chemowäschern die Ammoniakbegrenzung der TA Luft grundsätzlich eingehalten werden kann und ein niedriges Emissionsniveau erreicht werden kann.

**Gärrestansäuerung:** Bei den vier untersuchten BHKW-Abgastrocknern wurden sehr geringe Ammoniakemissionen von im Schnitt  $1,5 \text{ mg/m}^3$  ermittelt. Gesamt-C und Geruch wurden nur in einem Fall ermittelt. Es kam zu einer geringfügigen Gesamt-C-Überschreitung ( $52 \text{ mg/m}^3$ ) und einer deutlichen Geruchsüberschreitung. Da es sich bei dieser Anlage um die messtechnisch im Projekt untersuchte Anlage C handelt, wird an dieser Stelle auf das Kapitel 6.4 verwiesen.

**Säureeindüsung vor Gewebefilter:** Es wurden sieben Messberichte von Rührwerkstrocknern ausgewertet, bei denen jeweils Schwefelsäure vor dem Gewebefilter eingedüst wurde. In einem Fall kam es zu einer Überschreitung des Ammoniakgrenzwertes (maximaler Messwert  $23 \text{ mg/m}^3$ ). Bei dieser Messung wurden 290 kg/h Gärrest eingesetzt bei einer dosierten Säuremenge von 0,3–0,6 l/h an 96 %iger Schwefelsäure. Theoretisch wäre eine Menge von 1,14 l/h erforderlich. Das Messinstitut gab an, dass es zu einem Fehler bei der Säureanmischung kam. Grundsätzlich kann mit dieser Technik bei ausreichendem Säureeinsatz und guter Eindüstechnik der Ammoniakgrenzwert der TA Luft 2021 eingehalten werden.

**Biofilter:** Bei einer der Messungen war in der untersuchten Anlage zur Abgasreinigung ein Biofilter installiert. In der Anlage wurde der Gärrest mit 76 %iger Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 6,5 eingestellt. Bei den Messungen wurden bis auf Gesamtstaub alle Emissionsgrenzwerte überschritten (Ammoniak, Gesamt-C und Geruch). Das eingesetzte System war offensichtlich nicht geeignet, die

Grenzwerte einzuhalten. Es ist davon auszugehen, dass der verwendete Biofilter mit einer Fläche von lediglich 0,5 m<sup>2</sup> nicht ausreichend dimensioniert ist.

**Gärresttrocknungen ohne Abgasreinigung:** Bei drei Anlagen war die Gärresttrocknung laut Messbericht ohne Abgasreinigung ausgestattet. Eine dieser Anlagen verfügt nach unserer Kenntnis jedoch über einen Säurewäscher. Diese wird hier nicht betrachtet. Bei den beiden Anlagen, die ohne Abgasreinigung ausgeführt sind, kam es bei einer der Anlagen zu einer Grenzwertüberschreitung mit einer Ammoniakkonzentration von 28 mg/m<sup>3</sup>, bei der anderen Anlage waren die Emissionen vergleichsweise niedrig. Die niedrigen Emissionen der letzteren Anlage sind aufgrund des Fehlens einer Abgasreinigung überraschend und können nicht nachvollzogen werden.

### Fazit

Grundsätzlich ist zur Vermeidung von Grenzwertüberschreitungen insbesondere bei Ammoniak unbedingt auf eine ausreichende Auslegung der Abgasreinigungsanlagen und eine bestimmungsgemäße Betriebsführung zu achten.

### **Auffälligkeiten in den Messberichten**

Eine Überprüfung der Qualität der Messberichte ließ teilweise Mängel erkennen. Dies betraf vor allem die Kapitel Anlagenbeschreibung (Kapitel 2) und Betriebszustand während der Messungen (Kapitel 5), die zum Teil sehr oberflächlich behandelt wurden und deren Angaben nur auf Betreiberangaben beruhen. Dadurch lassen die Messergebnisse nur bedingt Rückschlüsse auf den bestimmungsgemäßen Betrieb zu. Die Ursachenforschung bei Grenzwertüberschreitungen war durch fehlende oder ungenaue Angaben im Nachhinein nicht möglich.

In einem Messbericht war angegeben, dass das Substrat bereits seit dem Vorabend der Messung in der Trocknung verweilte. Bei weiteren Messberichten besteht der Verdacht, dass kein frischer, unbehandelter Gärrest während der Messung eingesetzt wurde. Ebenso fällt auf, dass einige Anlagen während des Messzeitraums nicht mit einer repräsentativen Auslastung betrieben wurden, die zu den höchsten zu erwartenden Emissionen führt. Dadurch verliert die Emissionsmessung an Aussagekraft und wird nicht bescheidkonform durchgeführt. In solchen Fällen sind die Messungen zu wiederholen.

Um ein repräsentatives Messergebnis erzielen zu können, muss darauf geachtet werden, dass während der Messung frischer und unbehandelter Gärrest in der Gärrestaufbereitungsanlage eingesetzt wird und die Messungen bei maximaler Anlagenauslastung durchgeführt werden. Die in Bayern nach § 29b BImSchG bekannt gegebene Messstellen wurden deshalb im Rahmen eines Erfahrungsaustausches mit dem LfU am 28.06.2022 gebeten, auf die konsequente Anlagenbeschreibung und die Erfassung des Betriebszustands zu achten.

Festzustellen war außerdem, dass die Schwefelsäureeinsatzmengen bei der Emissionsmessung im Vergleich zur Betriebsbeschreibung häufig differierten. Teilweise wurden während der Messungen größere Mengen an Schwefelsäure dosiert, als in der Betriebsbeschreibung vorgesehen. Dies führt gegebenenfalls zu günstigeren Messergebnissen hinsichtlich der Ammoniakemissionen. Teilweise sind Überschreitungen der zulässigen Ammoniakkonzentration nach überschlägiger Berechnung auf eine zu geringe Schwefelsäuredosierung zurückzuführen.

Um die Ergebnisse der Emissionsmessung im Abgas von Chemowäschern mit den tatsächlichen im dauerhaften Betrieb eingesetzten Mengen vergleichen zu können, ist grundsätzlich eine kontinuierliche Durchflussmessung- und Aufzeichnung der Schwefelsäuredosierung zur Überprüfung des ordnungsgemäßen Betriebs im Rahmen der Anlagenüberwachung notwendig. Der Genehmigungsantrag sollte entsprechende Angaben enthalten. Dies betrifft auch die Konzentration der einzusetzenden

Schwefelsäure. Zusätzlich muss die Schwefelsäure geregelt und angepasst an den Gärrestdurchsatz zugeführt werden. Von den Herstellern der Anlagen sind dazu möglichst geeignete Kennlinien vorzugeben, die beim Einfahren der Anlagen aufzunehmen und im Betrieb zu berücksichtigen sind. Zusätzlich sollte im Rahmen der Anlagenüberwachung durch Prüfung von Einkaufsbelegen und der zudosierten Schwefelsäuremenge in der erforderlichen Konzentration überprüft werden, ob der bestimmungsgemäße Betrieb sichergestellt ist. Aufgrund der Umweltrelevanz von Ammoniak ist eine dauerhaft effektive Abscheidung von Ammoniak bei Gärresttrocknungsanlagen unbedingt sicherzustellen. Ansonsten wäre die Vergütung von Gärresttrocknungsanlagen über den KWK-Bonus des EEG 2009 beziehungsweise 2012 in Frage zu stellen.

## 6 Emissionsmessungen an verschiedenen Gärrestrocknern

### 6.1 Messumfang

An drei Gärrestaubbereitungsanlagen unterschiedlichen Typs wurden im Rahmen des Projektes Emissionsmessungen im Abgas der Anlagen durchgeführt. Bei Anlage A handelt es sich um einen Schaufelradrockner mit Chemowäscher, bei Anlage B um einen Bandrockner im kombinierten Verfahren (direkte und indirekte Beheizung) mit Chemowäscher und bei Anlage C um einen Trockner mit direkter Trocknung durch BHKW-Abgase (BHKW-Abgastrockner) mit Ansäuerung des Gärrestes. An den Anlagen wurden für jeden untersuchten Luftschadstoff vier repräsentative Einzelmessungen über jeweils 30 Minuten durchgeführt. Bei den Anlagen A und B wurden nach Möglichkeit zeitgleich Roh- und Reingasmessungen durchgeführt. Bei der Anlage C mit direkter Trocknung sind Rohgasmessungen nicht möglich. Es wurden jedoch Messungen im Abgas des BHKW-Motors durchgeführt.

Die folgenden Parameter wurden erfasst:

- Ammoniak sowie der Emissionsminderungsgrad
- Gesamtstaub
- Gesamt-C (mit Bestimmung von Methan)
- Schwefelwasserstoff sowie
- Abgasrandbedingungen (Temperatur, Druck, Feuchte, Volumenstrom, O<sub>2</sub>-Gehalt).

Weiterhin wurden wichtige Rand- beziehungsweise Betriebsparameter der Abgasreinigung (zum Beispiel pH-Wert, Leitfähigkeit, Abschlämmrate, Druck, Durchsatz, Temperatur) sowie die Leistungsdaten der BHKW erfasst.

Bei Anlagen B und C wurden zusätzlich Stickstoffoxide (angegeben als NO<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Formaldehyd und Geruch ermittelt.

Auf eine optionale vierte Emissionsmessung musste pandemiebedingt verzichtet werden. Geplant war eine Messung an einer Kombination aus direkt und indirekt beheiztem Trockner mit Biofilter als alleinige Abgasreinigung.

Mit der Durchführung der Emissionsmessungen an den drei Gärrestrocknern wurde nach einer Ausschreibung eine nach § 29b Bundes-Immissionsschutzgesetz bekannt gegebene Stelle beauftragt. Die beauftragte Stelle verfügt über eine Notifizierung der Gruppe I, Nummer 1 in den Stoffbereichen P, G und O gemäß 41. Bundes-Immissionsschutzverordnung.

### 6.2 Emissionsmessungen Anlage A (Schaufelradrockner)

Vor dem Beginn der ersten Emissionsmessung wurde das Vorhaben mit dem Messinstitut abgestimmt und der Betrieb A gemeinsam besichtigt.

#### Beschreibung der Anlage A

Der Anlagenbesitzer betreibt eine NawaRo-Biogasanlage mit zwei BHKW mit einer elektrischen Leistung von 900 kW und einem Schaufelradrockner (indirekt beheizte Trocknung) mit nachgeschaltetem chemischen Abgaswäscher (siehe Abb. 23). Für die Gärresttrocknung liegt eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung aus dem Jahr 2017 mit der Auflage einer chemischen Abluftreinigung vor.



Abb. 23:  
Schaufelradrockner Betrieb A mit Abluftreinigung  
nach Betreiber Anlage A (2019)

Unter Nutzung der Abwärme des BHKWs wird der flüssige Gärrest der Biogasanlage im Schaufelradrockner von rund 6 % TS auf maximal 12 % TS eingedickt. In der ersten Stufe wird der Gärrest über einen Separator in festen und flüssigen Gärrest getrennt. Die flüssige Phase wird in die Gärrestwanne des Trockners gepumpt. Die Verdampfung des Wassers und Eindickung des Gärrestes erfolgen chargenweise. Dazu tauchen die Schaufelbleche des sogenannten Mississippi-Rotors in die flüssige Phase und führen diese mit sich. Die Außenluft durchströmt mittels Ventilatoren den vom BHKW versorgten Wärmetauscher, wird dabei erhitzt und durch den Gärrestrockner geführt. Anschließend wird der eingedickte Gärrest abgepumpt und die Wanne wieder mit frischem, flüssigem separierten Gärrest befüllt. Der Zyklus beginnt von neuem. Die Dauer einer Charge beträgt etwa zwei Stunden.

### **Abgasreinigung / Ammoniakabscheidung**

Das bei der Eindickung freigesetzte Ammoniak wird mittels nachgeschaltetem Chemowäscher abgetrennt. Um Ammoniak zu binden, wird dem Washwasser Schwefelsäure zugeführt. Dabei entsteht eine Ammoniumsulfatlösung (ASL). Die Säuredosierung erfolgt über einen pH-Wert-Sensor und eine Dosierpumpe. Die Abluft des Schaufelradrockners strömt durch die Füllkörper der Abluftreinigung. Das Washwasser wird von oben nach unten auf die Füllkörper gesprüht, sammelt sich in der Washwasserwanne und wird über eine Pumpe erneut auf die Füllkörper aufgebracht. Sobald die ASL im Abluftwäscher einen Leitwert von 350 mS erreicht hat, wird die Schwefelsäurezufuhr für kurze Zeit abgestellt. Dadurch steigt der pH-Wert der ASL von rund 3,8 auf 6,3 und die ASL liegt damit pflanzenverträglich vor. Anschließend wird die konzentrierte ASL in ein separates Lager gepumpt (Abschlammung) und frisches Washwasser in den Chemowäscher nachgeführt.

Die Abgase des Wäschers werden über drei parallele Kamine, deren Emissionen als gleichwertig angesehen werden, abgeleitet.

### Durchführung der Emissionsmessungen

Die Messungen erfolgten über einen Trocknungszyklus von der Befüllung der Gärrestwanne bis zum Abpumpen des eingedickten Substrates. Eine Abschlammung des Waschwassers fand während der Messung nicht statt.

Mit vier Einzelmessungen über je 30 Minuten erfolgte die Emissionsmessung über den kompletten Trocknungszyklus (Charge = 2 h). Dabei wurden im Roh- und Reingas zeitgleich Ammoniak, Gesamt-C, Schwefelwasserstoff sowie alle wichtigen Abgasrandbedingungen gemessen. Im Reingas wurden zusätzlich Gesamtstaub und Methan gemessen. Außerdem wurden der Gärrest-Input, der Gärrest-Output sowie das Waschwasser zu Beginn und am Ende der Messung auf den Stickstoffgehalt ( $N_{\text{ges}}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Nitrat-N) im Hinblick auf eine Stickstoffbilanzierung analysiert.

Der Messquerschnitt für das Reingas wurde rund 1,2 Meter nach Austritt aus dem Wäscher im senkrechten Zug am mittleren Kamin eingerichtet. Im Raum zwischen dem Gärresteindicker und dem Wäscher erfolgte die Rohgasmessung. Die Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die Rein- und Rohgasmessstelle.



Abb. 24: Reingasmessstelle Anlage A nach Betreiber Anlage A (2019)



Abb. 25: Rohgasmessstelle Anlage A nach Betreiber Anlage A (2019)

## Ergebnisse der Emissionsmessungen

In Tab. 4 und Tab. 5 sind die erzielten Messergebnisse im Roh- und Reingas dargestellt (ohne Berücksichtigung der jeweiligen Messunsicherheiten).

Tab. 4: Messergebnisse Rohgas Gärresttrocknungsanlage A

| Luftschadstoff             | Einheit              | 1        | 2        | 3        | 4        | Grenzwert TA Luft 2021 |                |
|----------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|----------------|
| <b>Ammoniak</b>            |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 62,5     | 59,0     | 37,3     | 13,5     | 10                     | (Nr. 5.4.1.15) |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 1,69     | 1,60     | 1,01     | 0,37     | 0,15                   | (Nr. 5.2.4)    |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>   |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 3,2      | 2,1      | 1,5      | 1,3      | 50                     | (Nr. 5.2.5)    |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,087    | 0,056    | 0,041    | 0,036    | 0,50                   | (Nr. 5.2.5)    |
| <b>Schwefelwasserstoff</b> |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,001 | << 0,002 | << 0,002 | << 0,002 | 3                      | (Nr. 5.2.4)    |
| Massenstrom                | [g/h]                | << 0,04  | << 0,05  | << 0,05  | << 0,05  | 15                     | (Nr. 5.2.4)    |

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Tab. 5: Messergebnisse Reingas Gärresttrocknungsanlage A

| Luftschadstoff             | Einheit              | 1        | 2        | 3        | 4        | Grenzwert TA Luft 2021 |                |
|----------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|----------------|
| <b>Ammoniak</b>            |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,4      | 10                     | (Nr. 5.4.1.15) |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,018    | 0,019    | 0,020    | 0,010    | 0,15                   | (Nr. 5.2.4)    |
| Minderungsgrad             | [%]                  | 98,9     | 98,8     | 98,0     | 97,2     | 90                     | (Nr. 5.4.1.15) |
| <b>Gesamtstaub</b>         |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,2   | << 0,3   | << 0,3   | << 0,3   | 10                     | (Nr. 5.4.1.15) |
| Massenstrom                | [kg/h]               | << 0,005 | << 0,008 | << 0,008 | << 0,008 | 0,20                   | (Nr. 5.2.1)    |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>   |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 4,1      | 3,2      | 2,5      | 2,1      | 50                     | (Nr. 5.2.5)    |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,112    | 0,087    | 0,068    | 0,057    | 0,50                   | (Nr. 5.2.5)    |
| <b>Methan</b>              |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 4,4      | 2,7      | 1,9      | 1,6      |                        |                |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,118    | 0,074    | 0,052    | 0,044    |                        |                |
| <b>Schwefelwasserstoff</b> |                      |          |          |          |          |                        |                |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,002 | << 0,002 | << 0,002 | << 0,002 | 3                      | (Nr. 5.2.4)    |
| Massenstrom                | [g/h]                | << 0,04  | << 0,05  | << 0,05  | << 0,05  | 15                     | (Nr. 5.2.4)    |

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Mit maximal 0,7 mg/m<sup>3</sup> lagen die Emissionen an Ammoniak im Reingas auf einem sehr niedrigen Niveau. Der NH<sub>3</sub>-Abscheidegrad des Wäschers lag bei über 97 %. Damit werden die Vorgaben der TA Luft 2021 sicher eingehalten.

Der Konzentrationsverlauf für Ammoniak im Rohgas (siehe Abb. 26) entsprach den Erwartungen für den Chargenbetrieb. Die Staubemissionen waren sehr gering (kleiner 0,3 mg/m<sup>3</sup>). Da der Schaufelradrockner den flüssigen Gärrest mit einem TS-Gehalt von 4,5–6,5 % auf nur 10–12 % TS eindickt, waren höhere Emissionen an Staub nicht zu erwarten. Die Konzentration an Gesamt-C einschließlich Methan lag ebenfalls auf sehr niedrigem Niveau. Das Fehlen signifikanter Methankonzentrationen im Abgas zeigt, dass im Gärrest nahezu keine anaeroben Prozesse mehr ablaufen. Schwefelwasserstoff war im Roh- und Reingas nicht nachweisbar.

Der Volumenstrom betrug durchschnittlich 27.060 m<sup>3</sup>/h.

### Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

**Ammoniak:** Im folgenden Diagramm sind in Abb. 26 die vier Messwertpaare (Rein- und Rohgaswerte von Ammoniak) dargestellt sowie der jeweils dazugehörige Abscheidegrad.

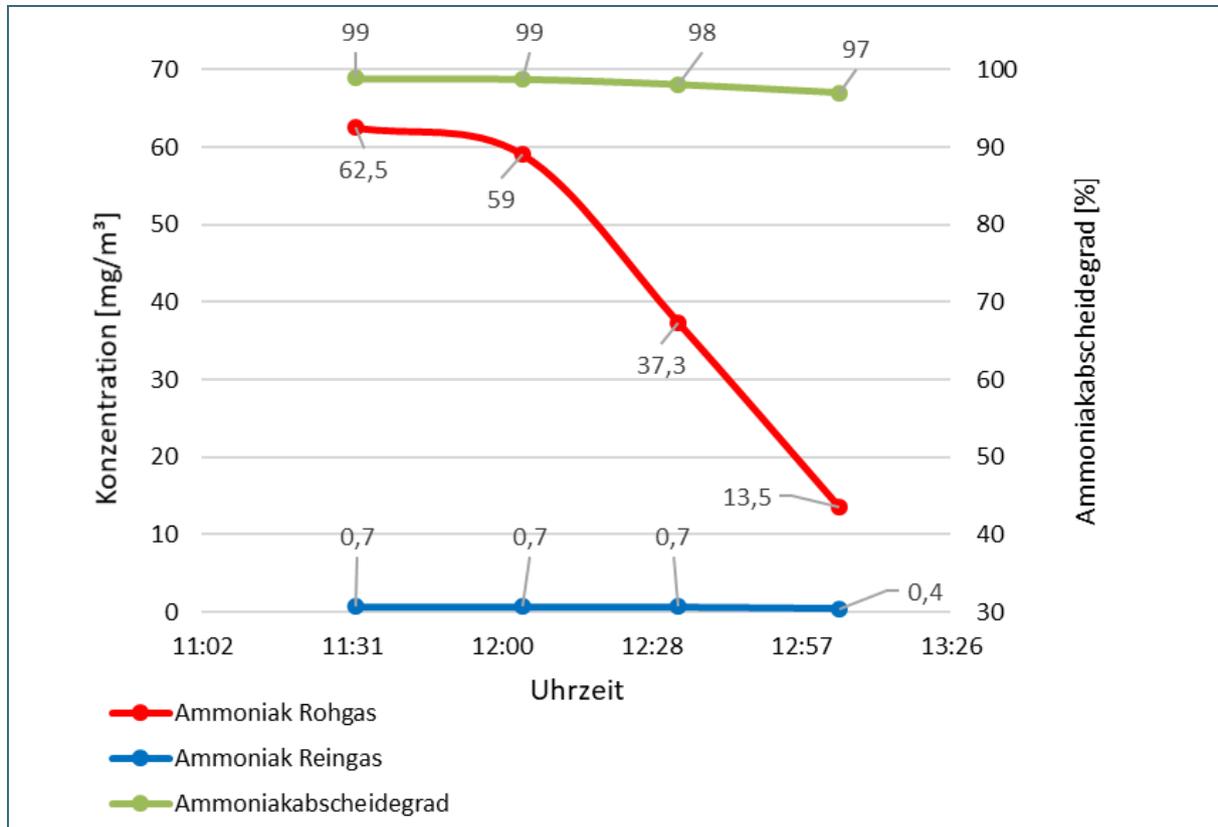


Abb. 26: Ammoniakgehalte in Roh- und Reingas und Ammoniakabscheidegrad während der Messung an der Anlage A

Erwartungsgemäß entweicht aus dem Substrat am Anfang der Trocknungsphase mit  $62,5 \text{ mg/m}^3$  viel Ammoniak. Am Ende des Eindickungsprozesses ist das meiste Ammonium als Ammoniak entwichen und die Konzentration im Rohgas fällt rund auf ein Fünftel ab. Die Ammoniakemissionen im Reingas lagen mit maximal  $0,7 \text{ mg/m}^3$  nahe der Bestimmungsgrenze. Bei einer niedrigen Ammoniakkonzentration im Rohgas geht der Ammoniakabscheidegrad erwartungsgemäß etwas zurück.

Der Ammoniakabscheidegrad ohne Abschlämmvorgang lag durchschnittlich bei  $98,5 \%$ . Das zeigt die ordnungsgemäße Funktion des Wäschers am Messtag. Insgesamt wurden  $2,33 \text{ kg}$  an Ammoniak pro Trocknungscharge ausgetrieben, hiervon wurden  $0,034 \text{ kg}$  über den Kamin emittiert. Geht man davon aus, dass der Trockner das ganze Jahr betrieben wird, werden insgesamt rund  $10 \text{ t/a}$  zurückgehalten und im Chemowäscher in Form von Ammoniumsulfatlösung abgeschieden. Im bestimmungsgemäßen Betrieb ohne Abschlämmvorgang werden rund  $0,150 \text{ t/a}$  emittiert. Dies entspricht einem Anteil von  $1,5 \%$ .

**Gesamtstaub:** Aufgrund der diffusen Strömung innerhalb der Trocknungskammer konnte im Rohgas kein Staub gemessen werden. Im Reingas war nach dem Wäscher mit kleiner  $0,3 \text{ mg/m}^3$  keine relevante Staubemission messbar. Der Reingaswert lag deutlich unter dem Grenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  gemäß Bescheid.

**Gesamtkohlenstoff:** Die Konzentration an Gesamt-C war sowohl im Roh- als auch im Reingas irrelevant und lag weit unter dem Grenzwert von  $50 \text{ mg/m}^3$  beziehungsweise  $0,50 \text{ kg/h}$  gemäß TA Luft Nummer 5.2.5. Geringe Methankonzentrationen von maximal  $4,4 \text{ mg/m}^3$  weisen darauf hin, dass das Material gut ausgegoren und belüftet war.

**Schwefelwasserstoff:** Durch Zufuhr von ausreichend Sauerstoff war erwartungsgemäß in Rohgas und Reingas kein Schwefelwasserstoff nachweisbar.

### Stickstoffbilanzierung

Im Chemowäscher wird ein Großteil des Ammoniaks durch Schwefelsäurezugabe zurückgehalten und als ASL regelmäßig abgeschlämmt. Insgesamt findet eine Vielzahl von Stoffflüssen im System statt, die eine quantitative Auswertung der Ammoniumflüsse erschweren (siehe Abb. 27). Zudem konnten die betrachteten Stoffmengen nur über eine einfache Füllstandhöhenmessung erfasst und keine belastbare Repräsentativität der Materialproben gewährleistet werden. Die Auswertung der Materialanalysen erlaubt daher nur eine grobe Plausibilitätsprüfung.

Der Trocknungsvorgang findet diskontinuierlich (Trocknungschargen über rund 2 h) statt. Ein Teil der eingedickten Masse wird vor Trocknungsbeginn wieder rückgemischt.

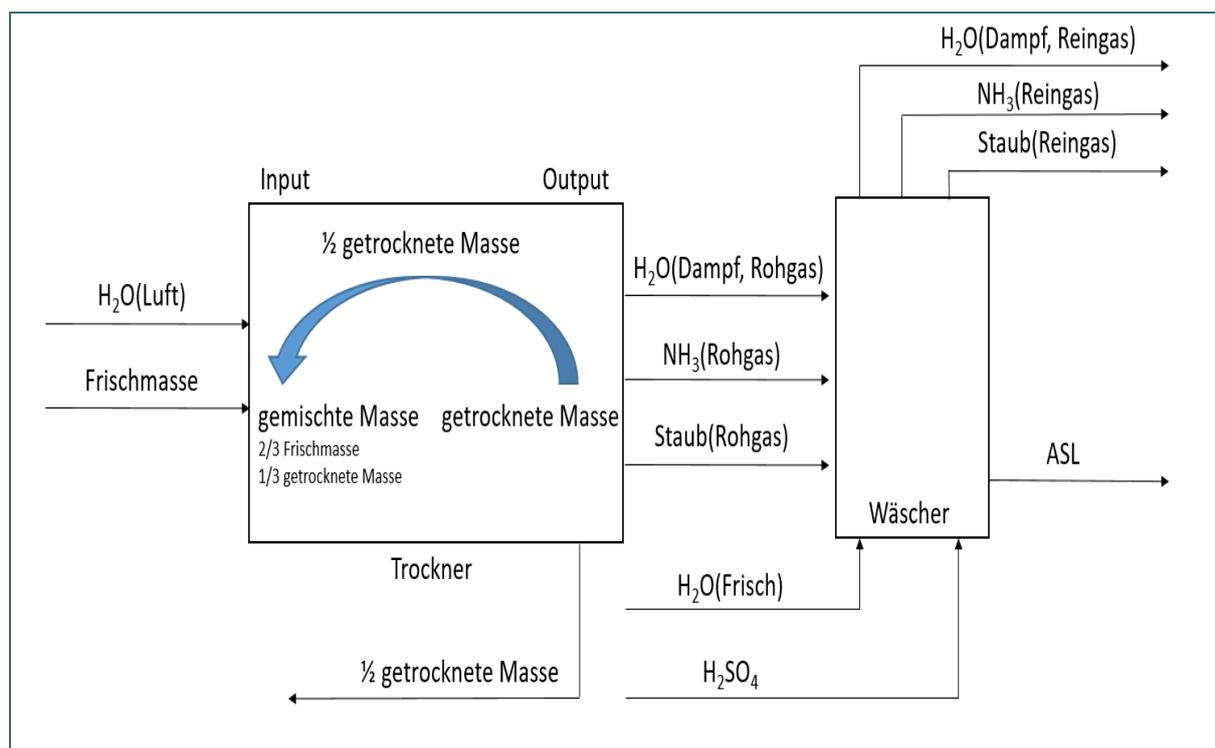


Abb. 27: Stoffflüsse in Gärresttrocknungsanlage A

### Auswertung der Stickstoffbilanz

Während der Emissionsmessung wurden Proben des Eingangssubstrats und des Outputs genommen, um zu prüfen, inwieweit der Stickstoffverlust durch das Freisetzen von Ammoniak während der Trocknung über die einzelnen Stoffströme bilanziert werden kann. Die Probe des Eingangsmaterials (flüssiger separierter Gärrest) wurde direkt nach dem Separator vor der Trocknung entnommen, die Probe des eingedickten Gärrestes wurde direkt nach der Trocknung aus der Gärrestwanne entnommen. Über den Füllstand und die Geometrie der Gärrestwanne wurde die Menge des Eingangssubstrats

und des Outputs berechnet. Zusätzlich wurde bei Beginn und am Ende der Trocknung jeweils eine Probe vom Waschwasser des Chemowäschers aus dem Sumpf gezogen.

Die Proben wurden von einem externen Institut untersucht. Die folgende Tab. 6 zeigt die Ergebnisse der Materialanalysen vor und nach der Trocknung (Gehalte bezogen auf Originalsubstanz (OS)).

Tab. 6: Analyseergebnisse der Gärrestes vor und nach der Trocknung

| Materialanalyse                | TS-Gehalt [%] | N <sub>ges</sub> OS [kg/t] | NH <sub>4</sub> -N OS [kg/t] | Nitrat-N OS [kg/t] |
|--------------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------|--------------------|
| Probe vor Eindickung (Input)   | 6,5           | 4,26                       | 2,32                         | < 0,100            |
| Probe nach Eindickung (Output) | 11,6          | 6,78                       | 1,89                         | < 0,100            |

Der Trockensubstanzgehalt steigt während des Trocknungsvorgangs auf nahezu das Doppelte von 6,5 % auf 11,6 %. Das flüssige, frische Substrat mit einer Masse von abgeschätzt 1.900 kg wurde auf 940 kg eingedampft und anschließend abgepumpt.

Laut Analyse beträgt der NH<sub>4</sub>-N-Anteil etwa 2,32 kg/t in der Probe vor der Eindickung. Somit werden rund 4,44 NH<sub>4</sub>-N kg/Charge in den Trockner eingetragen. Da der NH<sub>4</sub>-N-Anteil des Outputs bei 1,89 kg/t liegt, verbleiben 1,78 kg/Charge im eingedickten Gärrest. Die Differenz von 2,66 kg NH<sub>4</sub>-N/Charge sollte während der Emissionsmessung im Rohgas zu finden sein. Da über die Rohgasmessung Ammoniakfrachten in Höhe von 2,33 kg NH<sub>3</sub>/Charge, entsprechend 1,92 kg NH<sub>4</sub>-N/Charge, ermittelt wurden, konnte jedoch nur ein Teil (ca. 72 %) der Stickstoffdifferenz aus der Bilanz des Substrats als ausgetriebenes Ammoniak im Rohgas des Trockners nachgewiesen werden. Über die Reingasseite wurden 0,034 kg NH<sub>3</sub>/Charge über den Kamin emittiert. Die Differenz der Ammoniakemissionen zwischen Roh- und Reingas sollten in der Abgasreinigung zurückgehalten und im Waschwasser zu finden sein.

Zum Nachweis der Stickstoffabscheidung im Wäscher wurde zu Beginn und am Ende der Trocknung jeweils eine Probe Waschwasser des Chemowäschers aus dem Sumpf gezogen und analysiert (siehe Tab. 7). Um einen zusätzlichen Störeinfluss durch Abschlammung des Waschwassers während der Messung zu vermeiden, wurde am Vortag gezielt abgeschlämmt.

Tab. 7: Analyseergebnisse des Waschwassers im Chemowäscher der Gärresttrocknung

| Probe                       | TS-Gehalt [%] | pH [-] | Dichte [g/l] | N <sub>ges</sub> OS [kg/t] | S <sub>ges</sub> OS [kg/t] |
|-----------------------------|---------------|--------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| Waschwasser vor Eindickung  | 20,4          | 3,1    | 1.091        | 38,3                       | 6,2                        |
| Waschwasser nach Eindickung | 28,2          | 2,9    | 1.137        | 52,9                       | 6,5                        |

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass der pH-Wert des Waschwassers innerhalb der zweistündigen Emissionsmessung trotz der Aufnahme von Ammoniak aufgrund der Zugabe von Schwefelsäure von 3,1 auf 2,9 gefallen. Der Anstieg des Gesamtschwefelgehalts von 6,2 kg/t auf 6,5 kg/t spricht für die Funktion der automatischen Schwefelsäuredosierung während der Emissionsmessung. Auffällig ist die hohe Zunahme des N-Gehalts um 14,6 kg/t im Waschwasser am Ende des Trocknungsprozesses.

Eine Plausibilisierung der Stickstoffaufnahme im Waschwasser mittels Frachtenbetrachtung anhand der Waschwassermenge und des Stickstoffgehalts zeigt, dass im Waschwasser offensichtlich weit mehr Gesamtstickstoff zu finden ist, als über das Rohgas tatsächlich freigesetzt wurde. Eine mögliche Erklärung ist, dass zu den jeweils im Rahmen der Bilanzierung verwendeten Stoffflüsse teilweise

keine hinreichend genauen Angaben (zum Beispiel eingesetzte Waschwassermenge) verfügbar waren und diese abgeschätzt wurden. Außerdem sind Verschleppungen des Gärrestes aus dem Trockner und damit zusätzliche Stickstoffeinträge in den Wäscher prozessbedingt nicht auszuschließen. Eine weitere Fehlerquelle liegt möglicherweise in der Repräsentativität der gezogenen Feststoffproben.

### **Überprüfung der dauerhaften Abscheideleistung des Wäschers**

Eine einfache Möglichkeit, um eine dauerhaft ausreichende Ammoniakabscheidung zu überprüfen, ist die Betrachtung des Schwefelsäureverbrauches. Der Schwefelsäuretank des Betreibers wird laut Betriebstagebuch etwa alle 23 Tage gewechselt. In einem IBC (Intermediate Bulk Container) lagern rund 1.000 Liter  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 %ig), was etwa 1.830 kg  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 %ig) entspricht. Demnach würde der gesamte Schwefelsäureeinsatz 29.041 kg pro Jahr betragen. Um einen Ammoniakabscheidegrad von 90 % erzielen zu können, müssen rein stöchiometrisch mindestens 27.560 kg  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 %ig) pro Jahr eingesetzt werden. Dabei wurde aufgrund der Ergebnisse der Emissionsmessungen davon ausgegangen, dass insgesamt 9,2 t  $\text{NH}_3$ /a aus dem Rohgas abgeschieden werden.

Somit dürfte die eingesetzte Menge ausgereicht haben, um dauerhaft eine 90 %ige Abscheidung von Ammoniak zu erzielen.

### Überprüfung der Betriebsdaten über den Datenlogger des Chemowäschers

Der Betrieb eines Datenloggers, der dauerhaft die wichtigen Betriebsparameter aufzeichnet und speichert, ist nach Aussage des Herstellers seit einigen Jahren Standard für den eingebauten Chemowäscher. Seit Anfang des Jahres 2019 hat der Hersteller dauerhaft über den eigenen Computer Zugriff auf die Daten. Die Daten lassen sich ebenso vor Ort nachverfolgen und über einen USB-Stick auslesen. Verläufe wichtiger Betriebsdaten können direkt vor Ort rückwirkend dargestellt werden und stellen damit eine gute Kontrollmöglichkeit für die Funktionstüchtigkeit und den dauerhaften ordnungsgemäßen Betrieb des Chemowäschers dar.

Wichtigste Parameter für den Immissionsschutz sind:

- Leitwert des Waschwassers [mS = Millisiemens]
- pH-Wert des Waschwassers [-]
- Menge der Säuredosierung [l/h]
- Frischwassermenge [ $\text{m}^3$ /h]
- Regelmäßiger Betrieb der Abschlammung

### Abschlammung der Ammoniumsulfatlösung

Etwa alle drei Tage wird die Ammoniumsulfatlösung aus dem Chemowäscher in einen separaten Lagertank gepumpt. Der ganze Abschlammvorgang (inklusive Vorbereitung der Abschlammung) dauert insgesamt in etwa zwei Stunden. Damit die Ammoniumsulfatlösung in pflanzenverträglicher Form im Lagertank gespeichert werden kann, werden Schwefelsäure- und Frischwasserzufuhr in diesem Zeitraum abgestellt. Dadurch steigt der pH-Wert im Wäscher kurzzeitig von rund 3 - 4 auf über 6. Während der Anhebung des pH-Werts ist die Ammoniakabscheidung nur bedingt möglich und es kommt zu höheren Ammoniakemissionen.

In Abb. 28 sind pH-Wert- und Leitwertverlauf über einen Zeitraum mit drei Abschlammvorgängen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Leitwert zwischen zwei Abschlammungen konstant steigt, nach der Abschlammung sprunghaft abfällt und dann wieder zu steigen beginnt. Sobald der Leitwert von 250 mS überschritten wird, beginnt ein Abschlammvorgang. Durch das Einstellen der Schwefelsäure-

zufuhr steigt zuerst der pH-Wert von 3,5 auf über 6,5. Zusätzlich wird die Frischwasserzufuhr gestoppt, wodurch auch der Leitwert deutlich ansteigt. Durch die kurzzeitige pH-Wert-Anhebung ist die Funktion der Ammoniakabscheidung eingeschränkt. Mit einem pH-Wert von 6,5 oder höher ist das Waschwasser jedoch pflanzenverträglich und wird deshalb so in den ASL-Lagertank ausgeschleust. Nach dem füllstandbedingten Ende des Abschlämmvorgangs wird dem Wäscher Frischwasser füllstandgesteuert wieder hinzugefügt, was zu einem deutlichen Abfall des Leitwerts führt. Anschließend wird die Schwefelsäurezufuhr gestartet. Der pH-Wert fällt auf einen Wert von rund 3,5 und die Ammoniakabscheidung ist wieder voll funktionsfähig.

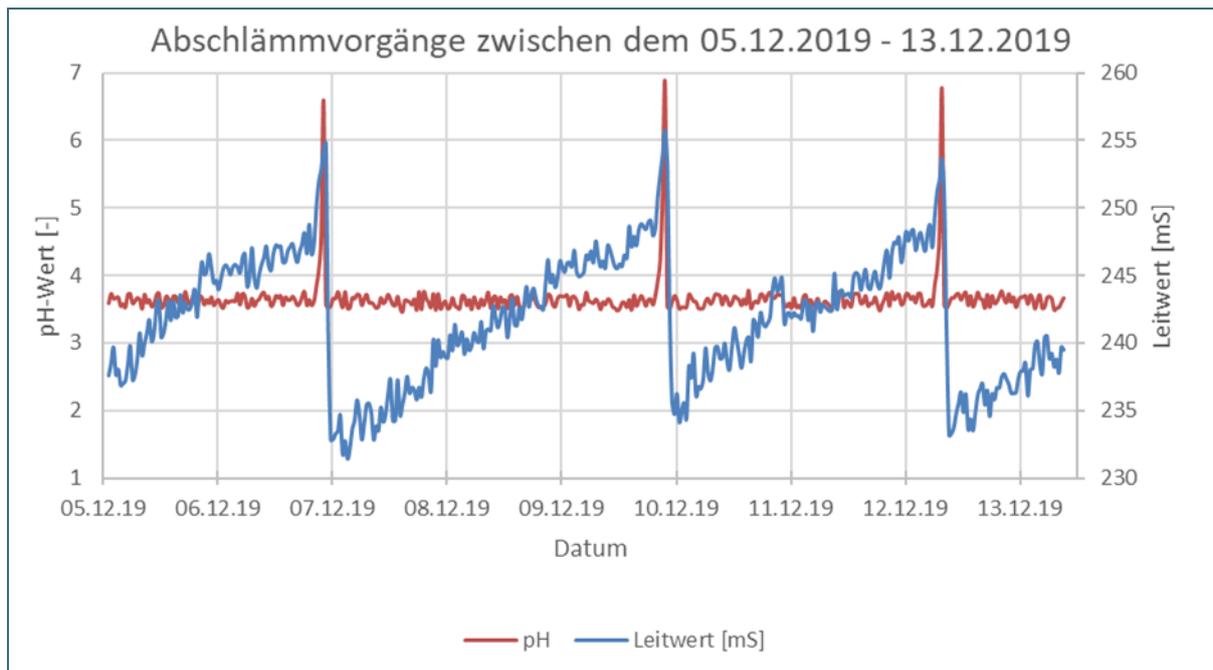


Abb. 28: Abschlämmvorgänge Anlage A zwischen dem 05.12.2019 und dem 13.12.2019

#### Höhe der Ammoniakemissionen während des Abschlämmvorgangs

Die Dauer eines Abschlämmvorgangs von der Einstellung bis zur Wiederaufnahme der Schwefelsäuredosierung liegt bei rund zwei Stunden und erfolgt in etwa jeden dritten Tag. Somit wird das Waschwasser rund 122-mal im Jahr abgeschlämmt. Die Ammoniakabscheidung ist damit rund 244 Stunden im Jahr wahrscheinlich nicht voll funktionstüchtig. Durch die Anhebung des pH-Wertes ist davon auszugehen, dass nur noch ein Teil des Ammoniaks zurückgehalten wird. Je höher der pH-Wert, desto eingeschränkter funktioniert die Abscheidung.

Die Rohgasmessung hat ergeben, dass ohne einen funktionierenden Abgaswäscher im Mittel 1,17 kg  $\text{NH}_3$  pro Stunde emittiert würden. Dies entspräche rund 10.250 kg  $\text{NH}_3$  im Jahr. Konservativ gerechnet könnten maximal 284 kg Ammoniak im Jahr durch die Anhebung des pH-Wertes während des Abschlämmvorgangs freigesetzt werden. Dadurch wird der Ammoniakabscheidegrad ohne Abschlämmvorgänge von über 98 % auf einen Wert für den bestimmungsgemäßen Betrieb mit Abschlämmvorgängen von knapp 96 % gemindert. Da die Ammoniakabscheidung nicht über den gesamten Abschlämmvorgang ihre komplette Wirkung verliert, sind diese Emissionsbetrachtungen als konservativ zu sehen.

In Abb. 29 ist der zeitliche Verlauf des pH-Werts und des Leitwerts der Monate Februar bis April 2020 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der pH-Wert bis auf wenige Unregelmäßigkeiten konstant bleibt. Die kurzen pH-Wert-Anhebungen während der jeweiligen Abschlammvorgänge des Waschwassers sind deutlich zu erkennen.

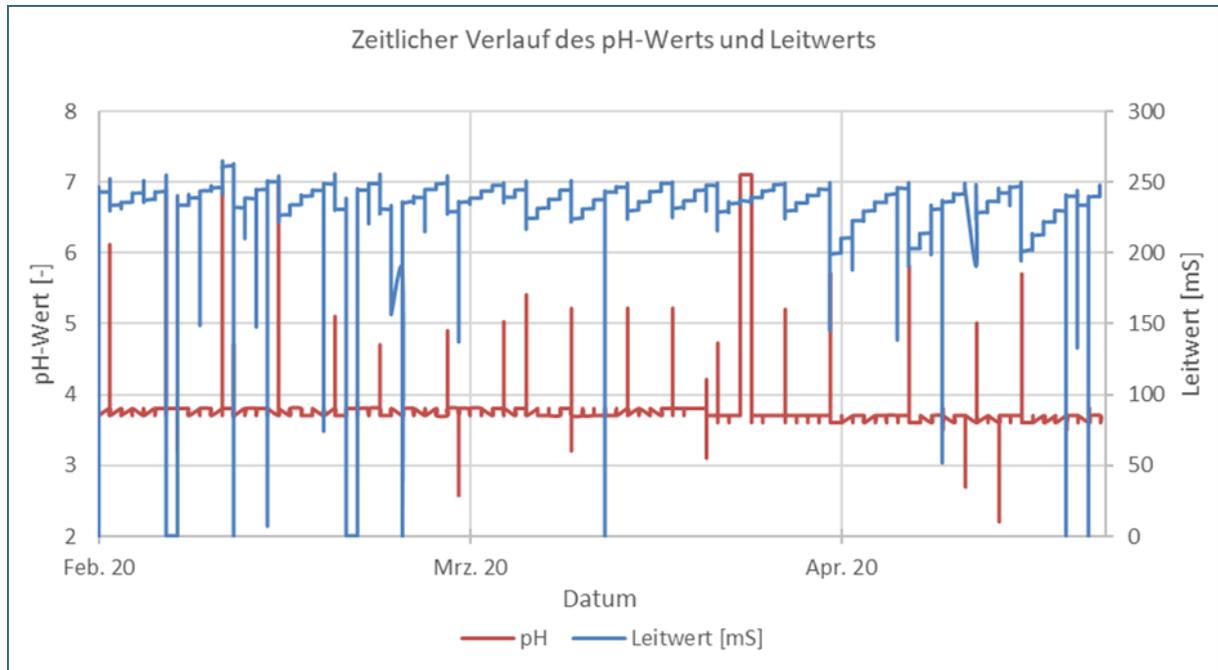


Abb. 29: Loggerdaten Chemowäscher Anlage A der Monate Februar bis April 2020

Der Graph des Leitwerts zeigt ein sich wiederholendes Muster. Der Leitwert steigt bis zur Abschlammung relativ konstant auf rund 250 mS und fällt danach um rund 20 mS. Der Verlauf des pH-Wertes und des Leitwertes entspricht über den beobachteten Zeitraum den Erwartungen. Es ist davon auszugehen, dass die chemische Abgasreinigungsanlage ordnungsgemäß betrieben worden ist und der Ammoniakabscheidegrad von mindestens 80 % gemäß Bescheid eingehalten wurde.

In der folgenden Abb. 30 ist eine Störung im Betrieb der chemischen Abgasreinigung genauer dargestellt.

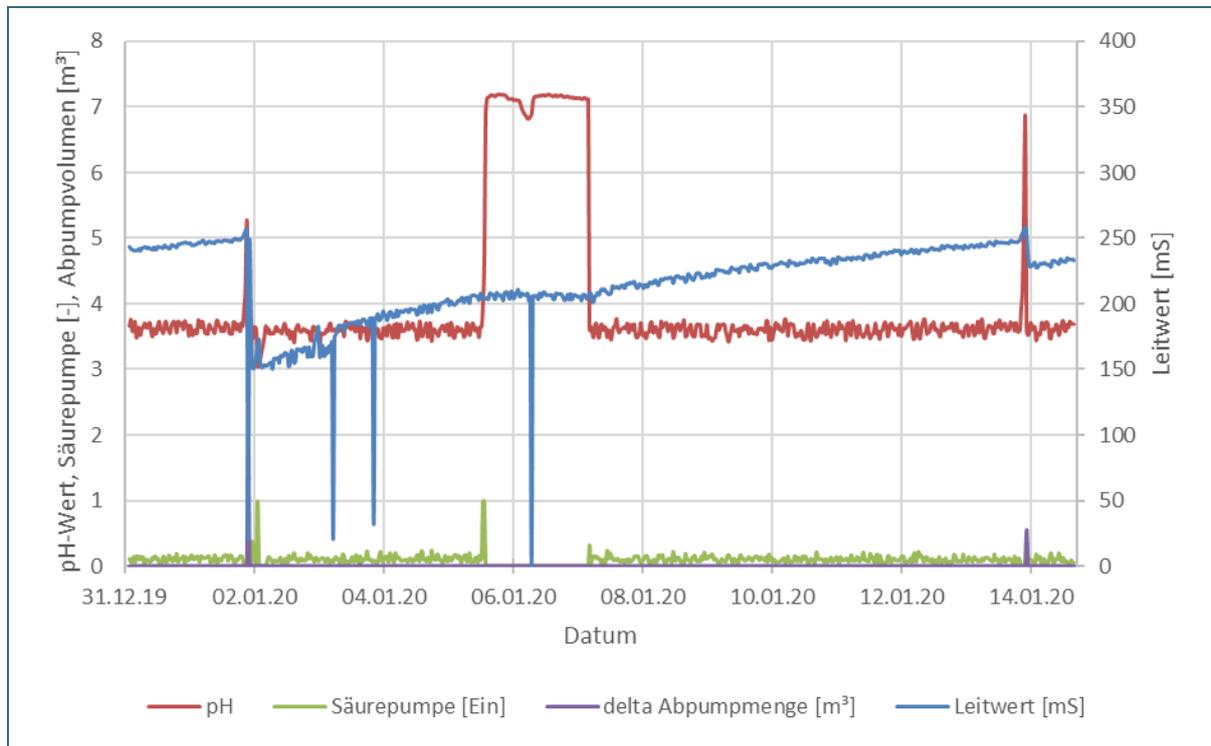


Abb. 30: Störung im Betrieb des Chemowäschers zwischen dem 02.01.2020 und dem 14.01.2020

Am 02.01.2020 fällt der Leitwert nach einem Abschlammvorgang ungewöhnlich stark auf rund 150 mS. Anschließend wird Schwefelsäure hinzugefügt, in der Folge fällt der pH-Wert kurz unter den betriebsüblichen Wert ab. Es dauert bis zum 13.01.2020, bis wieder die Abschlammsschwelle von 250 mS erreicht wird. Der pH-Wert steigt am 05.01.2020 von rund 3,8 auf über 7. Durch eine erhöhte Zudosierung der Schwefelsäure wird versucht, den pH-Wert wieder zu senken, was nicht gelingt. Anschließend fällt die Schwefelsäurezufuhr aus und der pH-Wert stellt sich für rund 38 Stunden auf rund 7 ein, bis die Schwefelsäurezufuhr wieder startet und der pH-Wert schlagartig fällt. Da der Leitwert während dieses Zeitraums annähernd konstant bleibt, wurde offensichtlich kein Ammoniak im Chemowäscher abgeschieden. Am 07.01.2020 wurde der Tausch des Schwefelsäuretanks dokumentiert. Der Anstieg des pH-Werts ist auf den Ausfall der Schwefelsäurezufuhr zurückzuführen.

**Fazit:** Insgesamt betrachtet, kann mit Hilfe des Datenloggers die Funktion der Abgasreinigung überprüft werden. Die Anlage wurde, abgesehen von der beschriebenen Störung, ordnungsgemäß betrieben. Daher ist davon auszugehen, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die Emissionsgrenzwerte nahezu über den gesamten betrachteten Zeitraum eingehalten wurden. Die Daten eignen sich grundsätzlich für die Anlagenüberwachung durch die Vollzugsbehörde. Die kontinuierliche Aufzeichnung von geeigneten Betriebsdaten des Wäschers über den Datenlogger wurde deshalb in den Auflagenvorschlägen (siehe Anlage) für die Vollzugsbehörde berücksichtigt.

#### Anforderung bezüglich Legionellen

Durch die kurzzeitige Anhebung des pH-Wertes fällt der Chemowäscher grundsätzlich unter den Anwendungsbereich der 42. Bundes-Immissionsschutzverordnung (Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider). Laut § 1 Absatz 2 Nummer 5 gilt die 42. Bundes-Immissionsschutzverordnung nicht für Nassabscheider, in denen das Nutzwasser dauerhaft einen pH-Wert

von 4 oder weniger oder einen pH-Wert von 10 oder mehr hat. Da die Anlage aber kurzzeitig den pH-Wert von 4 überschreitet, greift dieser Ausnahmetatbestand nicht, wobei die Gefahr der Legionellenbildung beziehungsweise eines größeren Ausbruchsgeschehens eher klein ist.

### **Befragung des Betreibers**

Um Arbeitsaufwand, Kosten und Betriebserfahrungen des Betreibers beim Betrieb der Gärresttrocknungsanlage besser einzuschätzen, wurde ein Fragebogen entwickelt und ausgewertet.

Der Betreiber der Gärrestaufbereitungsanlage gibt an, neben dem täglichen Arbeitsaufwand von zehn Minuten jede Woche eine Stunde an der Anlage zu arbeiten. Zu den regelmäßigen Aufgaben gehören allgemeine Kontrollen, der Wechsel der Schwefelsäure tanks, die Wartung des Separators und die Reinigung der Anlagenteile. Zusätzlich werden ungefähr alle 14 Tage Fehlsignale von Sensoren der chemischen Abgasreinigung ausgelöst. Um diese Störungen zu beheben, muss der Betreiber die Sensoren säubern oder austauschen (Arbeitsaufwand rund 30 min). Alle Arbeiten an der Anlage werden durch den Betreiber persönlich durchgeführt.

Laut Betreiber werden mit 3.800.000 kWh<sub>therm</sub>/a rund 80 % der verfügbaren Motorenabwärme für die Eindickung der Gärreste genutzt. Dabei wird eine durchschnittliche Trocknereffizienz von 0,7 Liter Gärrest pro kWh<sub>therm</sub> erreicht. Pro Jahr fallen durchschnittlich 200 m<sup>3</sup> Ammoniumsulfatlösung an. Durch die Ausbringung der Ammoniumsulfatlösung auf den eigenen Feldern spart sich der Betreiber nach eigenen Angaben mineralische Düngemittel im Wert von rund 10.000 €/a. Zudem schätzt der Betreiber, dass er sich durch den Betrieb der Gärrestaufbereitungsanlage anstatt der Errichtung eines neuen beziehungsweise größeren Gärrestlagers jährlich 30.000 € spart. Neben den finanziellen Aspekten durch die Förderung der Abwärmenutzung (KWK-Bonus) waren die geringeren Transportkosten, der niedrigere Lagerraumbedarf und die Umwandlung von organischem in mineralischen Dünger zusätzliche Gründe für die Anschaffung einer Gärrestaufbereitungsanlage. Insgesamt betrachtet, ist der Betreiber zufrieden mit der Anlagentechnik.

### **Gesamtbewertung**

Während der Emissionsmessung an Gärresttrocknungsanlage A wurden alle Grenzwerte eingehalten. Die chemische Abgasreinigungsanlage erzielte einen hohen Ammoniakabscheidegrad von rund 98 %. Gemäß dem Phasengleichgewicht entweicht am Anfang des diskontinuierlichen Trocknungsprozesses am meisten Ammoniak. Im Verlauf der Trocknungsdauer von 2 h nimmt der Rohgasgehalt um rund 80 % ab. Um eine hohe Ammoniakabscheidung zu gewährleisten, ist der pH-Wert des Waschwassers des Chemowäschers dauerhaft in einem Bereich zwischen 3 und 4 zu halten. Lediglich beim Abschlammvorgang wird kurzfristig auf eine weitere Zudosierung von Schwefelsäure verzichtet, um die Ammoniumsulfatlösung auf einen pflanzenverträglichen pH-Wert von ungefähr 6,5 zu bringen. Da dieser Vorgang nur etwa 3 % der Betriebszeit in Anspruch nimmt und ansonsten eine Abscheideleistung von deutlich über 90 % gewährleistet wird, kann selbst bei einer geminderten Abscheideleistung während des Abschlammvorgangs von einer bescheidgemäßen Ammoniakabscheidung von über 80 % pro Jahr ausgegangen werden. Auch die diesbezüglichen Anforderungen der TA Luft 2021 (Nummer 5.4.1.15: Emissionsminderungsgrad für Ammoniak von mindestens 90 %) können im bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage eingehalten werden.

Die Abscheidung von Ammoniak im Waschwasser wurde über eine Stickstoffbilanz des Waschwassers abgeschätzt. Der kurze Zeitraum der Emissionsmessung und die anzunehmenden Feststoffeinträge während der Trocknung erschwerten jedoch eine exakte Bilanzierung. Zudem waren im Rahmen der Bilanzierung keine genauen Angaben (zum Beispiel eingesetzte Waschwassermenge) verfügbar. Im Ergebnis wurde im Waschwasser jedoch mehr Stickstoff gefunden, als über die Ammoniakabscheidung zu erwarten war.

Die Betrachtung der Loggerdaten über einen längeren Zeitraum (01.10.2019 bis 02.09.2020) zeigt, dass der pH-Wert die meiste Zeit im vorgesehenen Bereich lag. Die Steuerung der Abschlammung über den Leitwert des Waschwassers war ebenfalls plausibel nachzuverfolgen. Die Anlage lief dauerhaft – mit wenigen Störungen – im bestimmungsgemäßen Betrieb.

Der Betreiber der Gärrestrocknungsanlage A hat die Lieferungen der Schwefelsäure in seinem Betriebstagebuch festgehalten. Um theoretisch einen Ammoniakabscheidegrad von mindestens 80 % zu erreichen, ist die angegebene Lieferung eines neuen IBCs ungefähr alle 23 Tage ausreichend.

### **Erkenntnisse für den Vollzug**

Um eine dauerhafte Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes garantieren zu können, sind die kontinuierliche Mengenerfassung der zudosierten Schwefelsäure beziehungsweise die stabile pH-Wert-Regelung und die pH-Wert-Dokumentation über das gesamte Jahr zielführend.

Die graphische Darstellung der Loggerdaten erleichterte es bei der Anlage A, den ordnungsgemäßen Betrieb zu überprüfen und Störungen zu erkennen. Damit konnte der Betreiber dokumentieren, dass die Abgasreinigung dauerhaft effektiv betrieben wird. Dies ist auch für Behörden nachvollziehbar.

Ein dauerhafter bestimmungsgemäßer Betrieb der Abgasreinigungsanlage sollte deshalb bei allen Anlagen mit Chemowäscher über die elektronische Datenspeicherung des pH-Wertes, des Leitwertes und des Schwefelsäureverbrauchs nachgewiesen werden. Diese Daten können vor Ort mit einem USB-Stick zum Beispiel bei der wiederkehrenden Messung oder bei einer Überwachung durch die Vollzugsbehörde ausgelesen und stichprobenhaft überprüft werden. Zudem ist es auch möglich, direkt am Bildschirm des Datenloggers sich rückwirkend die Daten anzeigen zu lassen.

Zusätzlich sollten die Belege des Schwefelsäureeinkaufs aufbewahrt werden. Durch einfache stöchiometrische Berechnungen kann abgeschätzt werden, ob ausreichend Schwefelsäure für eine hinreichende Ammoniakabscheidung im Chemowäscher eingekauft wurde.

## **6.3 Emissionsmessungen Anlage B (Bandrockner)**

### **Beschreibung der Anlage B**

Betreiber B betreibt eine Biogasanlage mit drei BHKW-Motoren und einer gesamten Feuerungswärmeleistung von 2,51 MW. Als Gärsubstrat werden Rinder- und Schweinegülle sowie nachwachsende Rohstoffe wie Maissilage, Grassilage, Ganzpflanzensilage (GPS) und Getreidekörner eingesetzt. Der Betreiber nutzt seit 2015 einen Teil der Abwärme der Motoren, um täglich zwischen 12 und 15 Tonnen Gärrest in einem kontinuierlich beschickten Bandrockner (Betriebszeit 8.760 h/a) zu trocknen. Diese Gärrestaufbereitungsanlage (vergleichbar Abb. 31) wird sowohl direkt durch das Einleiten von Abgasen der BHKW-Motoren als auch indirekt über einen Wärmetauscher mit Wärme versorgt. Mit der restlichen Abwärme versorgt der Betreiber mehrere Häuser in der Umgebung.



Abb. 31: Kombiniertes Trocknungsverfahren (direkt mit BHKW-Abgas und indirekt über Wärmetauscher) vergleichbar der Anlage B nach *NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH*

Der Gärrest (rund 6 % TS) wird mit einer Pumpe in einen Vorlagebehälter mit rund 1 m<sup>3</sup> Volumen gefördert. Die Pumpe wird über Voll- und Leermelder gesteuert. Unter dem Auslaufstutzen des Vorlagebehälters befindet sich ein Schieber-Dosiersystem, durch welche ein Schneckenmischapparat intervallmäßig mit Gärrest beschickt wird. Gleichzeitig wird ein Teilstrom des getrockneten Gärrestes (rund 98 % TS) als Trägerstoff in den Schneckenmischapparat zurückgeführt und untergemischt.

Die Gärrestmischung (rund 78 % TS) wird mit einer Verteilschnecke einem im Trockner integrierten Kratzbodenförderer zugeführt. Der Kratzbodenförderer dosiert das Substrat in der gewünschten Schüttdicke (rund 10–15 cm) gleichmäßig über die gesamte Breite des Trocknerbandes. Das Trocknerband ist luftdurchlässig und wird von der Trocknungsluft von oben nach unten durchströmt. Die Trocknung des Gärprodukts erfolgt konvektiv mit Warmluft. Dazu wird Frischluft über einen Wärmetauscher auf rund 50–60 °C vorgewärmt. Als Wärmequelle dient die Abwärme der BHKW-Motoren der Biogasanlage. Durch Beimischung von bis zu rund 250 °C heißen Abgasen aus dem BHKW wird die vorgewärmte Luft auf 100–110 °C erhitzt. Die Beimischung erfolgt in einer Mischkammer. Die Regelung der Mischlufttemperatur erfolgt über die Abgasmenge des BHKW, welche durch eine motorisch betätigte Rauchgasklappe stufenlos eingestellt wird. Ein Mischluftventilator verteilt die Mischluft mit leichtem Überdruck gleichmäßig in der Trocknungszone. Das Trocknerband transportiert die Substratschicht kontinuierlich durch die Trocknungszone. Die feuchte Luft wird mittels eines Abgasventilators über zwei Abgaskanäle aus dem Trockner (vorderer und hinterer Bereich der Trocknungszone) gesaugt und jeweils der Abgasreinigung (Chemowäscher) zugeführt.

Am Ende des Trocknerbandes hat das Produkt einen Trockensubstanzgehalt von 98 % erreicht und fällt in die Austragsschnecke. Von der Austragsschnecke gelangt der getrocknete Gärrest (rund 60 kg/h) über ein Steigförderband zur Dosier- und Verladeschnecke. Diese fördert so viel getrockneten Gärrest in den Schneckenmischer zurück, dass bei Zudosierung des flüssigen Gärrestes eine optimale Nassgutkonsistenz erreicht wird. Die verbleibende, kleinere Menge getrockneter Gärrest wird der Lagerung zugeführt.

## Abgasreinigung / Ammoniakabscheidung

Bei der Abgasreinigungsanlage handelt es sich um einen einstufigen Chemowäscher. Das mit Ammoniak und Staub belastete Trocknerabgas wird in den Abgaswäscher eingeleitet und durchströmt die Waschpakete, in denen neben der Ammoniak- auch eine Staubabscheidung stattfindet. In der Säurestufe werden mehrere Lamellenpakete mittels Düsen mit einer Umlaufflüssigkeit besprüht. Diese besteht aus Wasser, das mit 96 %iger Schwefelsäure nach Angaben des Herstellers auf einen pH-Wert von 3,5 eingestellt werden sollte. Die Besprühung der Lamellenpakete erfolgt in kurzzeitigen Intervallen, wodurch die reine Betriebszeit der Pumpe rund 15 Minuten pro Stunde beträgt. Durch die geregelte Schwefelsäurezufuhr soll der pH-Wert konstant gehalten werden. Ein Teil der umlaufenden Flüssigkeit, bestehend aus saurem Waschwasser, Ammoniumsulfat und Staubpartikeln, wird beim Erreichen eines Leitwerts von 180 mS abgeschlämmt und dem Vorlagebehälter des Gärrestrockners zugeführt. Somit wird die Ammoniumsulfatlösung am Ende dem frischen Gärrest zugeführt, der Stickstoff verbleibt im Gärprodukt. Flüssige ASL fällt deshalb nicht an.

## Durchführung der Emissionsmessungen

Es wurden jeweils vier Einzelmessungen über je 30 Minuten im Rohgas vor dem Chemowäscher und im Reingas im Abgaskamin der Gärresttrocknungsanlage durchgeführt. Ermittelt wurden neben Ammoniak, Gesamtkohlenstoff, Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff auch Formaldehyd. Im Reingas wurden zusätzlich Gesamtstaub, Methan, Geruch und Stickstoffoxide gemessen. Hintergrund für die Erweiterung des Messumfangs im Vergleich zur Anlage A war die Fragestellung, ob durch die Abgasreinigung auch Schadstoffe aus den BHKW-Abgasen, wie zum Beispiel Formaldehyd, abgeschieden werden. Zusätzlich wurde der Gesamtkohlenstoffgehalt im Abgas der BHKW erfasst, um den Anteil der Motoremissionen am Gesamtkohlenstoffgehalt im Trocknerabgas beurteilen zu können. Außerdem wurden der Gärrest-Input, der Gärrest-Output sowie das Waschwasser zu Beginn und am Ende der Messung auf den Stickstoffgehalt ( $N_{\text{ges}}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Nitrat-N) im Hinblick auf eine Stickstoffbilanzierung analysiert.

Die Messstelle für das Reingas befand sich in einem senkrechten Abgaskamin unter der Hallendecke in rund 9 m Höhe (siehe Abb. 32). Der Trockner hat zwei getrennte Absaugstellen für das Trocknungsgas. Eine Abzugsstelle befindet sich im vorderen Bereich des Trockners, die andere Abzugsstelle im hinteren Bereich des Trockners. Beide Abgasströme werden dem Wäscher getrennt zugeführt. Deshalb wurden die Rohgasemissionen jeweils in den beiden Abgasströmen gemessen. Die Messungen 1 und 2 erfolgten im Rohgas des hinteren Bereichs am Eingang zum Wäscher (siehe Abb. 33). Die Messungen 3 und 4 erfolgten im Rohgas des vorderen Bereichs am Eingang zum Wäscher. Da die Zugabe des frischen Substrates im vorderen Teil des Trockners erfolgt, waren bei den Messungen 3 und 4 höhere Ammoniakkonzentrationen zu erwarten.



Abb. 32: Reingasmessstelle Kamin Anlage B nach Betreiber Anlage B (2020)



Abb. 33: Rohgasmessstelle vor Wäscher Anlage B nach Betreiber Anlage B (2020)

Am Messtag lief die Anlage mit betriebsüblicher Auslastung. Eine Abschlammung des Washwassers fand während der Messung nicht statt.

### **Ergebnisse der Emissionsmessungen**

Die Messergebnisse von Rohgas und Reingas sind Tab. 8 und Tab. 9 zu entnehmen. Die Messergebnisse des Gesamtkohlenstoffgehalts im BHKW-Abgas sind in Tab. 10 zusammengestellt (jeweils ohne Berücksichtigung der jeweiligen Messunsicherheiten).

Tab. 8: Messergebnisse im Rohgas Gärresttrocknungsanlage B. Die Messungen 1 und 2 erfolgten am Verbindungsstück zwischen hinterem Teil des Trockners und Wäscher. Die Messungen 3 und 4 wurden im Verbindungsstück zwischen vorderem Teil des Trockners und Wäscher durchgeführt

| Luftschadstoff             |                      | Rohgasmessung<br>im hinteren Abzug<br>des Trockners |         | Rohgasmessung<br>im vorderen Abzug<br>des Trockners |          | Grenzwert TA Luft 2021 |                 |
|----------------------------|----------------------|---|---------|---|----------|------------------------|-----------------|
|                            |                      | 1   | 2       | 3   | 4        |                        |                 |
| <b>Ammoniak</b>            |                      |   |         |   |          |                        |                 |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 3,8   | 5,3     | 81,6  | 102,9    | 10                     | (Nr. 5.4.1.15)  |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,07  | 0,10    | 1,56  | 1,97     | 0,15                   | (Nr. 5.2.4)     |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>   |                      |   |         |   |          |                        |                 |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 15,1  | 14,5    | 15,4  | 14,4     | 50                     | (Nr. 5.2.5)     |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,29  | 0,28    | 0,30  | 0,27     | 0,50                   | (Nr. 5.2.5)     |
| <b>Formaldehyd</b>         |                      |   |         |   |          |                        |                 |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 1,3   | 1,3     | 0,3   | 0,3      | 5                      | (Nr. 5.2.7.1.1) |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,02  | 0,02    | 0,005   | 0,005    | 0,0125                 | (Nr. 5.2.7.1.1) |
| <b>Schwefeldioxid</b>      |                      |   |         |   |          |                        |                 |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,6  | << 0,7  | << 0,6  | << 0,7   | 350                    | (Nr. 5.2.4)     |
| Massenstrom                | [kg/h]               | << 0,01   | << 0,01 | << 0,01   | << 0,01  | 1,8                    | (Nr. 5.2.4)     |
| <b>Schwefelwasserstoff</b> |                      |   |         |   |          |                        |                 |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 0,01  | 0,01    | 0,01  | << 0,001 | 3                      | (Nr. 5.2.4)     |
| Massenstrom                | [g/h]                | 0,14  | 0,16    | 0,14  | << 0,02  | 15                     | (Nr. 5.2.4)     |

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Tab. 9: Messergebnisse im Reingas Gärresttrocknungsanlage B

| Luftschadstoff   |                                    | 1        | 2        | 3        | 4        | Grenzwert TA Luft 2021 |                 |
|--|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------|
|  |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| <b>Ammoniak</b>  |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 2,1      | 2,4      | 0,2      | 3,5      | 10                     | (Nr. 5.4.1.15)  |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,04     | 0,05     | 0,004    | 0,07     | 0,15                   | (Nr. 5.2.4)     |
| <b>Gesamtstaub</b>                                       |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 0,7      | 0,5      | 0,9      | 0,8      | 10                     | (Nr. 5.4.1.15)  |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,01     | 0,01     | 0,02     | 0,01     | 0,20                   | (Nr. 5.2.1)     |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>                                 |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 13,9     | 13,8     | 12,7     | 12,3     | 50                     | (Nr. 5.2.5)     |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,26     | 0,26     | 0,24     | 0,23     | 0,50                   | (Nr. 5.2.5)     |
| <b>Methan</b>  |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 13,9     | 12,5     | 12,9     | 12,1     |                        |                 |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,27     | 0,24     | 0,25     | 0,23     |                        |                 |
| <b>Formaldehyd</b>                                       |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 0,7      | 0,7      | 2,3      | 0,6      | 5                      | (Nr. 5.2.7.1.1) |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,01     | 0,01     | 0,04     | 0,01     | 0,0125                 | (Nr. 5.2.7.1.1) |
| <b>Geruch</b>  |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [GE <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> ] | 280      | 280      | 270      | -        | 500                    | (Nr. 5.4.8.6.2) |
| Massenstrom  | [MGE <sub>E</sub> /h]              | 6,1      | 6,1      | 5,9      | -        |                        |                 |
| <b>Stickstoffoxide,<br/>angegeben als NO<sub>2</sub></b> |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 15,4     | 16,1     | 14,8     | 13,8     | 350                    | (Nr. 5.2.4)     |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,29     | 0,31     | 0,28     | 0,26     | 1,8                    | (Nr. 5.2.4)     |
| <b>Schwefeldioxid</b>                                    |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | << 0,7   | << 0,6   | << 0,7   | << 0,7   | 350                    | (Nr. 5.2.4)     |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | << 0,01  | << 0,01  | << 0,01  | << 0,01  | 1,8                    | (Nr. 5.2.4)     |
| <b>Schwefelwasserstoff</b>                               |                                    |          |          |          |          |                        |                 |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | << 0,001 | << 0,001 | << 0,001 | << 0,001 | 3                      | (Nr. 5.2.4)     |
| Massenstrom  | [g/h]                              | << 0,02  | << 0,02  | << 0,02  | << 0,02  | 15                     | (Nr. 5.2.4)     |

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Tab. 10: Messergebnisse BHKW Anlage B

| Luftschadstoff           |                      | 1     | 2     | 3     | 4     |
|--------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Gesamtkohlenstoff</b> |                      |       |       |       |       |
| Konzentration            | [mg/m <sup>3</sup> ] | 277,8 | 277,0 | 268,5 | 271,2 |
| Massenstrom              | [kg/h]               | 0,62  | 0,62  | 0,60  | 0,60  |

Der Volumenstrom betrug durchschnittlich 19.100 m<sup>3</sup>/h im Roh- und Reingas.

#### Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

**Ammoniak:** Im Rohgas ist ein deutlicher Unterschied in der Höhe der Ammoniakkonzentration zwischen den beiden Rohgasmessstellen festzustellen. Wie aus Abb. 34 deutlich wird, wurde Ammoniak hauptsächlich im vorderen Teil des Trockners (Eingangsbereich von Frischmaterial) emittiert (Halbstundenmittelwert Nummer 3 und 4 81,6 mg/m<sup>3</sup> und 102,9 mg/m<sup>3</sup>). Im hinteren Teil des Trockners (Abwurfbereich mit getrocknetem Material) lagen die Rohgasmessungen bei 3,8 mg/m<sup>3</sup> und 5,3 mg/m<sup>3</sup>. Erwartungsgemäß im vorderen Bereich des Trocknungsbandes der Trocknung am meisten Ammoniak freigesetzt.

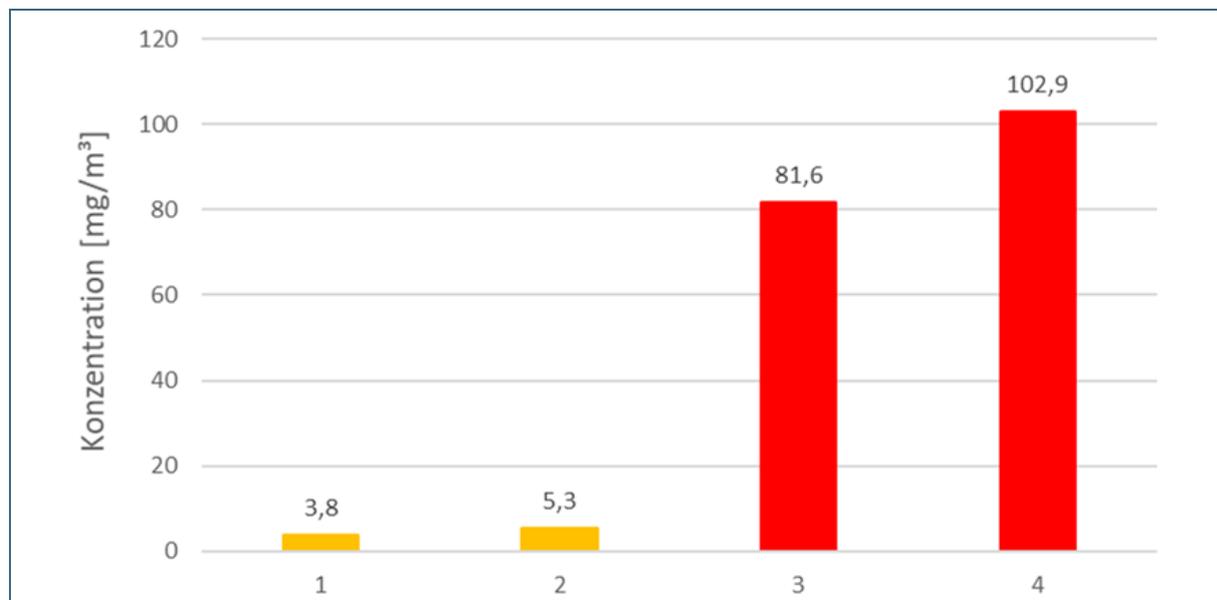


Abb. 34: Ammoniakgehalte im Rohgas der Anlage B. Die Messungen 1 und 2 erfolgten am hinteren Teil des Trockners (gelb). Die Messungen 3 und 4 wurden im vorderen Teil durchgeführt (rot)

Die Emissionen im Reingas lagen mit maximal 3,5 mg/m<sup>3</sup> insgesamt auf einem niedrigen Niveau (siehe Abb. 35). Der Messwert 3 (0,2 mg/m<sup>3</sup>) wurde vom Messinstitut als unplausibel bewertet, da ein Minderbefund nicht ausgeschlossen werden konnte. Die Berechnung des Ammoniakabscheidegrades erfolgte deshalb für das Rohgas über den Mittelwert aller vier Halbstundenmittelwerte und für das Reingas über den Mittelwert der Messwerte 1, 2 und 4. Der sich daraus ergebende Abscheidegrad von 94,5 % zeigt, dass die Vorgaben der TA Luft 2021 an den Emissionsminderungsgrad für Ammoniak von 90 % eingehalten werden.

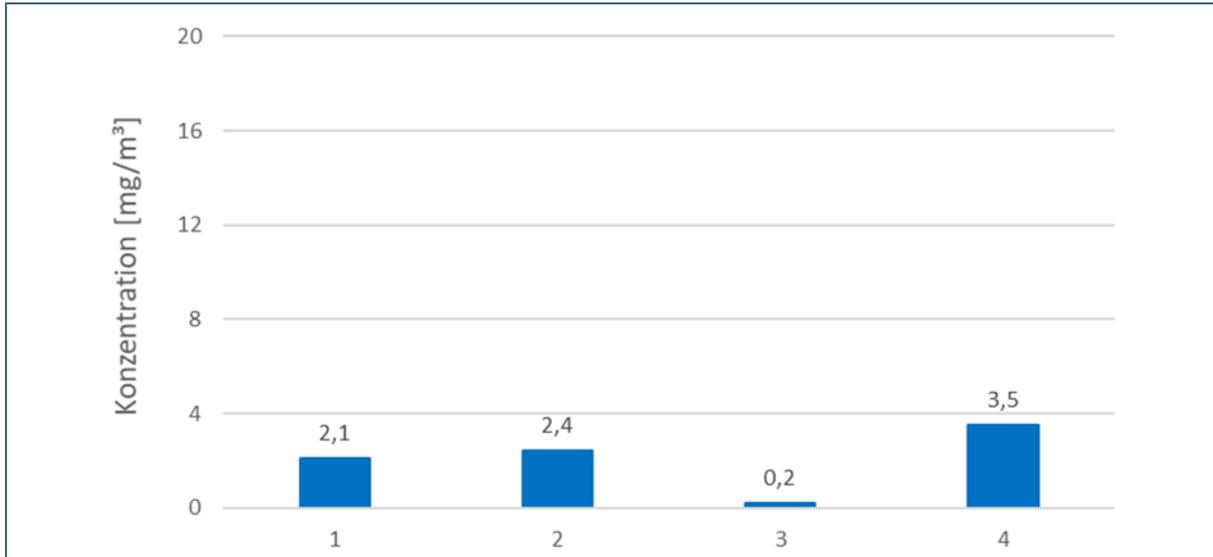


Abb. 35: Ammoniakgehalte im Reingas der Anlage B. Messwert 3 wurde vom Messinstitut als unplausibel bewertet

Insgesamt sind die ermittelten Messergebnisse – mit Ausnahme der Reingasmessung 3 – plausibel und entsprechen weitgehend den Erwartungswerten für einen ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb während der Emissionsmessung. Ohne Abgasreinigung würden pro Jahr bei einem angenommenen Betrieb von 8760 h rund 8.100 kg (0,924 kg/h) Ammoniak emittiert, was das grundsätzlich hohe Ammoniakemissionspotenzial von Trocknungsanlagen für Gärreste belegt. Sofern die Abgasreinigung dauerhaft ordnungsgemäß betrieben wird, werden rund 450 kg/a (0,051 kg/h) über den Kamin emittiert. Daraus ergibt sich ebenfalls ein durchschnittlicher jährlicher Minderungsgrad von 94,5 %.

**Gesamtstaub:** Mit einer Konzentration von maximal 0,9 mg/m<sup>3</sup> an Staub im Reingas lagen die Gesamtstaubemissionen auf niedrigem Niveau. Gemäß TA Luft 2002 Nummer 5.2.1 liegt der Gesamtstaubemissionswert bei 10 mg/m<sup>3</sup>. Die gemessenen Staubemissionen entsprechen einem ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb.

**Gesamtkohlenstoff:** Die Reingasemissionen an Gesamt-C (maximal 13,9 mg/m<sup>3</sup>) sind geringfügig niedriger als die Konzentrationen im Rohgas (maximal 15,4 mg/m<sup>3</sup>). Der Emissionsgrenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> nach der Trocknung wurde eingehalten. Bei der Messung des BHKWs wurde ein maximaler Gesamt-C-Massenstrom von 0,617 kg/h festgestellt. Davon wurden während der Messung 44,1 % (0,272 kg/h) über die Rauchgasklappe in die Trocknung geleitet. Im Reingas der Trocknung liegt der maximale Gesamt-C-Massenstrom bei 0,265 kg/h. Somit stammen die Gesamt-C-Emissionen vollständig aus den Abgasen des BHKWs. Es kann davon ausgegangen werden, dass der flüssige Gärrest weitestgehend ausgegast war (insbesondere Methan) und somit die erforderliche Verweilzeit des Substrats im Fermenter ausreichend war.

**Methan:** Die gemessenen Methanemissionen im Reingas entsprechen mit maximal 13,9 mg/m<sup>3</sup> nahezu vollkommen den Gesamtkohlenstoffemissionen.

**Formaldehyd:** Die Formaldehydemissionen liegen auf niedrigem Niveau. Der maximale Wert von 2,3 mg/m<sup>3</sup> im Reingas scheint nach Einschätzung des Messinstitutes ein Ausreißer zu sein; die anderen Halbstundenmittelwerte im Reingas lagen bei 0,6 und 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich zu den Rohgaskonzentrationen liegt dieser Wert deutlich über dem Rohgasmittel von 0,8 mg/m<sup>3</sup>. Eine Reduzierung der Formaldehydemissionen über den Chemowäscher konnte nicht festgestellt werden.

**Geruch:** Die Emissionen für Geruch im Reingas lagen bei maximal 280 GE/m<sup>3</sup> auf niedrigem Niveau. In der Biogasanlage des Betreibers werden neben nachwachsenden Rohstoffen auch Rinder- und Schweinegülle eingesetzt. Der im Bescheid festgelegte Grenzwert von 100 GE/m<sup>3</sup> konnte nicht eingehalten werden. Nach Aussage der Vollzugsbehörde wurden für die Grenzwertfestlegung die vom Hersteller genannten Daten herangezogen. Orientiert an der TA Luft 2021 wäre jedoch allenfalls ein Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> heranzuziehen. Da in der Biogasanlage keine biogenen Abfälle in der Vergärung eingesetzt werden, könnte auf eine Geruchsemissionsbegrenzung verzichtet werden.

**Stickstoffoxide:** Im Reingas wurden mit maximal 16,1 mg/m<sup>3</sup> niedrige Emissionen an Stickstoffoxiden gemessen. Es ist davon auszugehen, dass die Stickstoffoxidemissionen ausschließlich aus dem Verbrennungsprozess des BHKW stammen. Bei der Messung an Anlage C wird der Verlauf der Stickstoffoxidemissionen genauer betrachtet (siehe Kapitel 6.4).

**Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff:** Schwefeldioxid konnte im Rohgas messtechnisch nicht erfasst werden. An Schwefelwasserstoff konnten im Rohgas nur sehr geringe Konzentrationen von 0,01 mg/m<sup>3</sup> festgestellt werden. Der vierte Messwert lag unter der Erfassungsgrenze des Verfahrens. Im Reingas lagen beide Stoffe unter den jeweiligen Erfassungsgrenzen.

### Stickstoffbilanzierung

Bei der Trocknung auf einen sehr hohen Trockensubstanzgehalt (98,3 %) entweichen neben Wasser vor allem Ammoniak und Staub. Der Großteil des Ammoniaks reagiert im Chemowäscher mit Schwefelsäurezugabe zu Ammoniumsulfat. Das mit Ammoniumsulfat angereicherte Waschwasser wird dem Frischsubstrat im Vorlagebehälter beigemischt. Damit wird das bei der Trocknung entwichene Ammoniak als Ammoniumsulfat wieder dem zu trocknenden Gärrest zugeführt. Daher ist im Regelbetrieb davon auszugehen, dass im Trockenprodukt im zeitlichen Durchschnitt fast (bis auf die geringen Ammoniakverluste über die Abgasemissionen) die gleichen Ammoniumkonzentrationen vorliegen wie im Frischsubstrat (jeweils bezogen auf die Trockenmasse). Um die Ammoniakaufnahme im Waschwasser möglichst genau bestimmen zu können, erfolgte während der Messung keine Abschlämzung und damit keine Rückführung von Ammoniumsulfat in den zu trocknenden Gärrest. Die Stoffflüsse in der Gärresttrocknungsanlage sind in Abb. 36 dargestellt.

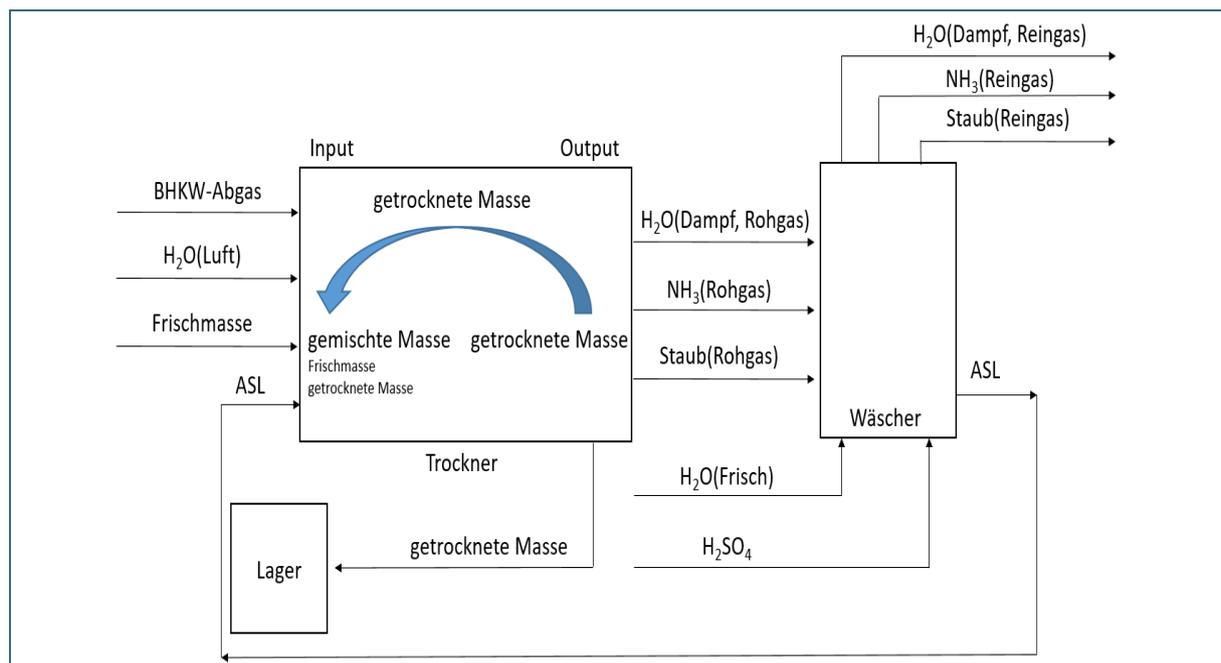


Abb. 36: Stoffflüsse in Gärresttrocknungsanlage B

### Auswertung der Stickstoffbilanz

Während der Emissionsmessung wurden jeweils zwei Proben des unbehandelten Gärrestes und des getrockneten Gärrestes entnommen und analysiert. Die Proben des Eingangsmaterials wurden vor der Trocknung direkt aus dem Gärrestlager entnommen. Die Proben des getrockneten Gärrestes wurden am Ende des Trocknerbandes vor dem Abwurf gezogen. Zusätzlich wurden zwei Proben des gemischten Gärrestes vor Trocknungsbeginn vom hinteren Teil der Mischschnecke gezogen.

Eine Mischprobe der gezogenen Proben wurden von einem externen Institut untersucht. Die folgende Tab. 11 zeigt den Mittelwert der Ergebnisse der Materialanalysen und die auf Trockenmasse (TM) umgerechneten Gehalte.

Tab. 11: Probenanalyse Gärresttrocknung B

| Materialanalyse                          | TS-Gehalt [%] | N <sub>ges</sub> OS [kg/t] | NH <sub>4</sub> -N OS [kg/t] | Nitrat-N OS [kg/t] | N <sub>ges</sub> TM [kg/t] | NH <sub>4</sub> -N TM [kg/t] | Anteil NH <sub>4</sub> -N TM an N <sub>ges</sub> TM [%] |
|--|---------------|----------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------|---|
| Frischprobe vor Eindickung (Input)       | 6,05          | 3,85                       | 2,65                         | < 0,100            | 63,64                      | 43,80                        | 68,8  |
| Mischprobe vor Trocknung                 | 78,6          | 23,8                       | 0,24                         | 0,678              | 30,28                      | 0,31                         | 1,0   |
| Mischprobe nach Trocknung (Output)       | 98,3          | 29,1                       | 0,19                         | 1,060              | 29,60                      | 0,19                         | 0,64  |
| Bilanz Mischprobe vor und nach Trocknung | + 19,7        | + 5,3                      | - 0,05                       | + 0,38             | - 0,68                     | - 0,12                       | - 0,36  |

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass während der Trocknung der Trockensubstanzgehalt um 19,7 % gestiegen ist. Der Verlust an Gesamtstickstoff in der Mischprobe vor und nach der Trocknung (N<sub>ges</sub> TM) im Trocknungsprozess lag bei 0,68 kg/t, der Verlust an Ammoniakstickstoff (NH<sub>4</sub>-N TM) lag dagegen nur bei 0,12 kg/t. Die Abnahme an Ammoniumstickstoff sollte der Abnahme des Gesamtstickstoffs annähernd entsprechen. Die gegenüber der Frischprobe (Input) geringen Ammoniumstickstoffgehalte in den beiden Mischproben beziehungsweise deren geringe Ammoniumstickstoffanteile am Gesamtstickstoff sind nicht plausibel. Die deutlichen Abweichungen können möglicherweise auf die Heterogenität von Feststoffgemischen zurückgeführt werden.

Auffällig ist, dass der Nitratstickstoffgehalt der Frischprobe unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt und in der Mischprobe vor der Trocknung (0,68 kg/t OS) und in der Mischprobe nach dem Trocknungsvorgang (1,06 kg/t OS) Nitratstickstoff festgestellt werden konnte. Eine Erklärung ist, dass die Stickstoffoxide des BHKW-Abgases zu Nitrat reagiert haben.

Im Rahmen der Stickstoffbilanzierung wurden zu Beginn und am Ende der Emissionsmessung (Dauer rund 3 Stunden) jeweils eine Probe des Waschwassers aus dem Chemowäscher aus dem Sumpf gezogen. Neben der Bestimmung des Gesamtstickstoffgehaltes wurde der Gesamtschwefelgehalt ermittelt, um die Zugabe der Schwefelsäure während des Bilanzzeitraums zu erfassen. Die Analyseergebnisse sind in Tab. 12 wiedergegeben. Da das genaue Volumen des umlaufenden Waschwassers nicht ermittelt werden konnte, lässt sich die im Waschwasser aufgenommene Menge an Ammoniak nicht quantifizieren. Eine Stickstoffbilanzierung war an der Anlage insgesamt nicht möglich.

Tab. 12: Probenanalyse Waschwasser Gärresttrocknung B

| Probe                    | TS [%] | pH [-] | Dichte [g/l] | N <sub>ges</sub> OS [kg/t] | S <sub>ges</sub> OS [kg/t] | N <sub>ges</sub> TM [kg/t] | S <sub>ges</sub> TM [kg/t] |
|--------------------------|--------|--------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Waschwasser vor Messung  | 6,8    | 2,1    | 1.030        | 6,3                        | 9,1                        | 92,6                       | 133,8                      |
| Waschwasser nach Messung | 6,5    | 5,0    | 1.030        | 7,6                        | 10                         | 116,9                      | 153,8                      |
| Bilanz                   | - 0,3  | + 2,9  | 0            | + 1,3                      | + 0,9                      | + 24,3                     | + 20,0                     |

### Überprüfung der dauerhaften Funktion des Wäschers

Auffällig war, dass der pH-Wert des analysierten Waschwassers im Zeitraum der Emissionsmessung trotz Zudosierung von Schwefelsäure deutlich von 2,1 auf 5,0 anstieg (Tabelle 12). Das Auslesen des Datenloggers des Chemowäschers über einen Zeitraum von vier Wochen, einschließlich des Messzeitraums, zeigte dagegen einen konstanten pH-Wert von 2,1 an. Das zeigt, dass zum einen der pH-Wert offensichtlich nicht korrekt gemessen wurde und der Wäscher nicht wie vom Hersteller vorgesehen bei konstanten pH-Wert von 3,5 betrieben wurde. Mögliche Ursachen für die falsche pH-Anzeige sind eine defekte pH-Sonde, eine falsche Positionierung der pH-Sonde oder Verkrustungen. Das Ansteigen des pH-Wertes während der Messungen zeigt, dass die Regelung des Wäschers offensichtlich nicht ausreichend funktionierte.

**Fazit:** Durch den Vergleich der Proben des Waschwassers vor und nach der Emissionsmessung konnte zwar eine qualitative Stickstoffabscheidung nachgewiesen werden. Die Ammoniakabscheidung ist jedoch eher auf den zu Beginn der Emissionsmessung eingestellten niedrigen pH-Wert zurückzuführen. Dies lassen auch die relativ hohen Schwefelgehalte in der Trockenmasse vermuten. Insgesamt muss die Regelung des Chemowäschers optimiert werden, um die dauerhafte effektive Funktion sicherzustellen. Eine Rückverfolgbarkeit der dauerhaft effektiven Funktion des Wäschers war nicht möglich.

### Befragung des Betreibers

Der Betreiber hat an der Befragung nicht mitgewirkt.

### Gesamtbewertung

Die Gärresttrocknungsanlage B konnte während der Emissionsmessung alle Grenzwerte einhalten. Dabei wurde von der chemischen Abgasreinigung eine Ammoniakabscheideleistung von rund 95 % erreicht. Nach Sichtung der Aufzeichnungen des Datenloggers und der Anzeige der pH-Sonde haben sich jedoch Zweifel ergeben, ob die Abgasreinigung im bestimmungsgemäßen automatischen Betrieb lief. Verschiedene Anzeichen deuten darauf hin, dass eine zusätzliche Säurezugabe vor dem Messtag stattfand. Damit waren die Ammoniakemissionen am Messtag voraussichtlich geringer, als das ohne die zusätzliche Säurezugabe der Fall gewesen wäre. Auch bei der Erstbesichtigung war die Abgasreinigungsanlage nicht in Betrieb, da nach Aussage des Betreibers eine Wartung durchgeführt wurde. Insgesamt wäre es wünschenswert gewesen, wenn der Betreiber bei der Klärung von offenen Fragen im Rahmen des Projektes mehr Engagement gezeigt hätte. Das LfU hat deshalb angeboten, die Vollzugsbehörde bei der nächsten Anlagenüberwachung zu unterstützen.

### Erkenntnisse für den Vollzug

Die Untersuchungen an der Gärresttrocknungsanlage B haben gezeigt, dass eine wiederkehrende Messung (alle drei Jahre) nur den Messtag widerspiegelt und keinen Aufschluss über den dauerhaften Betriebszustand der Anlage gibt. Im vorliegenden Fall war aufgrund der vorliegenden Datenaufzeichnungen rückwirkend nicht nachverfolgbar, ob der Wäscher dauerhaft bestimmungsgemäß betrieben wurde. Auch zeigte sich, dass die Regelung des Wäschers nicht wie vorgesehen funktionierte.

Um eine dauerhafte Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes sicherzustellen, ist eine stabile pH-Wert-Regelung des Chemowäschers zur Sicherstellung des bestimmungsgemäßen Betriebs notwendig. Für den Nachweis eines ordnungsgemäßen Betriebs ist die Erfassung der eingesetzten Schwefelsäuremenge unerlässlich. Zur Überprüfung, inwieweit die relevanten Überwachungsparameter wie pH-Wert, Leitwert und Schwefelsäureverbrauch dauerhaft eingehalten werden, sollte eine elektronische Datenspeicherung erfolgen. Die Speicherung von Betriebsdaten über Datenlogger entspricht dem Stand der Technik. Sie ist notwendig zur Überwachung der Funktion des dauerhaft stabilen Betriebs der chemischen Abgasreinigung dar.

Insgesamt ist es erforderlich, den bestimmungsgemäßen Betrieb der Abgasreinigung durch automatische Regelung sicherzustellen und die relevanten Betriebsparameter mittels Datenloggern kontinuierlich aufzuzeichnen. Diese Daten könnten von den nach § 29b Bundes-Immissionsschutzgesetz bekanntgegeben Messinstituten oder gegebenenfalls den zuständigen Behörden ausgelesen werden.

Hinweis: Die Daten könnten außerdem Grundlage für Umweltgutachter im Rahmen der Beurteilung der EEG-Förderwürdigkeit sein. Hier werden Aufzeichnungen über Abwärmenutzung, Stoffströme und Verdampfungsleistung detailliert erfasst. Die Herstellung von Düngemitteln durch Abscheidung von Ammoniak oder die Inhaltsstoffe eines Düngemittels, die eine Aussage darüber treffen, ob höherwertiger Dünger hergestellt wurde, stellen bisher kein Prüfungskriterium für den Umweltgutachter dar.

## **6.4 Emissionsmessungen Anlage C (Rotationstrockner)**

### **Beschreibung der Anlage C**

Bei der Gärresttrocknungsanlage C handelt es sich um einen Rotationstrockner, der BHKW-Abgase zur direkten Trocknung nutzt (siehe Abb. 37). Der getrocknete Gärrest kann anschließend zu Pellets aufbereitet und weitervermarktet werden. In der Biogasanlage werden NawaRos und Rindergülle eingesetzt. Die Feuerungswärmeleistung der drei BHKW beträgt 1,799 MW.

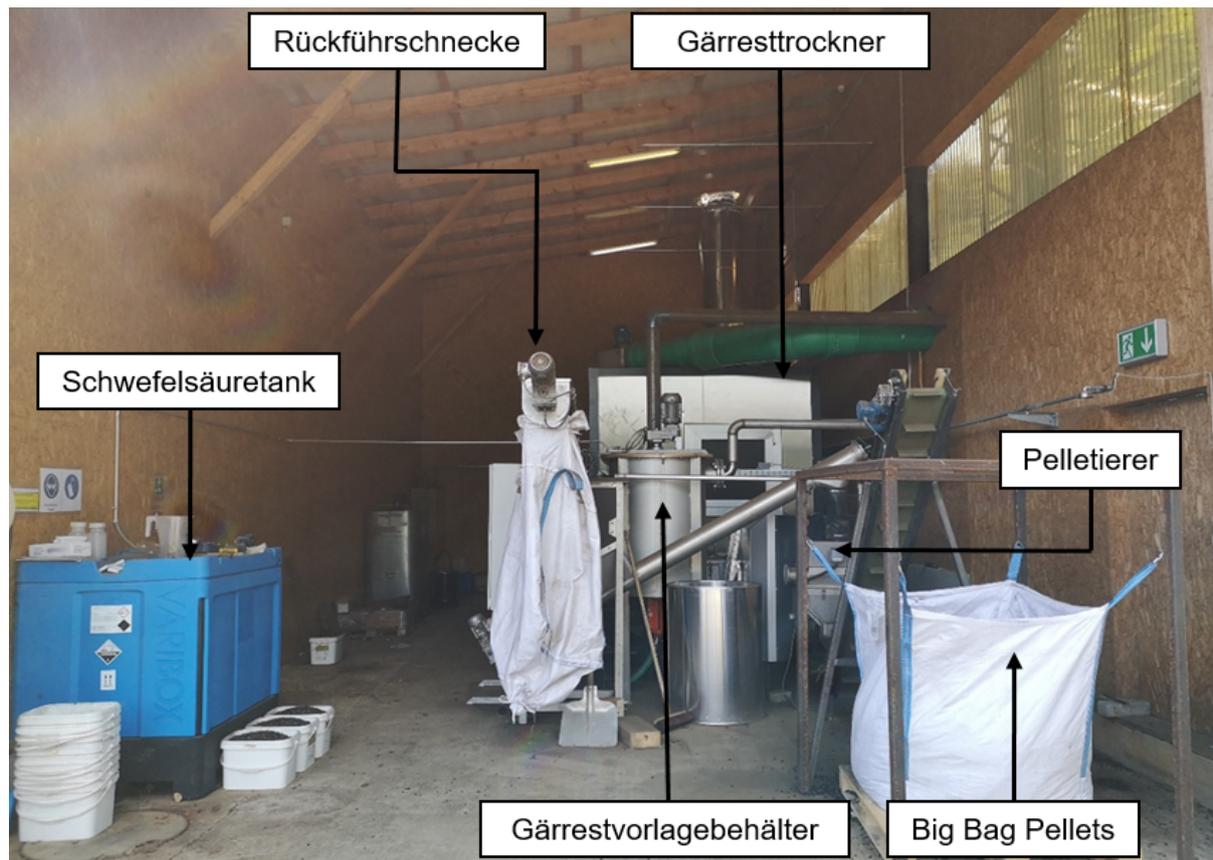


Abb. 37: Rotationstrockner mit Verwendung der vollständigen BHKW-Abgase nach Betreiber Anlage C (2021)

Laut Betreiberangaben werden rund 5.600 t/a an Gärrest getrocknet. Die BHKW-Abgase haben eine Temperatur von etwa 500 °C und werden vollständig zum Trocknen genutzt. Dazu werden diese mit Frischluft vermischt und mit einer Temperatur von etwa 300 °C in den Trockner geleitet. Der unbehandelte Gärrest hat einen Trockensubstanzgehalt von etwa 6–8 % TS. Nach Durchlaufen des Trockners erreicht der Gärrest einen TS-Gehalt von rund 90 %. Ein Teil des getrockneten Gärrestes wird über eine Schnecke direkt dem Pelletierer zugeführt (abgeschätzt rund 20 %). Der andere Teil des getrockneten Gärrestes wird zurückgeführt und mit dem unbehandelten Gärrest in einer Schnecke vermischt, sodass der Gärrest mit etwa 30 % TS in den Trockner eingetragen wird. Vor dem Eintritt in den Trockner wird dem Gärrest 70 %ige Schwefelsäure zudosiert, um Ammoniak in Form von Ammoniumsulfat zu binden. Die Schwefelsäure wird direkt dem Schneckendosierer zugegeben.

Im Trockner wird das Material durch horizontale rotierende Schaufeln in Schwebelage gehalten. Die Rotationsgeschwindigkeit beträgt über 2.000 U/min, wodurch sich eine Art Materialwolke mit sehr großer Oberfläche ergibt. Das Material durchläuft insgesamt drei Kammern, in denen es für jeweils mindestens 50 Sekunden verweilt.

Die Trocknungsgaseintrittstemperatur in die Trocknungskammer 3 wird unabhängig von BHKW-Abgastemperatur und -menge durch Vermischung mit Frischluft auf 300 °C geregelt. Die Eintrittstemperaturen nehmen in Kammer 2 und 1 leicht ab und betragen noch etwa 275 °C respektive 265 °C. Der Gärrest durchläuft die Kammern im Gegenstrom. Durch die hohen Temperaturen der zugeführten Trocknungsgase verdunstet das Wasser im Gärrest sehr schnell. Der Gärrest wird nach einer gewissen Verweildauer von Kammer zu Kammer weitertransportiert. Nach Durchlaufen der Kammer 3 wird der getrocknete Gärrest ausgetragen und zurückgemischt beziehungsweise dem Pelletierer zugeführt. Ein Trocknungszyklus dauert nur wenige Minuten.

Die verfügbare Wärme zum Trocknen ist abhängig von der gefahrenen elektrischen Leistung der BHKW. Der Gärrest wird entsprechend der verfügbaren Wärme in den Trockner zugeführt. Die Gärrestzufuhr erfolgt temperaturgesteuert.

### **Abgasreinigung / Ammoniakabscheidung**

Die Ammoniakabscheidung erfolgt durch die Zudosierung von Schwefelsäure direkt in die Dosierschnecke. Ein Chemowäscher wird deshalb nicht eingesetzt. Als Reaktionsprodukt bildet sich Ammoniumsulfat. Zur Entstaubung der Abgase wird ein Gewebefilter eingesetzt. Die Staubfilter werden alle 45 Minuten durch Druckstöße freigeblasen. Der Staub enthält aufgrund der Schwefelsäurezugabe auch kristallines Ammoniumsulfat. Der abgeschiedene Staub wird dem Gärrest zugeführt. Ein Austausch der Filter erfolgt einmal jährlich im Zuge von Routinewartungsarbeiten.

Die Schwefelsäure wird mittels Säurepumpe zudosiert. Die zugegebene Menge an Säure ist direkt proportional zur zugeführten Menge an Gärrest. Dazu sind die Gärrest- und die Säurepumpe steuerungstechnisch gekoppelt. Der Bedarf an Säure ist abhängig von der Säurekonzentration, dem Ammoniumgehalt des Gärrestes und der zugeführten Gärrestmenge. Der Säurebedarf wird vom Betreiber beziehungsweise vom Trocknerhersteller ermittelt und als Grundeinstellung gespeichert. Diese Grundeinstellung kann beibehalten werden, solange die Betriebsparameter weitgehend konstant bleiben. Ansonsten müssen die Einstellungen entsprechend manuell vom Betreiber angepasst werden. Die Zudosierung der Säure wird mittels speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) aktuell nur qualitativ, nicht aber quantitativ aufgezeichnet. Damit ist es nicht möglich rückwirkend zu prüfen, ob im Hinblick auf eine dauerhaft effektive Ammoniakabscheidung, immer genügend Säure zudosiert wurde. In Zukunft soll die Aufzeichnung auch quantitativ ausgeführt werden.

### **Durchführung der Emissionsmessungen**

Es wurden jeweils vier Einzelmessungen über je 30 Minuten im Reingas im Abgaskamin durchgeführt. Ermittelt wurden die Emissionen an Ammoniak, Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff, Methan, Formaldehyd, Geruch, Stickstoffoxiden, Schwefeloxiden und Schwefelwasserstoff. Zusätzlich wurden im Abgas des BHKW-Motors Ammoniak, Gesamtkohlenstoff, Formaldehyd, Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff gemessen.

Von den in Kapitel 5.1 aufgeführten Emissionsgrenzwerten weicht bei Anlage C der Ammoniakgrenzwert ab. Dieser beträgt gemäß Bescheid 30 g/h. Dieser Wert wurde als Bagatellmassenstrom zur Begrenzung des Stickstoffeintrages in das nur wenige Meter entfernte FFH-Gebiet festgelegt. Aufgrund der Vorgaben der TA Luft 2021 muss zusätzlich ein Emissionsgrenzwert für Ammoniak von 10 mg/m<sup>3</sup> eingehalten werden.

Die Ammoniakminderung erfolgt vor beziehungsweise in der Trocknungskammer. Eine nachgeschaltete saure Wäsche des Abgases findet nicht statt. Daher ist eine Ermittlung des Ammoniakabscheidungsgrads verfahrensbedingt nicht möglich.

Zum Trocknen des Gärrestes werden BHKW-Abgase eingesetzt. In BHKW-Abgasen von Magermotoren ist meist ein gewisser Methanschluß vorhanden. Ohne Berücksichtigung des Methanschlußes aus dem BHKW könnte die Emissionsbegrenzung für Gesamtkohlenstoff in Höhe von 50 mg/m<sup>3</sup> im Abgas der Gärresttrocknung nicht eingehalten werden. Für die emissionstechnische Bewertung des Trockners sind nur die Emissionen an Gesamtkohlenstoff aus dem Trocknungsprozess relevant. Daher können in diesem Fall die Gesamtkohlenstoff-Emissionen aus den BHKW-Abgasen von den Gesamtkohlenstoff-Emissionen der Trocknerabgase abgezogen werden. Daher fand eine gleichzeitige Messung der BHKW-Abgase statt. Durch Analyse von BHKW- und Trocknerabgasen lassen sich dann Aussagen zu den Prozessen im Trockner treffen. Die BHKW-Abgase müssen vor Trocknereintritt grundsätzlich die Grenzwerte der 44. Bundes-Immissionsschutzverordnung einhalten und verfügen über eine

separate Ableitung über einen Kamin. In Abb. 38 und Abb. 39 sind die Messstellen für Trocknerrein- gas und BHKW-Abgas dargestellt.



Abb. 38: Reingasmessstelle Anlage C nach Betreiber Anlage C (2021)



Abb. 39: Messstelle BHKW-Abgas Anlage C nach Betreiber Anlage C (2021)

Vor der Messung wurde die Erfassung der Gärrestmengen und der Schwefelsäuredosierung während der Messung eruiert, da diese Daten nicht standardmäßig aus dem Steuerungssystem auslesbar zur Verfügung standen.

Der unbehandelte Gärrest wird kontinuierlich aus dem Vorlagebehälter zugeführt. Die Emissionsmessungen wurden so durchgeführt, dass der Vorlagebehälter während einer 30-minütigen Einzelmessung nicht nachgefüllt wurde, sodass die durchgesetzte Gärrestmenge während einer Messung durch Differenzbildung im Vorlagebehälter zu etwa 240 l/h, entsprechend 240 kg/h, ermittelt werden konnte.

Die Schwefelsäuredosierung läuft diskontinuierlich halbstundenweise im Wechsel mit einer halbstündigen Pause. Laut Hersteller sei dies kein Problem für die Ammoniakabscheidung. Aufgrund der Rückmischung von bereits getrocknetem Gärrest, der wiederum Ammoniumsulfat enthält, sei im Trockner immer ausreichend Schwefelsäure vorhanden. Die Schwefelsäurepumpe läuft immer zeitgleich mit der Gärrest-Förderschnecke. In diesem Fall werden 6,3 l/h gefördert. Sobald die Förderschnecke steht, wird auch keine Schwefelsäure zudosiert. Es wurde empirisch abgeschätzt, dass die Säurepumpe pro Minute rund 48 Sekunden läuft und für rund 12 Sekunden stillsteht. Somit ergibt sich für den Regelbetrieb eine durchschnittliche Säuredosierung von rund  $\frac{30}{60} \cdot \frac{48}{60} \cdot 6,3 \frac{l}{h} = 2,52 \frac{l}{h}$ , also rund 4 kg/h.

Mit Formel (2) lässt sich der stöchiometrische Schwefelsäurebedarf zu rund 2,56 kg/h abschätzen. Die Säurezugabe ist daher etwas überdosiert, aber grundsätzlich in einer plausiblen Größenordnung.

Abb. 40 zeigt beispielhaft das zur Verfügung stehende Display während der Emissionsmessungen.

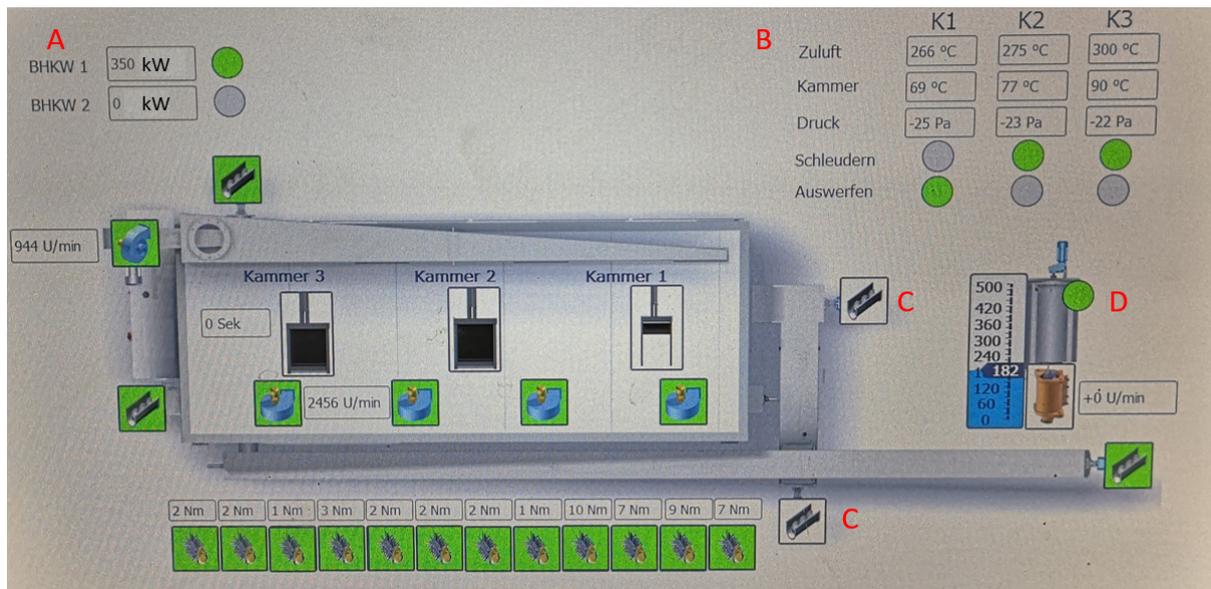


Abb. 40: Display des Gärrestrockners nach Betreiber Anlage C (2021), ergänzt durch LfU

A: Aktuelle elektrische Leistung der BHKW;

B: Zuluft- und Kammertemperaturen;

C: Betriebsanzeige Mischschnecke und Säurepumpe. Nicht grün hinterlegt bedeutet nicht in Betrieb;

D: Füllstand des Vorlagebehälters für den unbehandelten Gärrest

Alle 45 Minuten erfolgt im Gärrestrockner eine Filterreinigung. Hierfür steht die Anlage für etwa eine Minute still. Da das Messinstitut zwischen seinen Einzelmessungen jeweils einige Minuten Zeit benötigte, wurde der Messstart so ausgewählt, dass die Filterreinigung stets im Zeitraum zwischen den Messungen stattfand und somit keinen Einfluss hatte.

Kurz nach dem Start der Messung 1 setzte das BHKW seinen Betrieb für einige Minuten aus. Als Ursache wurde ein voller Kondensatschacht vermutet. Das Problem konnte zügig behoben werden. Allerdings benötigte das BHKW in der Folge einige Minuten zum Hochregeln der Leistung auf die vorgesehenen 350 kW<sub>el</sub>, sodass die durchschnittliche Leistung des BHKWs während der halbstündigen Messdauer bei etwa 250–300 kW<sub>el</sub> lag. Aufgrund dieses Zwischenfalls lagen während der Messung 1 keine repräsentativen Betriebsbedingungen vor. Die Messungen 2 bis 4 waren repräsentativ.

### Ergebnisse der Emissionsmessungen

In Tab. 13 und Tab. 14 sind die Messergebnisse dargestellt (ohne Berücksichtigung der jeweiligen Messunsicherheiten). Die Messwerte sind plausibel und die Grenzwerte werden eingehalten, sofern die Messunsicherheit nicht betrachtet wird. Bis auf die erste Messreihe lagen repräsentative Betriebsbedingungen vor.

Tab. 13: Messergebnisse im Abgas des BHKW-Motors der Anlage C

| Luftschadstoff                                       | Einheit              | 1 *      | 2        | 3       | 4        |
|--|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| <b>Ammoniak</b>                                      |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,2   | << 0,2   | << 0,2  | << 0,2   |
| Massenstrom  | [kg/h]               | << 0,00  | << 0,00  | << 0,00 | << 0,00  |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>                             |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | 1.113,4  | 184,4    | 163,7   | 176,3    |
| Massenstrom  | [kg/h]               | 1,26     | 0,22     | 0,20    | 0,20     |
| <b>Formaldehyd</b>                                   |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | 13,4     | 12,8     | 12,0    | 11,5     |
| Massenstrom  | [kg/h]               | 0,02     | 0,02     | 0,01    | 0,01     |
| <b>Stickstoffoxide, angegeben als NO<sub>2</sub></b> |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | 556,9    | 508,7    | 478,7   | 496,6    |
| Massenstrom  | [kg/h]               | 0,63     | 0,60     | 0,59    | 0,56     |
| <b>Schwefeldioxid</b>                                |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | 10,7     | 8,9      | 12,9    | 7,3      |
| Massenstrom  | [kg/h]               | 0,01     | 0,01     | 0,02    | 0,01     |
| <b>Schwefelwasserstoff</b>                           |                      |          |          |         |          |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,001 | << 0,001 | 0,012   | << 0,001 |
| Massenstrom  | [g/h]                | << 0,00  | << 0,00  | 0,02    | << 0,00  |

\* Erste Messreihe wurde aufgrund von Störungen am BHKW als nicht repräsentativ für den ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb bewertet und verworfen

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Tab. 14: Messergebnisse im Reingas Gärresttrocknungsanlage C

| Luftschadstoff                                       | Einheit                            | 1 *   | 2         | 3     | 4        | Grenzwert TA Luft 2021 |
|--|------------------------------------|-------|-----------|-------|----------|------------------------|
| <b>Ammoniak</b>                                      |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 0,6   | 0,3       | 0,2   | 0,4      | 10 (Nr. 5.4.1.15)      |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,001 | 0,001     | 0,000 | 0,001    | 0,15 (Nr. 5.2.4)       |
| <b>Gesamtstaub</b>                                   |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 1,6   | << 0,2    | 1,9   | 2,0      | 10 (Nr. 5.4.1.15)      |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,003 | << 0,0004 | 0,004 | 0,004    | 0,20 (Nr. 5.2.1)       |
| <b>Gesamtkohlenstoff</b>                             |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 498,8 | 144,1     | 133,1 | 126,5    | 50 (Nr. 5.2.5)         |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 1,03  | 0,30      | 0,27  | 0,26     | 0,50 (Nr. 5.2.5)       |
| <b>Methan</b>  |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | -     | 105,5     | 97,3  | 96,9     |                        |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | -     | 0,22      | 0,20  | 0,20     |                        |
| <b>Formaldehyd</b>                                   |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 4,1   | 3,3       | 2,9   | 2,7      | 5 (Nr. 5.2.7.1.1)      |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,01  | 0,01      | 0,01  | 0,01     | 0,0125 (Nr. 5.2.7.1.1) |
| <b>Geruch</b>  |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [GE <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> ] | 1.400 | 1.700     | 1.600 | 1.900 ** | 500 (Nr. 5.4.8.6.2)    |
| Massenstrom  | [MGE <sub>E</sub> /h]              | 3,9   | 4,8       | 4,5   | 5,4      |                        |
| <b>Stickstoffoxide, angegeben als NO<sub>2</sub></b> |                                    |       |           |       |          |                        |
| Konzentration  | [mg/m <sup>3</sup> ]               | 284,9 | 270,7     | 266,6 | 262,2    | 350 (Nr. 5.2.4)        |
| Massenstrom  | [kg/h]                             | 0,59  | 0,56      | 0,55  | 0,54     | 1,8 (Nr. 5.2.4)        |

| Luftschadstoff             | Einheit              | 1 *      | 2     | 3        | 4        | Grenzwert TA Luft 2021 |             |
|----------------------------|----------------------|----------|-------|----------|----------|------------------------|-------------|
| <b>Schwefeldioxid</b>      |                      |          |       |          |          |                        |             |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | 1,9      | 1,4   | 1,6      | << 0,7   | 350                    | (Nr. 5.2.4) |
| Massenstrom                | [kg/h]               | 0,004    | 0,003 | 0,003    | << 0,001 | 1,8                    | (Nr. 5.2.4) |
| <b>Schwefelwasserstoff</b> |                      |          |       |          |          |                        |             |
| Konzentration              | [mg/m <sup>3</sup> ] | << 0,005 | 0,052 | << 0,005 | 0,029    | 3                      | (Nr. 5.2.4) |
| Massenstrom                | [g/h]                | << 0,01  | 0,11  | << 0,01  | 0,06     | 15                     | (Nr. 5.2.4) |

\* Erste Messreihe wurde aufgrund von Störungen am BHKW als nicht repräsentativ für den ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb bewertet und verworfen

\*\* Geruch Probe 4 wurde aufgrund von Nullluftfehlern aus der Bewertung gestrichen

<< kleiner der Erfassungsgrenze des Verfahrens

Der Volumenstrom betrug durchschnittlich 2.060 m<sup>3</sup>/h.

### Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

**Ammoniak:** Die Ammoniakemissionen lagen bei den Messungen bei einem Maximalwert von 0,4 mg/m<sup>3</sup> und 1 g/h. Damit werden die Emissionsgrenzwerte von 10 mg/m<sup>3</sup> und 30 g/h deutlich unterschritten. Daher ist nicht mit einer erheblichen Beeinträchtigung durch Ammoniakdepositionen im angrenzenden FFH-Gebiet zu rechnen.

**Gesamtstaub:** Der Trocknungsprozess ist aufgrund des hohen erzielten Trocknungsgrads grundsätzlich relevant im Hinblick auf Staubemissionen. Die gemessenen Staubemissionen lagen mit Werten zwischen kleiner 0,2 und 2 mg/m<sup>3</sup> deutlich unter dem Grenzwert der TA Luft 2021 von 10 mg/m<sup>3</sup>.

**Gesamtkohlenstoff:** Bei der Betrachtung der Gesamt-C Emissionsmassenströme des BHKW-Abgases zeigt sich, dass diese im Wesentlichen die Höhe der Emissionen im Trocknungsprozess bestimmen. Erfahrungsgemäß sind diese Emission überwiegend auf den Methanschluß des Motors zurückzuführen. Bei den durch die Trocknungsanlage verursachten Gesamt-C-Emissionen wurden deshalb die anteiligen Methanmassenströme (entspricht näherungsweise den Gesamt-C-Massenströmen) des BHKW-Abgases von den Gesamt-C-Massenströmen des Trocknerabgases abgezogen. Damit liegen die rechnerischen Gesamt-C Emissionen, verursacht durch den Trocknungsprozess zwischen 30 und 39 mg/m<sup>3</sup>. Bei einer ausreichenden Vergärung ist nicht zu erwarten, dass während des kurzen Trocknungsprozesses unter den vorliegenden aeroben Bedingungen zusätzliche nennenswerte Mengen an Gesamt-C entstehen. Die Einhaltung des Emissionsgrenzwertes von 50 mg/m<sup>3</sup> der TA Luft ist möglich, wenn die anteiligen Gesamt-C Emissionen aus dem Motorabgas abgezogen werden.

**Formaldehyd:** Die Formaldehydemissionen stammen überwiegend aus den BHKW-Abgasen und liegen bei maximal 3,3 mg/m<sup>3</sup>. Ein Vergleich der Massenströme zeigt, dass im Trocknungsprozess die Formaldehydemissionen unverändert bleiben.

**Geruch:** Die gemessenen Geruchsemissionen liegen mit Werten zwischen 1.600 und 1.700 GE/m<sup>3</sup> über den Erfahrungswerten bei indirekt beheizten Trocknungsanlagen. In Abgasen von Gas-Otto-BHKW ist allerdings von Geruchskonzentrationen im Bereich von rund 2.000–3.000 GE/m<sup>3</sup> auszugehen, sodass die Messwerte im Trocknerabgas unter Berücksichtigung der Verdünnung im Trockner aufgrund des hier praktizierten direkt beheizten Trocknungsverfahrens mit BHKW-Abgasen plausibel erscheinen. Damit ist nicht zu erwarten, dass relevante Geruchsemissionen auftreten, die der Gärresttrocknung zuzurechnen sind.

**Stickstoffoxide:** Die Stickstoffoxid-Massenströme im Trocknerabgas sind nahezu deckungsgleich mit den BHKW-Abgasen. Nachdem im Trockner keine Brenner oder sonstigen Stickstoffoxid-Quellen vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Stickstoffoxide vollständig aus den BHKW

stammen. Durch die Verdünnung der BHKW-Abgase ergibt sich im Trocknerabgas noch eine  $\text{NO}_x$ -Konzentration von maximal  $270,7 \text{ mg/m}^3$ .

**Schwefeldioxid:** Die Schwefeldioxidemissionen lagen mit maximal  $1,6 \text{ mg/m}^3$  auf sehr niedrigem Niveau. Es wird davon ausgegangen, dass diese überwiegend aus den BHKW-Abgasen stammen.

**Schwefelwasserstoff:** Die Schwefelwasserstoff-Emissionen sind im Bereich der Nachweisgrenze und somit nicht relevant.

### Stickstoffbilanzierung

Während der Messungen wurden Proben vom unbehandelten und vom getrockneten Gärrest genommen und von einem Analytiklabor analysiert. Aus den Analyseergebnissen wurde, wie auch bei den zwei vorangegangenen Emissionsmessungen, der Versuch einer Stickstoffbilanzierung unternommen. Damit soll untersucht werden, ob sich der durch den Gärrest eingetragene Ammoniumstickstoff auch im getrockneten Gärrest beziehungsweise den Pellets wiederfindet.

Dazu wurde die in Abb. 41 dargestellte Bilanzierung durchgeführt. In den Trockner eingetragen werden flüssiger Gärrest (rund  $240 \text{ kg/h}$ ), 70 %ige Schwefelsäure (rund  $4 \text{ kg/h}$ ) und mit Luft gemischte BHKW-Abgase. Aus dem Trockner ausgetragen werden getrockneter Gärrest (rund  $20 \text{ kg/h}$ ) und das Trocknerabgas ( $2.060 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

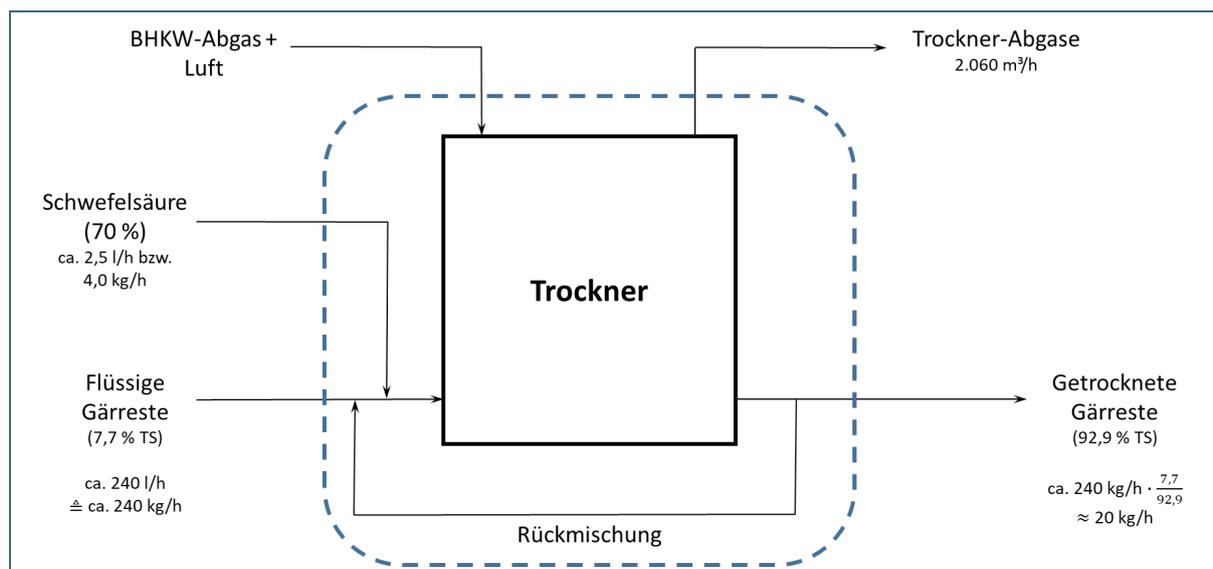


Abb. 41: Bilanzierung des Gärresttrockners C (blau: Bilanzierungsgrenzen)

### Auswertung der Stickstoffbilanz

Bezogen auf (anorganischen) Stickstoff (ohne inertem elementaren Stickstoff) gibt es folgende Input-Ströme:

- N in Form von Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) aus dem **flüssigen Gärrest**: Gemäß der Materialprobe beträgt der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil im flüssigen Gärrest etwa  $2,40 \cdot 10^{-3}$ . Demnach werden rund  $580 \text{ g/h}$  an  $\text{NH}_4\text{-N}$  eingetragen.
- N in Form von  $\text{NO}_x$  aus dem **BHKW-Abgas**

## Output-Ströme:

- N in Form von Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) aus dem **getrockneten Gärrest**: Gemäß der Materialprobe beträgt der NH<sub>4</sub>-N-Anteil im getrockneten Gärrest etwa  $14,0 \cdot 10^{-3}$ . Demnach werden rund 280 g/h an NH<sub>4</sub>-N ausgetragen.
- N in Form von NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> im **Trocknerabgas**

Wie bei der Erläuterung der Messergebnisse bereits dargestellt, entspricht der Massenstrom an zugeführtem NO<sub>x</sub> in den BHKW-Abgasen ziemlich genau dem im Trocknerabgas abgeführten. Weiterhin sind die abgeführten Ammoniakmengen vernachlässigbar gering. Überschlüssig genügt daher eine Betrachtung des zugeführten flüssigen Gärrestes und des ausgetragenen getrockneten Gärrestes.

Wie oben dargestellt, werden mit dem flüssigen Gärrest rund 580 g/h an NH<sub>4</sub>-N eingetragen, mit dem getrockneten Gärrest aber nur rund 280 g/h ausgetragen. Die Bilanz ergibt ein Defizit von rund 300 g/h, deren Verbleib nicht erklärt werden kann. Diese Diskrepanz von rund 50 % (bezogen auf den Input) lässt sich auch gut aus den Analysenergebnissen der Materialproben ablesen, siehe Tab. 15.

Tab. 15: Makronährstoffgehalte, bezogen auf Trockenmasse, im flüssigen und trockenen Gärrest

| Parameter                               | Flüssiger Gärrest (Input) TM [%] | Trockener Gärrest (Output) TM [%] |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| Gesamtstickstoff (N <sub>ges</sub> )    | 6,24                             | 4,50                              |
| Ammoniumstickstoff (NH <sub>4</sub> -N) | 3,12                             | 1,51                              |
| Phosphor (P)                            | 0,95                             | 0,91                              |
| (als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )    | 2,18                             | 2,08                              |
| Kalium (K)                              | 5,32                             | 4,88                              |
| (als K <sub>2</sub> O)                  | 6,40                             | 5,88                              |
| Magnesium (Mg)                          | 1,01                             | 0,81                              |
| (als MgO)                               | 1,67                             | 1,34                              |
| Calcium (Ca)                            | 1,40                             | 1,29                              |
| (als CaO)                               | 1,96                             | 1,81                              |
| Schwefel (S)                            | 0,32                             | 4,25                              |
| (als SO <sub>4</sub> )                  | 0,97                             | 12,7                              |

Der Trockenmassegehalt an NH<sub>4</sub>-N beträgt für den Input 3,12 % und für den Output nur noch 1,51 %, das heißt, über den getrockneten Gärrest wird etwa nur die Hälfte des NH<sub>4</sub>-N ausgetragen im Vergleich zu dem, was über den flüssigen Gärrest in den Trockner eingetragen wird (Voraussetzung: gleicher Trockenmassenstrom in In- und Output).

Im Vergleich dazu liegen bei fast allen anderen Nährstoffen die Input- und Outputgehalte relativ nah beieinander. Eine Ausnahme stellt Schwefel beziehungsweise Sulfat (SO<sub>4</sub>) dar. Bei diesem Untersuchungsparameter liegen die Massenkonzentrationen im Output deutlich höher (Faktor 13), was durch die Schwefelsäurezugabe begründet werden kann.

Eine plausible Erklärung für den reduzierten Gehalt an Ammoniumstickstoff in der Output-Probe konnte nicht ermittelt werden. Es wurden verschiedene Erklärungsansätze diskutiert:

- Nitrifizierung von Ammonium zu Nitrat über Nitrit  
→ Aufgrund des nur wenige Minuten dauernden Trocknungsprozesses wird die bakterielle Nitrifizierung als unwahrscheinlich erachtet.

- Bakterielle Umwandlung von  $\text{NH}_4\text{-N}$  zu  $\text{N}_2$  (elementarem Stickstoff) oder  $\text{N}_2\text{O}$  (Lachgas)  
→ Aufgrund des nur wenige Minuten dauernden Trocknungsprozesses wird die bakterielle Umwandlung als unwahrscheinlich erachtet.
- Bindung von Formaldehyd durch Urotropinbildung  
→ Tatsächlich wird der Formaldehyd-Massenstrom im BHKW-Abgas durch den Trocknungsprozess minimal gesenkt. Die Größenordnung liegt allerdings bei kleiner 10 g/h, sodass dieser Vorgang als nicht relevant gesehen wird. Zudem ist Urotropin im sauren Milieu (Schwefelsäurezugabe) nicht stabil und zerfällt in seine Ausgangsstoffe Ammoniak und Formaldehyd.

Grundsätzlich sind Feststoffanalysen fehlerbehafteter als Analysen von Flüssigkeiten (schon allein wegen der Heterogenität von Feststoffgemischen). Darüber hinaus gestalten sich  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Analysen als relativ schwierig, wodurch sich der Fehler vergrößern dürfte. In einem ersten Schritt könnte die Stichprobenanzahl erhöht werden, um zumindest einen statistischen Fehler abzuschätzen. Weiterhin könnten die Probenahmen häufiger und über einen gewissen Zeitraum erfolgen (unter Bildung von Mischproben), sodass sich repräsentativere Mischwerte einstellen können. Eine weitere Fehlerquelle liegt in der exakten Erfassung der Mengenströme.

Wie bei den Stickstoffbilanzen von Anlage A und B zeigt sich auch hier, dass diese fehlerbehaftet sind und sich nur bedingt eignen, um die dauerhaft ausreichende Ammoniakabscheidung nachzuweisen.

### **Befragung des Betreibers**

Auf eine Betreiberbefragung wurde verzichtet.

### **Gesamtbewertung und Erkenntnisse für den Vollzug**

Zusammenfassend lässt sich zu Anlage C sagen, dass die Technik grundsätzlich geeignet ist, um die geforderten Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Es wäre wünschenswert, wenn das Regelungskonzept der Säuredosierung ähnlich ausgereift wäre wie beispielsweise wie beim Chemowäscher der Anlage A. Das Steuerungs- und Regelungskonzept sollte deshalb dahingehend verbessert werden. Zu bemängeln war die unvollständige Aufzeichnung der Betriebsdaten des Wäschers (unter anderem die Schwefelsäuredosierung). Damit ist eine rückwirkende Beurteilung des bestimmungsgemäßen Betriebs im Rahmen der Anlagenüberwachung aber auch für den Betreiber nicht möglich. Die Aufzeichnung solcher Betriebsparameter ist aus fachtechnischer Sicht Stand der Technik. Nur so kann eine kontinuierliche effektive Ammoniakabscheidung dauerhaft sichergestellt werden.

Bei der Genehmigung von Gärresttrocknungsanlagen ist deshalb darauf zu achten, dass in den Genehmigungsanträgen hinreichende Regelungskonzepte beschrieben sind, mit denen die dauerhafte Funktion der Ammoniakabscheidung sichergestellt. Dabei sollte auch beachtet werden, dass vom Betreiber gegebenenfalls Schwefelsäure in unterschiedlichen Konzentrationen eingesetzt wird. Zusätzlich sollte in den Anträgen angegeben werden, welche Betriebsparameter mittels Datenlogger kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet werden. In den Auflagen von Genehmigungsbescheiden sollte dies entsprechend berücksichtigt werden.

## **6.5 Vergleich der Emissionsmessungen untereinander und mit den ausgewerteten Messberichten**

Die Messungen an den Anlagen A, B und C wurden im Regelbetrieb durchgeführt. Die nachfolgende Tab. 16 enthält eine Übersicht über die Messergebnisse der Anlagen A, B und C. Die Messergebnisse werden mit den Medianen der ausgewerteten Emissionsmessberichte verglichen (siehe Kapitel 5.2).

Betrachtet werden die relevanten Luftschadstoffe Ammoniak (Konzentration und Emissionsminderungsgrad), Gesamtstaub und Gesamtkohlenstoff.

Tab. 16: Vergleich der relevanten Messergebnisse im Reingas der Anlagen A, B und C (jeweils maximale Emissionen aus der Gärresttrocknung, durchschnittliche Minderungsgrade) mit den Medianen der jeweils maximalen Messwerte der Einzelmessungen der ausgewerteten Emissionsmessberichte aus Kapitel 5.2

|  | Ammoniak, maximaler Messwert [mg/m <sup>3</sup> ] | Emissionsminderungsgrad [%] | Gesamtstaub [mg/m <sup>3</sup> ] | Gesamt-C [mg/m <sup>3</sup> ] |
|--|---|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Anlage A   | 0,7   | 96                          | << 0,3                           | 4,1                           |
| Anlage B   | 3,5   | 94,5                        | 0,9                              | 13,9                          |
| Anlage C   | 0,4   | -                           | 2,0                              | 144                           |
| Median der maximalen Messwerte gemäß Kapitel 5.2 | 1   | 96,7                        | 1                                | 4                             |

### Ammoniak

Bei Anlage A lag die durchschnittliche Konzentration im Rohgas bei rund 43 mg/m<sup>3</sup>, bei Anlage B bei rund 48 mg/m<sup>3</sup>. Bei den Anlagen A und B erfolgte die Ammoniakminderung mittels Chemowäschern. Hinsichtlich der Emissionsrelevanz ist auf die Minderung der Ammoniakemission besonderes Augenmerk zu richten, da diese, wie die Rohgasmessungen zeigen, beim Trocknungsprozess in relevantem Umfang freigesetzt werden. Im Ergebnis wiesen beide Wäscher der Anlagen A und B einen hohen Minderungsgrad an Ammoniak auf (Anlage A: max. Emissionskonzentration 0,7 mg/m<sup>3</sup> im Reingas, rund 96 % Emissionsminderungsgrad unter Berücksichtigung der Abschlammung, Anlage B: im Mittel 94,5 % bei maximal 3,5 mg/m<sup>3</sup> im Reingas). Im Vergleich zum Median (1 mg/m<sup>3</sup>) der ausgewerteten Messberichte liegen die Ammoniakemissionen bei Anlage A auf einem niedrigen Emissionsniveau. Die Messergebnisse im Abgas der Anlage B liegen im Vergleich dagegen deutlich über diesem Median. An der Anlage B besteht grundsätzlich Optimierungspotenzial beim Betrieb des Wäschers.

Bei Anlage C ist kein geführtes Rohgas vorhanden, da zur Abscheidung von Ammoniak Schwefelsäure direkt dem zu trocknenden Gärrest zugegeben wird. Die Angabe eines Emissionsminderungsgrads ist daher nicht möglich. Im Abgas der Anlage C liegt die maximale Ammoniakkonzentration bei 0,4 mg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich zum Median der ausgewerteten Messberichte liegen die Ammoniakemissionen bei Anlage C auf einem niedrigen Emissionsniveau.

### Gesamtstaub

An den Anlagen mit Wäscher (Anlagen A und B) waren im Reingas keine relevanten Staubemissionen nachweisbar. Sie lagen unter dem Median (1 mg/m<sup>3</sup>) der ausgewerteten Messberichte.

An der Anlage C wurden geringe Staubkonzentrationen bis maximal 2 mg/m<sup>3</sup> ermittelt. Im Vergleich zum Median der ausgewerteten Messberichte liegen die Staubemissionen bei Anlage C auf einem etwas höherem Emissionsniveau.

Der Median von 1 mg/m<sup>3</sup> aus den Emissionsmessberichten zeigt, dass die Emissionen an Staub bei Gärresttrocknern in der Regel keine Relevanz hat.

### Gesamtkohlenstoff

Bei Anlage A (indirekt beheizte Trocknung im Chargenbetrieb) lagen die Emissionen an Gesamt-C bei maximal 4 mg/m<sup>3</sup> und damit im Vergleich zum Median (4 mg/m<sup>3</sup>) der ausgewerteten Messberichte auf geringem Niveau.

Bei Anlage B (direkt und indirekt beheizte Trocknung) lagen die Emissionen an Gesamt-C mit maximal 13,9 mg/m<sup>3</sup> etwas höher im Vergleich zum Median der ausgewerteten Messberichte. Bei den festgestellten Gesamt-C-Emissionen handelte es sich nahezu ausschließlich um Methanemissionen, die durch das direkt der Trocknung zugeführte BHKW-Abgas verursacht werden.

Bei Anlage C (direkt beheizte Trocknung ohne Wäscher) lagen die Emissionen an Gesamt-C mit maximal 144 mg/m<sup>3</sup> im Vergleich zu den gemessenen Anlagen A und B und zum Median der ausgewerteten Messberichte sehr hoch. Ursächlich waren Methanemissionen, die durch das direkt zur Trocknung verwendete BHKW-Abgas verursacht werden. Die Massenkonzentration an Gesamt-C war im Abgas wesentlich höher als bei Anlage B, da ausschließlich BHKW-Abgas der Trocknung zugeführt und dieses im Vergleich weniger verdünnt wird. Mit Abzug der Methanemissionen aus dem BHKW lagen die Gesamt-C-Emissionen im Abgas der Trocknungsanlage noch bei maximal 39 mg/m<sup>3</sup>. Sie liegen damit im Vergleich zu den Anlagen A und B sowie im Vergleich zum Median (4 mg/m<sup>3</sup>) der Gesamt-C-Emissionen der ausgewerteten Messberichte deutlich auf höherem Niveau.

Die Messungen an den Anlagen A und B haben gezeigt, dass aus der Gärresttrocknung selbst keine zusätzliche relevante Emission an Gesamt-C zu erwarten ist. Die Ursache für die Gesamt-C-Emission der Anlage C konnte nicht abschließend geklärt werden.

## 7 Kosten der Gärrestaufbereitung

Die Kosten von Gärrestaufbereitungsanlagen, insbesondere die Investitionskosten, hängen in hohem Maße von der verwendeten Technologie und der zur Verfügung stehenden Wärmequelle für den Trocknungsprozess ab. Grundsätzlich ist eine Gärrestaufbereitung meist dann wirtschaftlich, wenn beispielsweise durch eine nahegelegene Biogasmotoranlage ausreichend Abwärme für den Trocknungsprozess verfügbar ist. Durch den KWK-Bonus des EEG für die Herstellung von Düngemitteln sind allein für die für den Trocknungsprozess genutzte Wärme bis zu 3 ct/kWh erlösbar. Für die erzeugten Düngemittel (konzentrierte Gärreste und ASL) lassen sich ebenfalls Erlöse erzielen. Zwischenzeitlich werden zum Beispiel Pellets aus Wirtschaftsdünger über das Internet beziehungsweise im Handel vertrieben. Außerdem lassen sich durch den Einsatz der getrockneten Gärreste oder der ASL künstliche Mineraldünger einsparen. Weitere Einsparmöglichkeiten ergeben sich dadurch, dass durch die Gärresttrocknung Transport- und Lagerkosten verringert werden können. Vor dem Hintergrund der verschärften Anforderungen der DüV mit höheren Lagerkapazitäten kann durch die Reduzierung der Lagermengen eventuell auf den sonst notwendigen Ausbau der Gärrestlager verzichtet werden.

Zusammengefasst sind auf der Ausgaben- und Einnahmenseite die folgenden Positionen zu berücksichtigen:

### Ausgaben

- Investitionskosten beziehungsweise fixe Kosten:  
Abschreibung, Zinsen, Versicherung, Wartung und Instandhaltung
- Variable Kosten:  
Elektrische Energie, Personal/Arbeitszeit, Hilfsmittel (zum Beispiel Wasser und Schwefelsäure), andere Kosten (zum Beispiel Messkosten)

### Einnahmen beziehungsweise Einsparungen

- KWK-Bonus in Höhe von bis zu 3 ct/kWh
- Erlös für produzierte Düngemittel, insbesondere ASL
- Einsparungen für Mineraldünger
- Geringere Transportkosten
- Einsparungen durch Nichterrichtung von Gärrestlagern

Von den drei messtechnisch untersuchten Anlagen liegen zu den Einnahmen und Ausgaben nur Aussagen von Betreiber A vor.

### Ausgabenseite

Bei der folgenden Kostenbetrachtung für die Gärresttrocknung wird überschlägig zunächst nur die Ausgabenseite berücksichtigt, um einen ungefähren Anhaltspunkt für die Trocknungskosten in Abhängigkeit der eingesetzten Trocknungsverfahren zu erhalten. Dabei wird die für die Trocknung benötigte Wärmeenergie als bisher ungenutzte Abwärme einer Biogasmotoranlage als vorhanden betrachtet. Die Wahl der Technologie wird vom Betreiber meist dadurch bestimmt, welche Mengenreduktion benötigt wird, welche Wärmemenge zur Verfügung steht, welche finanziellen Rahmenbedingungen vorliegen und in welcher Form der aufbereitete Gärrest vorliegen soll. Die Einnahmenseite ist nur schwer zu kalkulieren, da sie von den individuellen Rahmenbedingungen vor Ort abhängt. Es wird daher zum Vergleich nur die Ausgabenseite betrachtet.

In der Kostenbetrachtung werden die vorliegenden Angaben zur Anlage A mit Literaturdaten von Döhler et al. (2021) verglichen (siehe Tab. 17. Die Ausgaben der Anlage A finden sich in Tab. 17 in der Spalte „Schaufelradrockner (Anlage A)“. Im Vergleich dazu sind die von Döhler et al. (2021) veröffentlichten Daten für Investitionskosten und laufende Kosten von Vakuumverdampfern, Wurfschaufelkammertrocknern und Bandrocknern in Tab. 17 dargestellt. In Wurfschaufelkammertrocknern erfolgt die Trocknung mit BHKW-Abgasen.

Tab. 17: Aufschlüsselung von Ausgaben für Gärresttrocknungsanlagen

| Ausgaben                       |                            | Schaufelradrockner (Anlage A) | Vakuumverdampfer   | Wurfschaufelkammertrockner | Bandrockner        |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|                                | Gärrestdurchsatz           | 6.200 t/a                     | 30.000 t/a         | 4.500 t/a                  | 25.000 t/a         |
| <b>Investitionskosten</b>      |                            | 300.000 €                     | 800.000 € ***      | 330.000 €                  | 310.000 €          |
| <b>Fixe Kosten</b>             | Abschreibung               | 30.000 €/a *                  | 80.000 €/a         | 33.000 €/a                 | 31.000 €/a         |
|                                | Zinsen                     | 6.000 €/a *                   | 16.000 €/a         | 6.600 €/a                  | 6.200 €/a          |
|                                | Versicherung               | 1.500 €/a *                   | 4.000 €/a          | 1.650 €/a                  | 1.550 €/a          |
|                                | Wartung und Instandhaltung | 4.000 €/a                     | 20.000 €/a         | 8.250 €/a                  | 7.750 €/a          |
|                                | <b>Σ</b>                   | <b>41.500 €/a</b>             | <b>120.000 €/a</b> | <b>49.500 €/a</b>          | <b>46.500 €/a</b>  |
| <b>Variable Kosten</b>         | Elektrische Energie        | 10.000 €/a **                 | 40.000 €/a         | 31.500 €/a                 | 40.000 €/a         |
|                                | Personal                   | 3.800 €/a                     | 9.125 €/a          | 4.563 €/a                  | 22.813 €/a         |
|                                | Hilfsmittel                | 8.143 €/a                     | 16.800 €/a         | 4.050 €/a                  | 5.000 €/a          |
|                                | Andere Kosten              | 500 €/a                       | 900 €/a            | 202 €/a                    | 625 €/a            |
|                                | <b>Σ</b>                   | <b>22.443 €/a</b>             | <b>66.825 €/a</b>  | <b>40.315 €/a</b>          | <b>68.438 €/a</b>  |
| <b>Gesamtkosten</b>            |                            | <b>63.943 €/a</b>             | <b>186.825 €/a</b> | <b>89.815 €/a</b>          | <b>114.938 €/a</b> |
| <b>Kosten je Tonne Gärrest</b> |                            | <b>10,31 €/t</b>              | <b>6,23 €/t</b>    | <b>19,96 €/t</b>           | <b>4,60 €/t</b>    |

\* Ermittelt analog Döhler et al. (2021): Abschreibung über 10 Jahre, Zinsen: 2 % der Investitionskosten, Versicherung: 0,5 % der Investitionskosten

\*\* Betreiber A hatte hierzu keine Angaben gemacht. Gemäß Homepage des Anlagenherstellers werden rund 10.000 €/a veranschlagt. Im Vergleich zu den veranschlagten Energiekosten von Döhler et al. (2021) in Höhe von 30.000–40.000 €/a bei den anderen Anlagentypen könnte dieser Betrag etwas zu niedrig angesetzt sein.

\*\*\* Im Rahmen einer Ortseinsicht gab ein Betreiber eines Vakuumverdampfers des gleichen Anlagenherstellers an, dass die von ihm betriebenen zwei Anlagen mit je 10.000 t/a Durchsatz zusammen etwa 1,2 Mio € gekostet hätten.

Beim Vergleich der einzelnen Verfahren in Tab. 17 muss der Gärrestdurchsatz beachtet werden. Anlage A und der Wurfschaufelradkammertrockner sind mit 6.200 t/a beziehungsweise 4.500 t/a eher kleine Anlagen. Die Investitionskosten sind damit vergleichsweise hoch und schlagen bei den spezifischen Kosten durch. Der Vakuumverdampfer und der Bandrockner sind mit 30.000 t/a beziehungsweise 25.000 t/a relativ große Anlagen. Die Durchschnittskapazität der bayerischen Anlagen beträgt etwa 11.000 t/a (vergleiche Kapitel 2, Bestandsanlagen). Bei größeren Anlagen sind die absoluten Kosten höher als bei kleinen Anlagen, dafür sind die spezifischen Kosten pro Tonne Gärrest niedriger. Aus der Tabelle 17 ist zu erkennen, dass unter den genannten Voraussetzungen die spezifischen Kosten je Tonne Gärreste bei Vakuumverdampfern und Bandrocknern am niedrigsten waren.

### Einnahmenseite

Auf der Einnahmenseite werden von Döhler et al. (2021) nur Erlöse für die Düngemittel aufgeführt. Diese werden mit 31.000–61.000 €/a angegeben. Erlöse durch den KWK-Bonus und Einsparungen durch geringere Lagerkapazität, Transportwege und Mineräldüngereinsatz werden nicht berücksichtigt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei der Gärresttrocknung in der Regel ein großer Teil der Einnahmen durch den KWK-Bonus des EEG generiert wird. Da bei den Einnahmefaktoren

insgesamt eine große Abhängigkeit zur jeweiligen betrieblichen Situation besteht, wird an dieser Stelle auf einen Vergleich der Einnahmenseite verzichtet. Es werden deshalb lediglich die im Rahmen des Projektes ermittelten Daten wiedergegeben.

Vom Betreiber A liegen Schätzungen für Einnahmen beziehungsweise Einsparungen vor. Die Einsparung für die ohne Trocknung ansonsten erforderliche zusätzliche Lagerkapazität wird mit 30.000 €/a beziffert. Für den eingesparten Mineraldünger, der durch die gewonnene ASL ersetzt werden kann, wird mit einer Einsparung von 10.000 €/a gerechnet. Zusätzlich werden nach eigenen Schätzungen rund 12.500 €/a an Transportkosten eingespart, da nur noch die Hälfte an Gärrest ausgebracht werden muss.

Weiterhin gibt der Betreiber an, dass er rund 80.000 €/a an KWK-Bonus aufgrund der Wärmenutzung erhält. Damit ist der KWK-Bonus die mit Abstand größte Einnahmequelle der Anlage.

Auf Nachfrage, ob der Betreiber die Anlage A auch nach 2025 weiter betreiben wird, wenn der KWK-Bonus wegfällt, bejahte dies der Betreiber (Stand 2019). Da teilweise Flächen in einem mit Nitrat belasteten Gebiet (Roten Gebiet) bewirtschaftet werden, werden von betrieblicher Seite die Vorteile der Gärrestaufbereitung zukünftig vor allem in der Ausschleusung des Ammoniumstickstoffs aus dem Wirtschaftsdünger und Umwandlung in den Mineraldünger ASL gesehen.

#### Betriebsaufwand

Vom Betreiber A wird die tägliche Arbeitszeit für Kontrollen mit 10 min veranschlagt. Wöchentlich wird zusätzlich für Säuberungsarbeiten eine Stunde veranschlagt. Für Wartungsarbeiten steht die Anlage rund 50 h pro Jahr still.

#### Fazit

Wie bereits geschildert, ist es von verschiedenen Faktoren, insbesondere von den jeweiligen betrieblichen Gegebenheiten abhängig, welche Aufbereitungstechnik sich im Einzelfall am besten eignet. Eine pauschale Empfehlung ist nicht zielführend. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund steigender Energiepreise und den damit verbundenen hohen Kosten für Mineraldünger der Betrieb von Gärresttrocknungsanlagen wirtschaftlich interessant bleibt und sich für getrocknete Wirtschaftsdünger und ASL zunehmend ein Absatzmarkt entwickelt.

## 8 Handlungsempfehlungen und Auflagenvorschläge

Die Ergebnisse des Projekts sind in Auflagenvorschläge für Vollzugsbehörden mit Hinweisen zum Stand der Technik eingeflossen. Durch die Ausarbeitung von praxisbezogenen Auflagenvorschlägen tragen die gewonnenen Erkenntnisse zum emissionsarmen Betrieb von Wirtschaftsdüngeranfertigungsanlagen bei.

In diesem Zusammenhang wurden bei der Überarbeitung des Biogashandbuchs Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)) Gärrestaufbereitungsanlagen in das Kapitel 2.2.2 aufgenommen. Die Anforderungen an den Betrieb von Gärresttrocknungsanlagen wurden in Form von Auflagenvorschlägen in den Anhang des Kapitels 2.2.2 des Biogashandbuchs Bayern eingearbeitet. Bei den Auflagenvorschlägen wurden die Besonderheiten verschiedener Aufbereitungstechniken und Abgasreinigungstechniken beispielsweise Trockner mit Chemowäschern, Vakuumverdampfungsverfahren oder die Trocknung mit BHKW-Abgasen (BHKW-Abgastrockner) berücksichtigt. Die Auflagenvorschläge befinden sich außerdem im Anhang zu diesem Bericht.

### Handreichung und Handlungsempfehlungen

Im Folgenden eine kurze Handreichung und eine Handlungsempfehlung für die Vollzugsbehörden gegeben. Darin werden kurz und kompakt die relevanten Emissionen bei Gärresttrocknungsanlagen, die gängigen Abgasreinigungsverfahren sowie eine Art Steckbrief der verschiedenen Trocknungsverfahren wiedergegeben.

### Relevante Emissionen bei Gärresttrocknungsanlagen

- Ammoniak:  
Aufgrund des pH-Werts des Gärrestes und der Temperaturen im Trockner werden im Trocknungsprozess große Mengen an Ammoniak freigesetzt. Ein saurer Wäscher oder eine gleichwertige emissionsmindernde Maßnahme sind zwingend erforderlich. Damit sind in der Regel zuverlässig folgende Anforderungen der TA Luft 2021 einhaltbar:  
Emissionsgrenzwert: 10 mg/m<sup>3</sup>  
Emissionsminderungsgrad: ≥ 90 %
- Gesamtstaub:  
Vor allem relevant bei Trocknung auf hohe Trockensubstanzgehalte (Bandtrockner, Rührwerkstrockner, BHKW-Abgastrockner). Wird im Wäscher/Gewebefilter in der Regel zuverlässig zurückgehalten.  
Emissionsgrenzwert TA Luft 2021: 10 mg/m<sup>3</sup>
- Gesamtkohlenstoff:  
Sofern der Gärrest ausreichend vergoren wurde und weitgehend ausgegast hat, ist mit keinen erhöhten Emissionen an Gesamt-C zu rechnen, zumal die Verweildauer im Trockner vergleichsweise kurz ist und aerobe Bedingungen vorliegen.  
BHKW-Abgastrockner sind aufgrund des anteilig enthaltenen Methans aus dem BHKW-Abgas gegebenenfalls gesondert zu betrachten. Das heißt, dass der Anteil des Gesamt-C aus dem BHKW-Abgas abgezogen werden kann, um den Grenzwert der TA Luft einhalten zu können.  
Emissionsgrenzwert TA Luft 2021: 50 mg/m<sup>3</sup>
- gegebenenfalls Geruch:  
In der Regel ist nicht mit erhöhten Geruchsemissionen oder gar Geruchsbeschwerden zu rechnen. BHKW-Abgastrocknern sind aufgrund des genutzten BHKW-Abgases höhere Geruchsemissionen zu eigen, die sich hedonisch aber vom „Gärrest-typischen“ Geruch abgrenzen. Emissionsbegrenzungen werden nur für Abfallanlagen gefordert, gegebenenfalls sind bei

NawaRo-Anlagen im Einzelfall Auflagenvorbehalte sinnvoll.  
Emissionsgrenzwert (nur für Abfallanlagen) TA Luft 2021: 500 GE/m<sup>3</sup>

### **Abgasreinigung**

Es kann abgeschätzt werden, dass ein Gärresttrockner mit einem Gärrestdurchsatz von 10 kt pro Jahr ohne Abgasreinigung etwa 20 t Ammoniak emittieren würde. Eine geeignete Abgasreinigung ist für Gärresttrockner daher in jedem Fall erforderlich. Je nach Trocknungsverfahren sind unterschiedliche Abgasreinigungsverfahren gängige Praxis. Die häufigsten Abgasreinigungsverfahren zur Minderung der Ammoniakemissionen sind Chemowäscher und Brüdenwäscher. Möglich sind je nach Verfahren (siehe unten) auch Gärrestansäuerung oder Säureeindüsung in die Trocknungskammer. Zur Staubabscheidung sind Gewebefilter erforderlich, sofern keine Chemowäscher oder Brüdenwäscher betrieben werden.

Grundsätzlich können bei geeigneter Auslegung und Betriebsweise der Abgasreinigungsanlagen die Emissionsgrenzwerte und der Emissionsminderungsgrad für Ammoniak nach TA Luft 2021 eingehalten werden. Die Anlagen müssen grundsätzlich so betrieben werden, dass die Emissionsgrenzwerte auch im Dauerbetrieb sicher eingehalten werden. Dazu sollten vom Betreiber im Rahmen der Anlagenüberwachung entsprechende Nachweise gefordert werden.

Insbesondere bezüglich der Ammoniakabscheidung ist eine kontinuierlich effektive Abgasreinigung unbedingt erforderlich. Dies ist mit einer Steuer- und Regelungseinrichtung für die Säuredosierung, einer Alarmfunktion bei Ausfall oder Unterschreitung der Säuredosierung und einer geeigneten Aufzeichnung und Dokumentation der Betriebsdaten sicherzustellen. Die Aufzeichnung der Betriebsdaten sollte zum Beispiel über einen Datenlogger erfolgen.

### **Trocknungsverfahren**

Bandrockner:

- Kontinuierliches Verfahren
- Trocknung auf über 90 % TS möglich
- Separation als Gärrestvorbehandlung optional (Gärrest muss förderfähig sein – nur separierten Feststoff trocknen oder Rückmischung von getrocknetem Gärrest)
- Abgasreinigung: üblicherweise Chemowäscher
- Auch Ausführung in Kombination mit BHKW-Abgastrocknung möglich. Hierzu werden BHKW-Abgase und Warmluft vermischt.

Rührwerkstrockner:

- Batchverfahren
- Trocknung auf über 90 % TS möglich
- Keine Separation erforderlich (Teile des getrockneten Gärrestes bleiben im Trocknungsbehälter)
- Abgasreinigung: Säureeindüsung in Trockner und Gewebefilter

Schaufelradrockner:

- Batchverfahren
- „Eindicken“ des Gärrestes auf rund 12 % TS, sodass Gärrest pumpfähig bleibt
- Separation erforderlich (Gärrest darf keine Fasern enthalten)
- Abgasreinigung: üblicherweise Chemowäscher

Vakuumverdampfer:

- Kontinuierliches Verfahren
- „Eindicken“ des Gärrestes auf rund 20 % TS, sodass Gärrest pumpfähig bleibt
- Meist nahezu emissionsfrei
- Separation erforderlich (Gärrest darf keine Fasern enthalten)
- Abgasreinigung: üblicherweise integrierte(r) Brüdenwäscher mit Schwefelsäurezugabe

BHKW-Abgastrockner:

- Kontinuierliches Verfahren
- Verwenden BHKW-Abgase vermischt mit Frischluft, üblich ist Prinzip „Rotationstrockner“
- Trocknung auf über 90 % TS möglich
- Keine Separation erforderlich (Rückmischung von getrocknetem Gärrest)
- Abgasreinigung: Häufig wird die Ansäuerung des Gärrestes zur Minderung der Ammoniakemissionen praktiziert, zur Staubabscheidung werden Gewebefilter eingesetzt

### **Ergänzende Hinweise für die Genehmigung und Anlagenüberwachung**

Erfahrungsgemäß sind die eingereichten Antragsunterlagen häufig unvollständig, wodurch sich die Genehmigung der Anlagen verzögert. Es empfiehlt sich eine frühzeitige Absprache zwischen Betreiber, Planer und Behörden, um die Genehmigung der Anlage zu beschleunigen. Dies kann beispielsweise im Rahmen einer Antragskonferenz erfolgen. Dabei kann im Vorfeld der Antragseinreichung abgestimmt werden, welche Gutachten benötigt werden, ob eine Ausbreitungsrechnung erforderlich wird, ob stickstoffempfindliche Biotopie berücksichtigt werden müssen und welche Anlagendaten für eine Beurteilung durch die Behörden erforderlich sind (zum Beispiel Verfahrensbeschreibungen, Fließbilder, Einsatzstoffe mitsamt Herkunft, Emissionsminderungsmaßnahmen). Es ist wichtig, dass die dauerhafte Funktion der Abgasreinigung durch die Anlagentechnik gewährleistet werden kann. Die Antragsunterlagen sollten daher auch ausreichende Informationen zur Abgasreinigung und Schwefelsäuredosierung enthalten – insbesondere zum Regelungskonzept, den Alarmfunktionen und der Dokumentation.

Die zur Neutralisierung des Ammoniaks erforderliche Schwefelsäuremenge lässt sich aus dem Gärrestdurchsatz, dem Ammoniumgehalt im Gärrest sowie der Schwefelsäurekonzentration abschätzen. Hierzu wurde eine Formel entwickelt, die in Kapitel 4 dargestellt und erläutert wird.

Bezüglich der Auflagen im Bescheid können zur Orientierung die Aufslagenvorschläge des LfU im Biogashandbuch Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)) beziehungsweise im Anhang dieses Berichts herangezogen werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat in Bayern die Anzahl der in Betrieb befindlichen Trocknungsanlagen für Wirtschaftsdünger stetig zugenommen. Der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Bonus des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) und die Novellen der Düngeverordnung (DüV) 2017 und 2020 mit erhöhten Anforderungen an die Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zum Schutz des Grundwassers vor zu hohen Nitratbelastungen führten dazu, dass besonders Betreiber von Biogasmotoranlagen zunehmend Trocknungsanlagen für Gärreste betreiben oder den Betrieb neu beantragen. Dabei wird noch nicht genutzte motorische Abwärme für den Trocknungsprozess genutzt. Zwischenzeitlich sind Trocknungstechniken unterschiedlicher Komplexität verfügbar, die Behörden bei Genehmigung und Überwachung der Anlagen vor Herausforderungen stellen.

Aus Sicht der Luftreinhaltung sind die luftgetragenen Emissionen dieser Anlagen zu beachten. Besonders von Bedeutung sind Ammoniakemissionen, die beim Trocknungsprozess freigesetzt werden können und vor dem Hintergrund einer bereits hohen Ammoniakvorbelastung in der Luft zu vermeiden sind. Es muss deshalb sichergestellt werden, dass Stickstoffverbindungen weitestgehend im erzeugten Trockengut beziehungsweise in den erzeugten Düngemitteln verbleiben und nicht über den Luftpfad als zusätzliche Ammoniakemissionen freigesetzt werden. Dies gilt in besonderem Maße bei benachbarten stickstoffempfindlichen FFH-Gebieten oder Biotopen.

Vom Landesamt für Umwelt wurde deshalb ein Projekt zur Untersuchung des Emissionsverhaltens und zum Stand der Technik von bayerischen Wirtschaftsdüngeranfertigungsanlagen initiiert. Das Projekt wurde im Zeitraum von 01.02.2019 bis 30.06.2022 durchgeführt. Der Fokus lag aufgrund der großen Anlagenzahl bei Anlagen zur Trocknung von Gärresten.

Ziel des Projekts war die Untersuchung von Gärresttrocknungsanlagen hinsichtlich Bestand, Verfahrenstechnik, Emissionen und Maßnahmen zur Emissionsminderung. Dazu wurden Genehmigungsbehörden und Betreiber befragt, Literaturrecherche betrieben, Fachtagungen besucht, Ortseinsichten durchgeführt und Emissionsmessberichte ausgewertet. Weiterhin wurden die Luftemissionen von drei unterschiedlichen Typen von Gärresttrocknungsanlagen messtechnisch untersucht. Dabei wurden wichtige Rand- und Betriebsparameter erfasst und – soweit möglich – eine Bewertung hinsichtlich der dauerhaften Funktion der Emissionsminderungseinrichtungen vorgenommen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Auflagenvorschläge für die Genehmigung der Anlagen abgeleitet. Die Auflagenvorschläge sind in der Anlage zu diesem Bericht zu finden. Sie sind, soweit erforderlich, auf die unterschiedlichen Anlagentechniken abgestimmt.

### Bestandserfassung und Verfahrenstechnik

Die Bestandserfassung von Gärresttrocknungsanlagen in Bayern hat zum Stichtag 20.09.2021, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, folgendes Bild ergeben:

Gemäß den durchgeführten Recherchen waren zum Stichtag in Bayern 99 Gärresttrocknungsanlagen in Betrieb, die in der Regel immissionsschutzrechtlich genehmigt sind. Weitere 32 Anlagen befanden sich in der Planung. Die häufigsten in Bayern eingesetzten beziehungsweise geplanten Verfahren zur Gärrestaufbereitung sind Schaufelradrockner (36), Bandrockner (34) und Vakuumverdampfer (33). Es folgen Rührwerkrockner (11), Trocknungsverfahren mit direkter Nutzung von BHKW-Abgasen (11) und Sonstige (6).

Die Trocknung der Gärreste erfolgt grundsätzlich durch Übertragung von Wärmeenergie auf das Trockengut, entweder durch den direkten Kontakt mit Heißluft oder Abgas (Konvektionstrocknung) oder

indirekt über beheizte Flächen (Kontaktrocknung). Beim indirekt beheizten Trocknungsverfahren wird die Abwärme von BHKW-Motoren genutzt. Die Wärme wird dazu über einen Wärmetauscher auf einen Luftstrom übertragen, mit dem der Gärrest getrocknet wird. Schaufelradrockner, Vakuumverdampfer, Rührwerkrockner und die meisten Bandrockner sind indirekt beheizte Trockner. Bei der direkt beheizten Trocknung wird das BHKW-Abgas direkt, teils unter Beimengung von (erwärmter) Frischluft, auf den zu trocknenden Gärrest geführt. Diese Trockner werden häufig als BHKW-Abgastrockner bezeichnet. Es zeigte sich ein Trend, dass zuletzt anstelle von einfacheren Bandrockner-Systemen zunehmend komplexere Verfahren wie Vakuumverdampfer, aber auch BHKW-Abgastrockner errichtet wurden.

Hinsichtlich der regionalen Verteilung der Anlagen in Bayern zeigte sich, dass die Verteilung mit den sogenannten Roten Gebieten nach Düngeverordnung 2020 und mit der Verteilung von Biogasanlagen korreliert. Insbesondere im südlichen Mittelfranken, nördlichen Schwaben, östlichen Oberbayern und südlichen Niederbayern befindet sich eine große Anzahl an Gärresttrocknern.

#### Emissionen und Maßnahmen zur Emissionsminderung

Allen Trocknern ist gemeinsam, dass aufgrund des pH-Wert des Gärrestes, der Trocknungstemperaturen im Trockner und des hohen Ammonium-Stickstoffgehaltes der Gärreste beim Trocknungsprozess große Mengen an Ammoniak freigesetzt werden können. Geeignete Maßnahmen zur Ammoniakminderung sind daher zwingend erforderlich. Üblicherweise werden Ammoniak beziehungsweise Ammoniumverbindungen mit Schwefelsäure in Kontakt gebracht, woraufhin Ammoniumsulfat entsteht. Ammoniumsulfat kann je nach Abgasreinigungsmaßnahme kristallin vorliegen und dem Gärrest beige-mischt werden oder beim Einsatz von Wäschern als Lösung (ASL) vorliegen. Weitere zu betrachtende Emissionen sind Gesamtstaub (vor allem bei Endprodukten mit hohem Trockengehalt), Gesamtkohlenstoff und gegebenenfalls Gerüche.

Die in den recherchierten bayerischen Anlagen am häufigsten eingesetzte Form der Abgasreinigung sind Chemowäscher, die vor allem bei Schaufelradrocknern und Bandrocknern zum Einsatz kommen. Vakuumverdampfer sind meist mit integrierten Brüdenwäschern ausgestattet, die mit Schwefelsäure versetzt werden. Bei Rührwerkrockner erfolgt zur Ammoniakabscheidung in der Regel eine Säureeindüsung direkt in die Trocknungskammer. Die Entstaubung der Abgase erfolgt mit Gewebefiltern. In den sogenannten BHKW-Abgastrocknern werden die Gärreste meist durch Zugabe von Schwefelsäure angesäuert. Die Abgase werden dann mittels Gewebefilter entstaubt. Vereinzelt werden in Gärresttrocknern auch Biofilter oder Kombinationen aus verschiedenen Abgasreinigungstechniken eingesetzt. In einigen Fällen wurden keine Abgasreinigungsmaßnahmen betrieben. Dies ist aus immissionsschutzfachlicher Sicht abzulehnen.

Im Projekt wurden insgesamt 29 Emissionsmessberichte über Messungen nach § 28 BImSchG ausgewertet. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Abgasreinigungssysteme bei geeigneter Auslegung und Betriebsweise grundsätzlich geeignet sind, die Emissionsgrenzwerte und den Emissionsminderungsgrad für Ammoniak von 90 Prozent der TA Luft 2021 einzuhalten. Es zeigte sich jedoch auch, dass in einigen Fällen Grenzwerte nicht eingehalten wurden. So wurde beim Einsatz von Chemowäschern der Grenzwert für Ammoniak von  $10 \text{ mg/m}^3$  in drei Fällen bei insgesamt 14 betrachteten Chemowäschern nicht eingehalten. Bei der Säureeindüsung in die Trockenkammer wurde von sieben betrachteten Fällen in einem Fall der Emissionsgrenzwert für Ammoniak nicht eingehalten. Bei der Ansäuerung von Gärresten wurde in den vier betrachteten Fällen der Grenzwert für Ammoniak eingehalten.

Im Fall eines zur Abgasreinigung eingesetzten Biofilters wurde der Emissionsgrenzwert für Ammoniak ebenfalls überschritten. Bei der alleinigen Verwendung von Biofiltern zur Ammoniakabscheidung ist

derzeit noch unklar, ob der Ammoniakgrenzwert und der Emissionsminderungsgrad für Ammoniak der TA Luft 2021 dauerhaft zuverlässig eingehalten werden kann. Laut Richtlinie VDI 3477 Biologische Abluftreinigung (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2016)) kann Ammoniak, aber auch Schwefelwasserstoff, im Biofilter erhebliche Probleme durch das Entstehen saurer Reaktionsprodukte verursachen. Die dadurch verursachte pH-Wert-Absenkung im Filtermaterial kann zu einer stetigen Abnahme der Reinigungsleistung führen. Abhilfe schaffen laut Richtlinie VDI 3477 Wäscher oder Absorber. Zur sicheren Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes beziehungsweise des Minderungsgrades der TA Luft 2021 wird deshalb empfohlen, geeignete Wäscher vorzuschalten, wenn Ammoniak vorher nicht anderweitig abgeschieden wird.

Bei der Prüfung der Messberichte war festzustellen, dass in einigen Messberichten die Angaben zur Anlagenbeschreibung und zum Betriebszustand während der Messung unvollständig waren. In diesen Fällen kann nicht beurteilt werden, ob die Anlage bestimmungsgemäß beziehungsweise gemäß den Vorgaben der TA Luft 2021 mit den höchsten Emissionen während den Messungen betrieben wurde. Aus den Angaben zu Gärrestdurchsatz, Ammoniumgehalt in den Gärresten und Schwefelsäurekonzentration kann der benötigte Schwefelsäureverbrauch abgeschätzt werden. Hierzu wurde eine Formel entwickelt, die in Kapitel 4 vorgestellt und erläutert wird.

#### Emissionsmessungen an Gärresttrocknungsanlagen

Im Projekt wurden die Emissionen bei drei Gärresttrocknern messtechnisch untersucht. Die Emissionsmessungen wurden an eine nach § 29b BImSchG bekannt gegebene Stelle vergeben. Für die Messungen wurden Trocknungsanlagen unterschiedlichen Typs ausgewählt. Gemessen wurde ein Schaufelradrockner mit Chemowäscher (Anlage A), ein Bandrockner mit Chemowäscher (Anlage B) und ein Rotationstrockner, indem die Trocknung durch BHKW-Abgase gemischt mit Frischluft erfolgt (Anlage C). Beim Rotationstrockner werden die Gärreste zur Minderung der Ammoniakemissionen mit Schwefelsäure versetzt. In den Chemowäschern wurde jeweils Schwefelsäure eingesetzt. In der Anlage A wurde zur Trocknung die Abwärme des BHKW Motors genutzt, in der Anlage B wurden zur Trocknung kombiniert BHKW-Abgase und die Abwärme des Motors zur Trocknung verwendet.

An allen Anlagen wurden im Reingas die emissionsbegrenzten Luftschadstoffe Ammoniak, Gesamtstaub, Gesamt-C sowie zusätzlich Methan und Schwefelwasserstoff gemessen. Da die Anlagen B und C zur Trocknung BHKW-Abgase einsetzen, wurden dort außerdem die Emissionen an Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid und Formaldehyd sowie Gerüche untersucht. An der Anlage C wurden außerdem die Motoremissionen gemessen. Neben den Reingasmessungen wurden an den Anlagen A und B Rohgasemissionsmessungen vor den Chemowäschern durchgeführt, um Informationen über die Höhe der Ammoniakemissionen im Rohgas zu erhalten und den Emissionsminderungsgrad an Ammoniak bestimmen zu können. Außerdem wurde untersucht, wie sich die mit den Motorenabgasen eingebrachten Schadstoffe im Trockner beziehungsweise in der Abgasreinigung verhalten. Weiterhin wurden wichtige Rand- und Betriebsparameter der Anlage erfasst. Damit sollten Rückschlüsse auch im Hinblick auf die Überwachung der dauerhaften Funktion der Abgasreinigung zur Abscheidung von Ammoniak gezogen werden. Zu den untersuchten Parametern zählen unter anderem Gärrestdurchsatz, Schwefelsäuremenge, Temperaturen, pH-Wert und Leitwert in den Wäschern.

Die Messungen zeigten, dass, wie zu erwarten war, Ammoniak aufgrund der durch den Trocknungsprozess verursachten Emissionen der umweltrelevanteste Luftschadstoff beim Betrieb von Gärresttrocknern ist. Bei allen untersuchten Anlagen wurden durch die eingesetzten Emissionsminderungsmaßnahmen die Grenzwerte der TA Luft 2021 für Ammoniak, für Gesamtstaub und für Gesamt-C eingehalten. Auch der Emissionsminderungsgrad der TA Luft 2021 für Ammoniak von 90 % wurde beim Einsatz von Chemowäschern eingehalten. Bei der Anlage C, in der zur Trocknung BHKW-Abgase

(BHKW-Abgastrockner) eingesetzt werden zeigte sich, dass die Emissionen an Gesamt-C, Formaldehyd, Schwefeloxiden, Stickstoffoxiden und Gerüchen überwiegend durch die Motorenabgase bestimmt wurden. Insofern traten im Abgas der Anlage C entsprechende Geruchs- und Gesamt-C Emissionen auf. Im Abgas des Trockners konnte der Gesamt-C Grenzwert der TA Luft 2021 von  $50 \text{ mg/m}^3$  nur unter der Voraussetzung eingehalten werden, dass der Gesamt-C Anteil der Motoranlage anteilig abgezogen wird. Dies sollte bei der Genehmigung von BHKW-Abgastrocknern berücksichtigt werden. Eine Reduzierung der Formaldehydemissionen über den Chemowäscher konnte bei Anlage B nicht festgestellt werden.

Zu berücksichtigen ist, dass Messungen nur eine Momentaufnahme sind. Im Projekt wurde an den untersuchten Anlagen deshalb auch der Frage nachgegangen, ob die Abgasabscheidung den Ammoniakgrenzwert dauerhaft einhalten kann. Dazu wurde versucht, die dauerhafte Funktion der eingesetzten Systeme rückwirkend nachzuvollziehen. Es zeigte sich, dass dies bei der Anlage A beim dort eingesetzten Chemowäscher sehr gut möglich war. Die Anlage war mit einem gut funktionierenden pH-Wert-Regelungskonzept für die Schwefelsäuredosierung und einer Leitfähigkeitsregelung ausgestattet, die die Abschlammung des Wäschers zuverlässig steuerte. Die Aufzeichnungen waren über einen Datenlogger auslesbar und rückverfolgbar. Damit kann bei der Anlage von einer dauerhaften Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes ausgegangen werden.

Bei den beiden anderen untersuchten Anlagen zeigte sich, dass die Regelung der Ammoniakabscheidung Optimierungsbedarf hat, um deren dauerhafte Funktion sicherzustellen. Eine Rückverfolgbarkeit der dauerhaften Funktion der Abgasreinigung war bei diesen Anlagen nicht möglich, da die Betriebsparameter der Abgasreinigung nur eingeschränkt beurteilbar waren. Um die Funktion der Abgasreinigung und die Einhaltung der Grenzwerte im Dauerbetrieb zu gewährleisten, sind aus fachlicher Sicht zu fordern:

- eine Steuer- und Regelungseinrichtung für die Säuredosierung, sodass die Säure in Abhängigkeit von Gärrestdurchsatz und Ammoniumgehalt des Gärrestes zudosiert wird
- eine Alarmfunktion bei Ausfall der Säuredosierung oder bei Unterschreitung der erforderlichen Mindestmenge
- eine geeignete Aufzeichnung und Dokumentation der wichtigsten Betriebsparameter, insbesondere der Säuredosierung. Dies kann beispielsweise mittels Datenlogger oder elektronischen Betriebstagebuches erfolgen.

Bei der Genehmigung von Gärresttrocknungsanlagen ist deshalb darauf zu achten, dass in den Genehmigungsanträgen Regelungskonzepte beschrieben sind, mit denen die dauerhafte Funktion der Ammoniakabscheidung sichergestellt wird. Dabei sollte auch beachtet werden, dass vom Betreiber gegebenenfalls Schwefelsäure in unterschiedlichen Konzentrationen eingesetzt wird. In den Anträgen sollte außerdem angegeben werden, welche Betriebsparameter mittels Datenlogger kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet werden. Dies sollten in den Auflagen von Genehmigungsbescheiden entsprechend Berücksichtigung finden. Zur Vermeidung von Grenzwertüberschreitungen ist auf eine ausreichende Auslegung der Abgasreinigungsanlagen und eine bestimmungsgemäße Betriebsführung zu achten.

#### Stickstoffbilanzierung

Im Projekt wurde bei den messtechnisch untersuchten Anlagen versucht, eine Stickstoffbilanzierung durchzuführen, um den Verbleib des Stickstoffs beim Trocknungsprozess zu klären. Dazu wurden die Gärreste vor und nach der Trocknung beprobt und auf den Stickstoffgehalt analysiert. Im Ergebnis

konnte in den getrockneten Gärresten jedoch nur etwa die Hälfte des Ammoniumstickstoffs der unbehandelten Gärreste wiedergefunden werden. Der Verbleib der anderen Hälfte ist ungeklärt. Bei den Bilanzierungen waren jedoch erhebliche Fehlerquellen bei Probenahme, Analytik und insbesondere der exakten Erfassung von Mengenströme nicht auszuschließen. Die Ergebnisse der Stickstoffbilanzierung sind deshalb nur eingeschränkt aussagekräftig.

#### Wirtschaftlichkeit

Hinsichtlich Wirtschaftlichkeit der Trockner kann keine klare Empfehlung gegeben werden. Die Trocknungsverfahren unterscheiden sich teilweise erheblich in den Anschaffungskosten. Ausschlaggebender sind aber die zu behandelnde Gärrestmenge, die örtlichen Gegebenheiten und vor allem die gewünschten Endprodukte beziehungsweise deren Vermarktbarkeit.

#### Ausblick

Die Anzahl an Gärresttrocknern wird weiter zunehmen und dabei werden auch neue Verfahren auf den Markt drängen. Im Rahmen seiner Tätigkeiten wird das LfU die Entwicklung und die Thematik weiterhin aufmerksam verfolgen und den Vollzugsbehörden für fachliche Bewertungen zur Verfügung stehen.

Für die gängigen Verfahren am Markt hat das LfU aus den Erkenntnissen aus diesem Projekt Auflagenvorschläge erstellt, die den Genehmigungsbehörden als Handlungsempfehlungen dienen. Die Auflagenvorschläge finden sich im Anhang zu diesem Bericht und im Biogashandbuch Bayern im Anhang zum Kapitel 2.2.2 „Immissionsschutz, einschließlich Klimaschutz“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021)).

Die Erkenntnisse des Projekts werden außerdem in die zurzeit in Arbeit befindlichen Richtlinien VDI 3475-8/9 mit dem Arbeitstitel „Emissionsminderung – Gärrestaufbereitung und Wirtschaftsdünger aufbereitung“ eingebracht.

## 10 Literaturverzeichnis

agriKomp [Hrsg.] (2021): agriFer Plus Gärproduktaufbereitung der neuen Generation, 6 S., Merken-  
dorf, [https://agrikomp.com/wp-content/uploads/agriFer\\_Plus\\_AK\\_DE.pdf](https://agrikomp.com/wp-content/uploads/agriFer_Plus_AK_DE.pdf), (Abruf am 12.04.2022).

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021):  
Ausführungsverordnung DüV – rote Gebiete, gelbe Gebiete, [https://www.lfl.bayern.de/iab/duen-  
gung/207027/index.php](https://www.lfl.bayern.de/iab/duen-<br/>gung/207027/index.php), (Abruf am 12.04.2022).

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [Hrsg.] (2022): Punktekarte der bayerischen, landwirt-  
schaftlichen Biogaserzeugung zum Stichtag 31.12.2021 – Bearbeitung: Strobl, M., Freising

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021): Biogashandbuch Bayern, Kapitel 2.2.2: Immissi-  
onsschutz, 57 S., Augsburg, <https://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap222.pdf>, (Ab-  
ruf am 12.04.2022).

Betreiber Anlage A (Anonym) (2019): Drei Fotos von Anlage A, zur Verfügung gestellt vom Betreiber.

Betreiber Anlage B (Anonym) (2020): Zwei Fotos von Anlage B, zur Verfügung gestellt vom Betreiber.

Betreiber Anlage C (Anonym) (2021): Vier Fotos von Anlage C, zur Verfügung gestellt vom Betreiber.

Biogastechnik Süd GmbH [Hrsg.] (2018): Gärrestverdampfung Vapogant, 12 S., Isny im Allgäu,  
[https://www.energie9000.com/wp-content/uploads/2018/07/101-012-02\\_BRO\\_DE\\_VVT-GRV\\_KD.pdf](https://www.energie9000.com/wp-content/uploads/2018/07/101-012-02_BRO_DE_VVT-GRV_KD.pdf)  
(Abruf am 12.04.2022).

Biogastechnik Süd GmbH [Hrsg.] (2021): Technischer Vorgang der Gärrestverdampfung Vapogant,  
[https://biogastechnik-sued.de/wp-content/uploads/2021/02/01\\_BTSUED\\_BD\\_001\\_Vapogant-RI-  
einfach.png](https://biogastechnik-sued.de/wp-content/uploads/2021/02/01_BTSUED_BD_001_Vapogant-RI-<br/>einfach.png), (Abruf am 12.04.2022).

Buchta, G.: Zur Verfügung gestelltes Foto der Fa. agriKomp GmbH.

Döhler, H., Döhler, S., Möller, K., Bilbao, J., Campos, A., Fischer, H., Hartmann, S., Burton, C., Meier,  
U., Hersener, J.-L., Loyon, L., Rennes, I., Snauwaert, E., Vannecke, T., Dinuccio, E., Gioelli, F., Bal-  
sari, P., Provolo, G., Hansen, M. N. (2021): Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung  
unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF), 249 S., Dessau-Roßlau,  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-07-  
14\\_texte\\_109-2021\\_intensivtierhaltung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-07-<br/>14_texte_109-2021_intensivtierhaltung.pdf), (Abruf am 12.04.2022).

Einkammerer, M.: Gärsubstrattrockner Fa. Romberger GmbH, [https://www.romber-  
ger.de/G%C3%A4rsubstrattrockner#&qid=1330879603&pid=2](https://www.romber-<br/>ger.de/G%C3%A4rsubstrattrockner#&qid=1330879603&pid=2), (Abruf am 12.04.2022).

Fachverband Biogas e.V. [Hrsg.] (2019): Düngen mit Gärprodukten, 68 S., Freising.

Josef Romberger Maschinenfabrik GmbH [Hrsg.]: RST Gärsubstrattrocknung für Biogasanlagen, Trif-  
tern, <https://www.romberger.de/G%C3%A4rsubstrattrockner>, (Abruf am 12.04.2022).

jumbo group smart dry GmbH [Hrsg.]: Herstellerunterlagen und Hersteller-Homepage,  
<https://www.jumbo-group.de/our-services/gaerreeste-trockner/>, (Abruf am 12.04.2022).

jumbo group smart dry GmbH [Hrsg.]: Gärreste Trockner, [https://www.jumbo-group.de/wp-content/up-  
loads/3105110\\_158.jpg](https://www.jumbo-group.de/wp-content/up-<br/>loads/3105110_158.jpg), (Abruf am 12.04.2022).

Meiners, B. (2016): AgroEnergien Mississippi-Gärresttrockner, [https://agroenergien.de/gaerresttrock-  
nung/mississippi-gaerresttrockner/](https://agroenergien.de/gaerresttrock-<br/>nung/mississippi-gaerresttrockner/), (Abruf am 12.04.2022).

- NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH [Hrsg.] (2018): NEWtainer Flyer, [https://www.new-eco-tec.com/download/NEWtainer\\_Alleskoenner\\_DE\\_Download.pdf](https://www.new-eco-tec.com/download/NEWtainer_Alleskoenner_DE_Download.pdf), (Abruf am 12.04.2022).
- NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH [Hrsg.]: Herstellerunterlagen und Hersteller-Homepage, <https://www.new-eco-tec.com/trockneruebersicht>, (Abruf am 12.04.2022).
- NEW eco-tec Verfahrenstechnik GmbH [Hrsg.]: NEWtainer Substrator Gärresttrocknung, <https://pdf.agriexpo.online/de/pdf/new-eco-tec-verfahrenstechnik-gmbh/substrator/169825-10949.html>, 8 S., (Abruf am 26.04.2022).
- RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH [Hrsg.] (2021): RHINO Rührwerkstrockner, [https://www.rhs-tech.de/wp-content/uploads/2021/11/2069-238-RHS\\_GmbH\\_Brosch%C3%BCre\\_11-21\\_DE\\_V1\\_doppelseitig.pdf](https://www.rhs-tech.de/wp-content/uploads/2021/11/2069-238-RHS_GmbH_Brosch%C3%BCre_11-21_DE_V1_doppelseitig.pdf), (Abruf am 12.04.2022).
- RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH [Hrsg.]: Fließbild Rhino Agrar Konzept 224A, Herstellerunterlagen, Ahaus.
- RHS Maschinen- u. Anlagenbau GmbH [Hrsg.]: Schnittbild RHINO.224A, Herstellerunterlagen, Ahaus.
- Schönhammer Wärmetauscher und Lüftungstechnik GmbH [Hrsg.] (2018): Umwelttechnik Abluftreinigung, [https://www.schoenhammer.de/upload/Prospekte/Prospekt\\_Abluftreinigung\\_2018\\_DE\\_web.pdf](https://www.schoenhammer.de/upload/Prospekte/Prospekt_Abluftreinigung_2018_DE_web.pdf), (Abruf am 12.04.2022).
- Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Richter, F., Raussen, T., Kern, M., Turk, T., Reinhold, G. (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle, 240 S., Dessau-Roßlau, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15\\_texte\\_41-2019\\_biogasproduktion.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_texte_41-2019_biogasproduktion.pdf), (Abruf am 12.04.2022).
- Strobl, M. (2022): Biogas in Zahlen – Statistik zur bayerischen Biogasproduktion, Biogasbetreiberdatenbank Bayern, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031607/>, (Abruf am 12.04.2022).
- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2018): Daten zur Umwelt 2018: Umwelt und Landwirtschaft, 158 S., Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2018-umwelt-landwirtschaft>, (Abruf am 13.05.2022).
- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2019): Stickstoffüberschuss der Flächenbilanz, <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/verursacher/landwirtschaft/wie-ist-der-stickstoffueberschuss-in-deutschland>, Dessau-Roßlau, (Abruf am 22.10.2021).
- Umweltbundesamt [Hrsg.] (2022): Ammoniak-Emissionen nach Quellkategorien, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen#entwicklung-seit-1990>, (Abruf am 03.05.2022).
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2016): Richtlinie VDI 3477 – Biologische Abgasreinigung – Biofilter, 102 S., Düsseldorf.
- Wetter, C., Tiemann, M., Brüggling, E., Bruns, A., Kerkering, M. (2008): Optimierte Nutzung von Nährstoffen aus Biogasanlagen durch Ammoniakstrippung und Gärrestaufbereitung.
- WITERRA GmbH [Hrsg.] (2021): WITERRA-Humusanlage, <https://www.witerra.de/humusanlage>, (Abruf am 12.04.2022).

## 11 Anhang

### Auflagenvorschläge zur Luftreinhaltung von Gärresttrocknungsanlagen

#### **1 Allgemeine Anforderungen**

- 1.1 Zulässiger Betriebsumfang / Kapazität:  
Wir bitten die zuständige Behörde, die geeigneten Festlegungen zu treffen.
- 1.2 Die Gärresttrocknung ist entsprechend den Antragsunterlagen und den Vorgaben des Herstellers zu errichten und ordnungsgemäß zu betreiben, soweit nachfolgend nicht anders bestimmt.
- 1.3 In der Gärresttrocknungsanlage darf ausschließlich Gärrest aus (*einsetzen: Herkunft*) eingesetzt werden. Der in Auflage 1.1 festgelegte maximale Gesamtdurchsatz der Gärresttrocknungsanlage darf nicht überschritten werden.
- 1.4 Die Trocknungsanlage ist regelmäßig entsprechend den Herstellervorgaben zu warten sowie auf ordnungsgemäße Einstellung und Funktionsweise hin zu kontrollieren. Sofern hierzu kein geeignetes Personal zur Verfügung steht, ist ein Wartungsvertrag mit dem Anlagenhersteller oder einer auf diesem Gebiet einschlägig tätigen Wartungsfirma abzuschließen.
- 1.5 Für den Betrieb, die Wartung und die Instandhaltung aller Einrichtungen der Gärresttrocknungsanlage ist eine Betriebsanweisung unter Berücksichtigung der Herstellervorgaben zu erstellen. Dazu ist ein Pflege- und Wartungskonzept einschließlich Festlegung der betrieblichen Eigenkontrollen zu erstellen. Die betrieblichen Eigenkontrollen sind mit Angabe von Datum, Art der Prüfung und ggf. Abhilfe- / Korrekturmaßnahmen zu dokumentieren.

#### **2 Emissionsminderung und Emissionsbegrenzung**

- 2.1 Der Gärresttrockner ist so zu betreiben, dass die folgenden Emissionsgrenzwerte im Abgas des Trockners nicht überschritten werden:

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Ammoniak:                     | 10 mg/m <sup>3</sup> und mindestens 90 % Emissionsminderungsgrad* |
| Gesamtstaub:                  | 10 mg/m <sup>3</sup>  |
| Organische Stoffe (Gesamt-C): | 50 mg/m <sup>3</sup> oder 0,50 kg/h                               |

Die Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf das trockene Abgas im Normzustand (101,3 kPa, 273,15 K).

\* Hinweis:

Der Emissionsminderungsgrad von 90 % gilt nur beim Vorhandensein einer nachgeschalteten Abgasreinigung (z. B. Chemowäscher oder Biofilter). Bei integrierter Abgasreinigung (z. B. Ansäuerung Gärrest, Säureeindüsung vor Gewebefilter, Brüdenwäscher) ist die Ermittlung eines Emissionsminderungsgrads anlagenbedingt nicht möglich.

- 2.2 Für Trocknungsanlagen von Gärresten aus Bioabfällen ist nach Nr. 5.4.8.6.2 der TA Luft 2021 die Geruchsstoffkonzentration auf 500 GE/m<sup>3</sup> zu begrenzen, bezogen auf das feuchte Abgas bei 20 °C (293,15 K) und 101,3 kPa.

Hinweis:

Für Gärreste, die nicht abfallstämmig sind, kann eine Begrenzung der Geruchsstoffkonzentration oder ein entsprechender Auflagenvorbehalt im Einzelfall sinnvoll sein.

Bei Vorhandensein einer Gärrestseparierung vor der Trocknung:

- 2.3 Um die Emission von Gerüchen und Ammoniak zu minimieren, sind feste separierte Gärreste bis zu ihrer Ausbringung möglichst abgedeckt und verdichtet zu lagern. Mindestens sind aber eine dreiseitige Umwandung und eine möglichst kleine Oberfläche bei der Lagerung einzuhalten.

### **3 Anforderungen an die Schwefelsäuredosierung zur kontinuierlich effektiven Ammoniakabscheidung**

- 3.1 Abgase aus der Trocknung von Gärresten sind einem Chemowäscher oder einer gleichwertigen Abgasreinigung zur Entfernung von Ammoniak zuzuführen. Dabei ist der kontinuierlich effektive Betrieb der Ammoniakabscheidung sicherzustellen.

Für Chemowäscher gilt:

- 3.2 Die Abgasreinigungsanlage ist mit automatischen Steuer- und Regelungseinrichtungen für die Säuredosierung (pH-Wert- und Leitwertregelung) sowie einer ausreichenden Säurevorlage auszustatten. Die Menge an zudosierter Schwefelsäure ist kontinuierlich zu erfassen. Dies sollte mittels automatischer Durchflussmessung erfolgen. Die zugeführte Menge ist mittels Datenlogger im Betriebstagebuch aufzuzeichnen, in die SPS zu integrieren und zu visualisieren. Die Aufzeichnungen sind mindestens über einen Zeitraum von 3 Jahren aufzubewahren und auf Verlangen der Genehmigungsbehörde vorzulegen.
- 3.3 Fehlfunktionen der Schwefelsäuredosierung (z. B. Ausfall oder Unterschreitung der zur Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes erforderlichen Schwefelsäuredosierung) und das Unterschreiten des Mindestfüllstandes der Säurevorlage sind mit einer Alarmfunktion auszurüsten.
- 3.4 Das Waschwasser der Abgasreinigungsanlage (i. d. R. Ammoniumsulfatlösung) muss in einem separaten, geeigneten Tank gelagert werden und darf nicht in das Gärrestlager zurückgeführt werden.
- 3.5 Chemowäscher sind Nassabscheider und unterliegen damit i. d. R. den Anforderungen der Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider (42. BImSchV).

Für emissionsmindernde Maßnahmen innerhalb der Trocknungskammer (Ansäuerung von Gärresten oder Eindüsung von Schwefelsäure in die Trocknungskammer; anschließend Abgasreinigung mit Gewebefilter) gilt:

- 3.6 Die Gärresttrocknungsanlage ist mit einer Steuer- und Regelungseinrichtung zu betreiben, die die Schwefelsäuredosierung proportional zur eingesetzten Gärrestmenge regelt. Beim Betrieb der Schwefelsäuredosierung sind die Herstellervorgaben zu beachten.
- 3.7 Die zugeführte Gärrestmenge und die zugeführte Schwefelsäuremenge sind kontinuierlich zu erfassen, aufzuzeichnen und bezogen auf ein Kalenderjahr jeweils fortlaufend zu addieren.

Hinweis:

Die Mindestschwefelsäuremenge ist bei Änderungen des Ammoniumgehaltes im Gärrest in Absprache mit der zuständigen Behörde entsprechend anzupassen, sodass der Emissionsgrenzwert für Ammoniak gem. Nr. 2 zu jeder Zeit sicher unterschritten wird. Der Ammoniumgehalt ist hierfür halbjährlich durch chemische Analyse zu überwachen und im Betriebstagebuch zu dokumentieren.

#### **4 Ableitung der Abgase**

- 4.1 Das Abgas der Gärresttrocknung ist in einer Höhe von mindestens [einsetzen: Höhe in m] über Grund abzuleiten.

Hinweis:

In der Regel ist eine Ableithöhe von 10 m über Grund und 3 m über First einzuhalten. Die Anforderungen der VDI 3781 Blatt 4 sind in ihrer gültigen Fassung zu prüfen.

- 4.2 Die Abgase müssen ungehindert senkrecht nach oben austreten. Die Schornsteine dürfen nicht überdacht werden; zum Schutz vor Regeneinfall kann ein Deflektor installiert werden.

#### **5 Messung und Überwachung**

- 5.1 Die erstmaligen Messungen nach Errichtung oder wesentlicher Änderung der Anlage sollen nach Erreichen des ungestörten Betriebes, jedoch frühestens nach dreimonatigem Betrieb und spätestens sechs Monate nach Inbetriebnahme vorgenommen werden.
- 5.2 Alle drei Jahre ist durch Messung einer nach § 29b BImSchG bekannt gegebenen Messstelle nachzuweisen, dass die o. g. Emissionswerte nicht überschritten werden. Spätestens 14 Tage vor Durchführung der Emissionsmessungen ist die Genehmigungsbehörde über den genauen Messtermin in Kenntnis zu setzen.
- 5.3 Zur Gewährleistung einer technisch einwandfreien und gefahrlosen Durchführung der Emissionsmessungen sind im Einvernehmen mit dem vorgesehenen Messinstitut geeignete Messorte und Probenahmestellen festzulegen. Hierbei sind die Anforderungen der DIN EN 15259 hinsichtlich der Messplanung, Messstrecke und der Messplätze einzuhalten.
- 5.4 Die Emissionsmessungen sind entsprechend den Anforderungen der TA Luft (in der aktuellen Fassung) Nr. 5.3.2 zur Messplanung, zur Auswahl von Messverfahren sowie zur Auswertung und Beurteilung der Messergebnisse durchzuführen.
- 5.5 Die Messungen sind möglichst bei ungestörter Betriebsweise mit den höchsten Emissionen durchzuführen. In der Regel ist dies bei maximaler Auslastung und bei Zuführung frischer, unbehandelter Gärreste in den Trockner gegeben.
- 5.6 Bei der Messung müssen die relevanten Betriebsparameter ermittelt werden. Diese unterscheiden sich teilweise je nach Trocknungsverfahren.

- wesentliche Betriebsdaten der Anlage (u. a. Trocknerleistung und Temperaturen)
- eingesetzte Gärrestmenge
- eingesetzte Schwefelsäuremenge und –konzentration
- Output-Mengen (getrocknete Gärreste, ggf. ASL und Kondensat)
- Zustand der Anlage (z. B. Verkrustungen an Sonden oder Füllkörpern, eventuelle Betriebsstörungen)

Bei Chemowäschern:

Es sind pH-Wert und Leitwert der Waschflüssigkeit zu ermitteln. Die Aufzeichnungen des Datenloggers der Schwefelsäuredosierung und des pH-Wertes sind mindestens über den Zeitraum des zurückliegenden Jahres dem Messbericht als Anlage beizufügen.

Bei direkt beheizten Trocknern mit Gärrestansäuerung:

Es sind Temperaturen der Trocknungskammer, Temperaturen der Mischluft und ggf. der Betrieb der Mischschnecke zu ermitteln. Weiterhin sind die BHKWs zu benennen, deren Abgas für die Trocknung eingesetzt wird.

- 5.7 Es sind mindestens 3 Einzelmessungen durchzuführen. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind jeweils als Halbstundenmittelwert zu ermitteln. Die Emissionsbegrenzungen gelten als eingehalten, wenn das Ergebnis jeder Einzelmessung zuzüglich der Messunsicherheit die festgelegten Massenkonzentrationen bzw. Massenströme nicht überschreitet.
- 5.8 Der Messbericht soll dem Anhang A der Richtlinie VDI 4220 Blatt 2 (Ausgabe November 2018) entsprechen.
- 5.9 Die Messberichte sind der Genehmigungsbehörde innerhalb von 12 Wochen nach Abschluss der Messungen vorzulegen.

## 6 Betriebstagebuch

- 6.1 Zum Nachweis des ordnungsgemäßen Betriebes ist ein Betriebstagebuch zu führen, das alle wesentlichen Informationen enthalten muss, insbesondere über
- Trocknerleistung
  - Durchsatz der Gärreste als Monats- und Jahressummenwert
  - Durchsatz an Schwefelsäure als Monats- und Jahressummenwert
  - Output-Mengen (getrocknete Gärreste, ggf. ASL und Kondensat)
  - Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sowie Funktionskontrollen
  - Besondere Vorkommnisse, Betriebsstörungen (insbesondere bei der Schwefelsäuredosierung) einschließlich deren Ursachen und der durchgeführten Abhilfemaßnahmen
  - die kontinuierliche Aufzeichnung der Schwefelsäuredosierung sowie ggf. des pH-Werts und des Leitwerts der Waschflüssigkeit

Je nach Trocknungsverfahren sind weitere Anlagenparameter im Betriebstagebuch zu erfassen, z. B. Temperaturen der Trocknungskammer, Temperaturen der Mischluft, Betrieb der Mischschnecke, Stellung der Abgasklappe, Benennung der BHKWs, deren Abgas für die Trocknung eingesetzt wird, etc.

Optional sind bei Vorhandensein auch Gärrestanalysen und Ergebnisse eigener NH<sub>3</sub>-Prüf Röhrchenmessungen zu dokumentieren.

- 6.2 Das Betriebstagebuch ist vor Ort aufzubewahren und den Vertretern der Genehmigungsbehörde auf Verlangen vorzulegen. Es sollte durch einen USB-Stick oder eine SD-Karte jederzeit auslesbar sein. Es ist arbeitstäglich fortzuschreiben und kann mittels elektronischer Datenverarbeitung geführt werden. Es ist dokumentsicher so anzulegen, dass zumindest eine nachträgliche Manipulation nicht möglich und es vor unbefugtem Zugriff geschützt ist. Das Betriebstagebuch muss jederzeit einsehbar sein und in Klarschrift vorgelegt werden können. Es ist mindestens fünf Jahre, gerechnet ab dem Datum der letzten Eintragung, aufzubewahren.

### **Ergänzung für BHKW-Abgastrockner (direkt beheizte Trockner):**

4.3 Beim Ausfall der Trocknung müssen die BHKW-Abgase über einen separaten Kamin TA Luft-konform abgeleitet werden. Eine entsprechende automatische Steuerung ist vorzusehen.

Zu Nr. 2:

Von der ermittelten Gesamtkohlenstoffkonzentration im Trocknerabgas kann die Konzentration an organischen Stoffen, die im betreffenden BHKW-Abgas ermittelt wurde, abgezogen werden. Abgasmessungen im Abgas des BHKWs und im Abgas der Gärresttrocknung sind möglichst in engem zeitlichen Zusammenhang durchzuführen.

Zu Nr. 5:

Die Emissionsmessungen bei immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Motoranlagen müssen separat an einer geeigneten Stelle im unverdünnten Motorabgas vor der Trocknung durchgeführt werden. Es gelten die Emissionsgrenzwerte der 44. BImSchV.

Hinweis:

Im Rahmen der Trocknermessung kann eine Messung des BHKW-Abgases auch entfallen. Dann kann aber auch keine Gutrechnung der Konzentration an organischen Stoffen aus dem BHKW (im Wesentlichen über die BHKW-Abgase eingetragenes Methan) erfolgen. Im Abgas des Trockners ist ein Gesamt-C-Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> einzuhalten. Im Abgas des BHKWs müssen die Grenzwerte der 44. BImSchV eingehalten sein.

### **Ergänzung für Vakuumverdampfer:**

Vakuumverdampfer arbeiten üblicherweise nahezu emissionsfrei. Durch den Betrieb der Vakuumpumpe entstehen nur geringe Abgasströme. I. d. R. sind Vakuumverdampfer druckseitig an den Gasraum der Biogasanlage angeschlossen und die Abgasströme werden der Biogasanlage zugeführt. Dadurch kommt es praktisch kaum zu Emissionen auf dem Luftpfad.

In diesem Fall (und nur dann!) müssen keine Emissionsgrenzwerte nach Nr. 2 und keine Ableitbedingungen nach Nr. 4 eingehalten werden. Auch Emissionsmessungen nach Nr. 5 sind dann nicht erforderlich.

Die Anforderungen aus Nr. 3 sind für Vakuumverdampfer sinngemäß anzuwenden. Auch hier muss die kontinuierlich effektive Ammoniakabscheidung sichergestellt sein.

### **Zusätzlich sind an Vakuumverdampfer folgende Anforderungen zu stellen:**

- V.1: Der beim Verdampfungsprozess entstehende Brüden ist den Brüdenwäschern zuzuführen.
- V.2: Bei der Errichtung und dem Betrieb der Verdunstungskühlanlage sind die Anforderungen der Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider (42. BImSchV) in der jeweils gültigen Fassung zu beachten.
- V.3: Die Verdunstung soll nur in einem zum stabilen Betrieb notwendigen Maß erfolgen, d. h., soweit dies zur Kondensation, Kühlung von Pumpen etc. notwendig ist. Für das übrige anfallende Kondensat sind in Absprache mit den Wasserbehörden und ggf. dem zuständigen Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten nachhaltige Verwendungsmöglichkeiten zu nutzen (z. B. Löschwasserteich, Aufbereitung, Versickerung, Nutzung in der Landwirtschaft etc.).

- V.4: Bei der Errichtung von Kaltvernebelungsanlagen im Umfeld von Wohnbebauungen, Gewerbegebieten oder Straßen ist sicherzustellen, dass in der Nachbarschaft keine erheblichen Belästigungen durch Nebelbildung auftreten.  
Hinweis: Es wird empfohlen, dies ggf. durch ein Gutachten belegen zu lassen.



Eine Behörde im Geschäftsbereich  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz

