

Gärrestverwertung in einer Warmluft-trocknungsanlage mit integrierter Stickstoffrückgewinnung

Sebastian Awiszus, Klaus Meissner, Sebastian Reyer, Joachim Müller

NH₃-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion und aus Gärrestständen stellen einen erheblichen Teil der Gesamtstickstoffemissionen dar; durch eine Anpassung der Prozesstechnik können sie deutlich reduziert werden. In einem Zweibandrockner mit Abluftwäscher, der zur Untersuchung der Trocknungsparameter von entwässertem Gärrest betrieben wurde, konnte eine Rückgewinnung von über 90% des frei werdenden NH₃ nachgewiesen werden. Der spezifische thermische Energieverbrauch der Trocknungsanlage lag zwischen 0,89 und 1,04 kWh kg⁻¹, abhängig vom Durchsatz und der Temperatur des Gärreststands. Die Trocknung führte zu etwa 50% Verlust an Gesamt-N im Substrat, was etwa 80% des NH₄-N-Gehalts entspricht. In der gereinigten Trocknerabluft wurden NH₃-Konzentrationen von 10,8 mg m⁻³ gemessen. Dies entspricht einer Abgabe an die Umgebung von 25,5 g h⁻¹. Die NH₃-Freisetzung aus dem Gärrest war dabei lediglich von der Gärrestmenge abhängig und wurde von der Trocknungstemperatur nicht beeinflusst.

Schlüsselwörter

Gärresttrocknung, Stickstoffrückgewinnung, Ammoniakemissionen, Nährstoffrecycling

In einer konventionellen Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 500 kW fallen Gärreste mit einem Stickstoffgehalt von etwa 100 Tonnen pro Jahr an. Bei einer Düngung von 227 kg Stickstoff (N) pro Hektar kann die Ausbringung dieser Gärrestmenge eine Anbaufläche von etwa 440 Hektar mit Nährstoffen versorgen (FUCHS und DROSG 2010). Aus Regionen mit Nährstoffüberschuss müssen Gärreste entweder über weite Distanzen, oft unter unwirtschaftlichen Bedingungen, in andere Regionen transportiert oder vor Ort aufbereitet werden (DÖHLER und SCHLIEBNER 2006). Die direkte Applikation der flüssigen und festen Gärreste ohne Vorbehandlung führt zu N-Verlusten in Form von Ammoniakemissionen (NH₃), Nitratauswaschung (NO₃) und klimarelevanten Lachgasemissionen (N₂O) (MÖLLER 2009, MÖLLER et al. 2011, MÖLLER et al. 2008). Momentan erreicht die übliche Praxis der Gärrestausrückführung unter Berücksichtigung der Nährstoffgrenzwerte aus der Novellierung der Düngemittelverordnung 2017 kein optimales Nährstoffverhältnis für den Nutzpflanzenanbau (MÖLLER et al. 2008). Mögliche Folgen können die Überdüngung mit Phosphor (P) oder eine Unterversorgung mit N sein.

Als Alternative zur direkten Applikation können die Nährstoffe nach der Trennung von Fest- und Flüssigphase und anschließender Trocknung des entwässerten Gärrests extrahiert werden. Die Separation erfolgt üblicherweise mechanisch durch Zentrifugen, Kammerfilter- und Schneckenpressen sowie über Sedimentationsvorrichtungen. Der Trennungserfolg ist dabei hauptsächlich von der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe abhängig (MÖLLER et al. 2002). Die Feststoffe werden in der Regel kompostiert oder getrocknet. Für die Trocknung kommen derzeit Verfahren auf Basis der Heiß- oder

Kaltlufttrocknung zum Einsatz, wie Bandtrockner, Trommeltrockner, Schubwendentrockner und Wirbelschichttrockner. Nachteilig dabei sind vor allem der hohe Energieverbrauch und die lange Prozessdauer, was einen wirtschaftlichen Einsatz der genannten Verfahren erschwert. Trotz der Marktreife und der entsprechenden Verfügbarkeit der Technik wird diese bisher nur selten eingesetzt. In einer Studie von WITT et al. (2010) waren im Jahr 2009 lediglich 6 von 441 Biogasanlagen mit einer Gärresttrocknung ausgestattet, laut einer Befragung von Biogasbetreibern durch das DBFZ im Jahr 2016 waren lediglich auf 17% der Biogasanlagen mit Gärrestbehandlung auch Trocknungsanlagen installiert (DANIEL-GROMKE et al. 2017).

Die Trocknung der frisch separierten festen Gärrestphase führt zur Abgabe von NH_3 in die Trocknerabluft, was mittels FTIR-Spektrometrie messbar ist (AWISZUS et al. 2018, MAURER und MÜLLER 2012). Daher werden Genehmigungen für die Gärresttrocknung häufig nur noch dann erteilt, wenn der Eintrag von NH_3 in die Umwelt erheblich reduziert wird. Um dieses Ziel zu erreichen, kann die Abluft durch säurebetriebene Berieselungswäscher geleitet werden, gleichzeitig kann dabei Stickstoff in Form von beispielsweise Ammoniumsulfat zurückgewonnen werden. Zur Trocknung von Gärresten, besonders in Bandtrocknern, und hinsichtlich der Effizienz der verfügbaren Wäschersysteme gibt es jedoch bisher kaum wissenschaftlich publizierte Untersuchungen.

In der vorliegenden Studie wird die Trocknung von mechanisch entwässertem Gärrest in einem Zweibandtrockner hinsichtlich der Luftströmung und des Energiebedarfs beschrieben und es wird die Auswirkung der Trocknung auf die Freisetzung von NH_3 und den N-Gehalt im getrockneten Gärrest untersucht. Zusätzlich wird das Potenzial zur Reduktion der NH_3 -Emissionen durch einen säurebetriebenen Stickstoffwäscher ermittelt.

Material und Methoden

Material

Für die Trocknungsversuche wurde mechanisch entwässertem Gärrest von der Versuchsstation Unterer Lindenhof der Universität Hohenheim verwendet; eine Übersicht über die Eigenschaften zeigt Tabelle 1. Die Biogasanlage verfügt über eine Leistung von 200 kW_{el.}. Zum Zeitpunkt der Trocknungsversuche wurde die Anlage mit einer Substratmischung aus 19% Maissilage, 21% Grassilage, 7% Getreide und 53% Gülle aus verschiedenen Tierhaltungen gefüttert. Eine detaillierte Beschreibung der Biogasanlage und des Betriebsschemas ist bei AWISZUS et al. (2018), LEMMER et al. (2013), LINDNER et al. (2015) und NAEGELE et al. (2013) zu finden.

Tabelle 1: Trockenmasse (TM), Gesamtstickstoff (Gesamt-N) und Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) von entwässertem und getrocknetem Gärrest

Variante	TM in %	Gesamt-N in mg g ⁻¹ TM	$\text{NH}_4\text{-N}$ in mg g ⁻¹ TM
Entwässertem Gärrest	24,4	26,2 ± 0,53 ^a	14,0 ± 0,18 ^a
Getrocknet 45 °C	90,0	13,9 ± 0,92 ^b	2,7 ± 0,04 ^b
Getrocknet 70 °C	91,3	13,9 ± 0,62 ^b	2,4 ± 0,01 ^c
Getrocknet 80 °C	93,4	13,5 ± 0,14 ^b	1,8 ± 0,02 ^d

Unterschiedliche Indizes in einer Spalte (a, b, c, d) stehen für signifikant unterschiedliche Werte ($\alpha = 0,05$).

Zweibandtrocknungsanlage mit Ammoniakrückgewinnung

Zur Trocknung des entwässerten Gärrestes wurde der Prototyp einer Zweibandtrocknungsanlage (Huber SE, Berching, Deutschland) verwendet, die ursprünglich für die Trocknung von Klärschlamm konzipiert worden war (Abbildung 1). Die Versuchsanlage entspricht der in der Studie von Awiszus et al. (2018) verwendeten Technik mit einem temperaturabhängigen Durchsatz von bis zu 45 kg Gärrest pro Stunde bei einem Ausgangsfeuchtegehalt von 75%. Die Wärmekapazität des Trockners betrug 150 kW und wurde vom Nahwärmenetz des unmittelbar benachbarten Biogasheizkraftwerks versorgt. Da das Wärmenetz zusätzlich die Einrichtungen des Versuchsbetriebs versorgt, standen für die Trocknung etwa 34 kW an thermischer Energie zur Verfügung. Für die Trocknungsversuche, die mehr Energie benötigten (Trocknungstemperaturen über 70° C), wurde daher eine mobile Zusatzheizung mit einer Leistung von 150 kW_{th} verwendet.

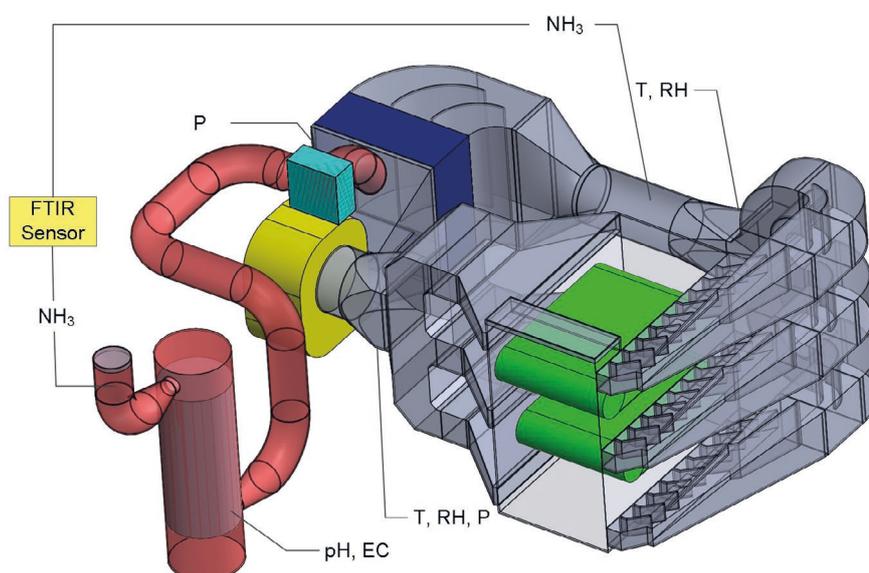


Abbildung 1: Zweibandtrockner mit Luftkanälen (grau), Trocknungsbändern (grün), Wärmetauscher (blau), Umluftventilator (gelb), Abluftventilator (hellblau) und Stickstoffwäscher (rot); Anordnung der Messpunkte für NH₃, Temperatur T, Druck P, relative Luftfeuchte RH, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit EC

Die gesamte Trocknungsfläche der beiden Bänder beträgt 1,85 m². Jedes Band ist 1.150 mm breit und 2.810 mm lang. Die Bänder (Typ 5099, GKD – Gebr. Kufferath AG, Düren, Deutschland) bestehen aus 2,2 mm starkem Polyphenylsulfid (PPS) mit einer Maschenweite von 510 µm und einer Luftdurchlässigkeit von 4.500 L m⁻² s⁻¹ (DIN EN 9237, dp = 200 Pa). Die Geschwindigkeit jedes Bandes kann separat in einem Bereich zwischen 0,56 und 2,81 mm s⁻¹ eingestellt werden.

Nach Zuführung des Substrates über eine Vertikalschnecke (Himmel Maschinen GmbH & Co. KG, Melchingen, Deutschland) wird mit einer Bifilarschnecke eine Schütthöhe von 80 mm eingestellt und das Material gleichmäßig auf dem oberen Band verteilt. Vom oberen Trocknungsband fällt der Gärrest 850 mm tief auf das untere Band. Nach der Trocknung wird das getrocknete Produkt mit einer horizontal ausgerichteten Förderschnecke ausgetragen. Der Hauptluftstrom im Trockner wird von einem Radialventilator (P2MM1B4M-RRV/LG 270, Nicotra Gebhardt GmbH, Waldenburg, Deutschland)

mit einer Leistung von 7,5 kW erzeugt, sodass eine Luftmenge von $18.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei 970 Pa Druck umgesetzt wird. Die zirkulierende Trocknungsluft wird durch einen Rippenwärmetauscher (Wasser/Luft) erwärmt und in einen oberen und unteren Luftstrom aufgeteilt, der die entsprechenden Trocknungsbänder von oben kommend vertikal durchströmt. Der anschließend zusammengeführte Luftstrom wird zum Wärmetauscher zurückgeführt. Die Auskoppelung der Abluft (11 % des Gesamtluftstroms) erfolgt durch einen zweiten Radialventilator (P2MF3W2C-RRB/RD90, Nicotra Gebhardt GmbH, Waldenburg, Deutschland) mit einer Leistung von 0,75 kW und einem Luftdurchsatz von $2.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei 796 Pa Druck. Eine äquivalente Menge an Frischluft wird über die Aufgabeöffnung für das Trocknungsmaterial in den Trockner gesaugt. Für eine Beurteilung des Trocknungsvorgangs wurde die Luftströmung innerhalb des Trockners mittels der Software SolidWorks (SolidWorks Corp., Waltham, USA) auf Basis der Lüfterkennlinien der eingesetzten Ventilatoren, der durchströmten Trocknungsbänder sowie der strömungsrelevanten Bauteile wie Luftleitbleche, Wärmetauscher und Abluftwäscher inklusive Füllkörper modelliert und analysiert.

Messung der Luftzusammensetzung

Temperatur und relative Feuchtigkeit (RH) wurden am Einlass und Auslass der Trocknungszone mit PT100-Sensoren (Genauigkeit $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$) und Feuchtigkeitssensoren (HMT 330, Vaisala, Helsinki, Finnland) mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5 \%$ RH gemessen. Der Druck wurde vor und nach dem Umluftgebläse mit $\pm 0,2 \%$ Genauigkeit gemessen (VEGABAR 52, VEGA, Schiltach, Deutschland) (Abbildung 1).

Ferner wurde der volumetrische Luftstrom unter Verwendung eines Hitzdrahtanemometers (Testo 435-4, Testo SE & Co. KG, Lenzkirch, Deutschland), ausgestattet mit einer Sonde $\varnothing = 7,5 \text{ mm}$, mit einer Genauigkeit $\pm 0,03 \text{ m s}^{-1} + 5 \%$ des angezeigten Wertes bestimmt. Die gemessenen Luftströme im Trockner und in der Abluft wurden für die Berechnung der Energieeffizienz und des Massenstroms von Emissionen verwendet.

Die Konzentration von NH_3 wurde mittels Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) (GASMET DX4000, Ansyco, Karlsruhe, Deutschland) in der Umluft und in der Abluft des Ammoniakwäschers gemessen. Die Luft wurde durch Schläuche aus dem Trockner zum FTIR-Sensor gesaugt. Die Gaskonzentrationen wurden in mg m^{-3} gemessen und mit der Software CALCMET™ auf Standardbedingungen (TN = 273,15 K; PN = 1013,25 hPa) korrigiert, basierend auf der tatsächlichen Temperatur und dem tatsächlichen Druck im FTIR-Detektor. Zur übersichtlicheren Darstellung der Ergebnisse wurden die Messwerte der einzelnen Versuchsreihen gemittelt. Hierdurch wurde auch die Inhomogenität des Ausgangsmaterials teilweise kompensiert.

Vorgehensweise

Um den anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt des Gärrests konstant zu halten, wurde frisch separierter Gärrest mit abgelagertem Material im Beschickungstrichter gemischt. Dies war notwendig, da die Materialfeuchte durch die Substratzusammensetzung und unterschiedlichen Wetterbedingungen deutlich schwankte.

Die Trocknungsversuche wurden bei Trocknungslufttemperaturen von 45, 70 und 80 °C (gemessen am Eingang des Trocknungsbereichs) mit jeweils drei Wiederholungen durchgeführt. Die erforderliche Trocknungszeit wurde in Vorversuchen ermittelt, um eine Endfeuchte von weniger als 10 % zu gewährleisten, was für eine nachgelagerte Weiterverarbeitung des Gärrests, z. B. zu Pellets

notwendig ist. Hierfür wurde die Trockenmasse (TM) entsprechend der Norm DIN ISO EN 18134-1 bei 105 °C für 24 h im Trockenschrank (DIN 2015) sowohl für das Ausgangsmaterial als auch für die getrockneten Varianten bestimmt. Bei 45 °C ergab eine Trocknungszeit von 50 min auf dem oberen Band und weiteren 35 min. auf dem unteren Band die gewünschte Endfeuchte von weniger als 10%. Für 70 und 80 °C genügten 25 min auf dem oberen Trocknungsband und 20 min auf dem unteren Trocknungsband. Aus den gewählten Bandgeschwindigkeiten ergeben sich Gärrestdurchsätze von $0,18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ für die Trocknung bei 45 °C bzw. von $0,36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ für die Trocknung bei 70 und 80 °C.

Zur Bestimmung des Einflusses der Trocknung auf den Stickstoffgehalt des Gärrestes und zur Beurteilung der erwarteten Emissionen nach der Lagerung der getrockneten Produkte wurde einerseits der Gehalt an Gesamtstickstoff nach Kjeldahl (DIN 2012) und der Gehalt an Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) mittels photometrischer Messung (DIN 1983) bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion

Luftströmung

Die Geschwindigkeit der Trocknungsluft ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Trocknungsbetrieb bildet sich eine gleichmäßige Luftströmung aus. Die höchsten Luftgeschwindigkeiten werden dabei in den Bereichen mit geringerem Rohrquerschnitt bzw. im Bereich der Ventilatoren (B) erreicht. Im Bereich der Trocknungsbänder (A) fällt auf, dass die Trocknung vor allem auf dem unteren Band stattfindet. Dies lässt sich dadurch erklären, dass im Bereich des unteren Bandes im Vergleich zum oberen Trocknungsband insgesamt mehr Trocknungsluft eingeblasen wird. Die Luftmenge in Richtung Abluftwäscher (D) ist im Vergleich zur Luftmenge im Trockner gering, auf diese Weise kann ein sicherer Betrieb des Abluftwäschers mit hohen NH_3 -Abscheidegraden gewährleistet werden.

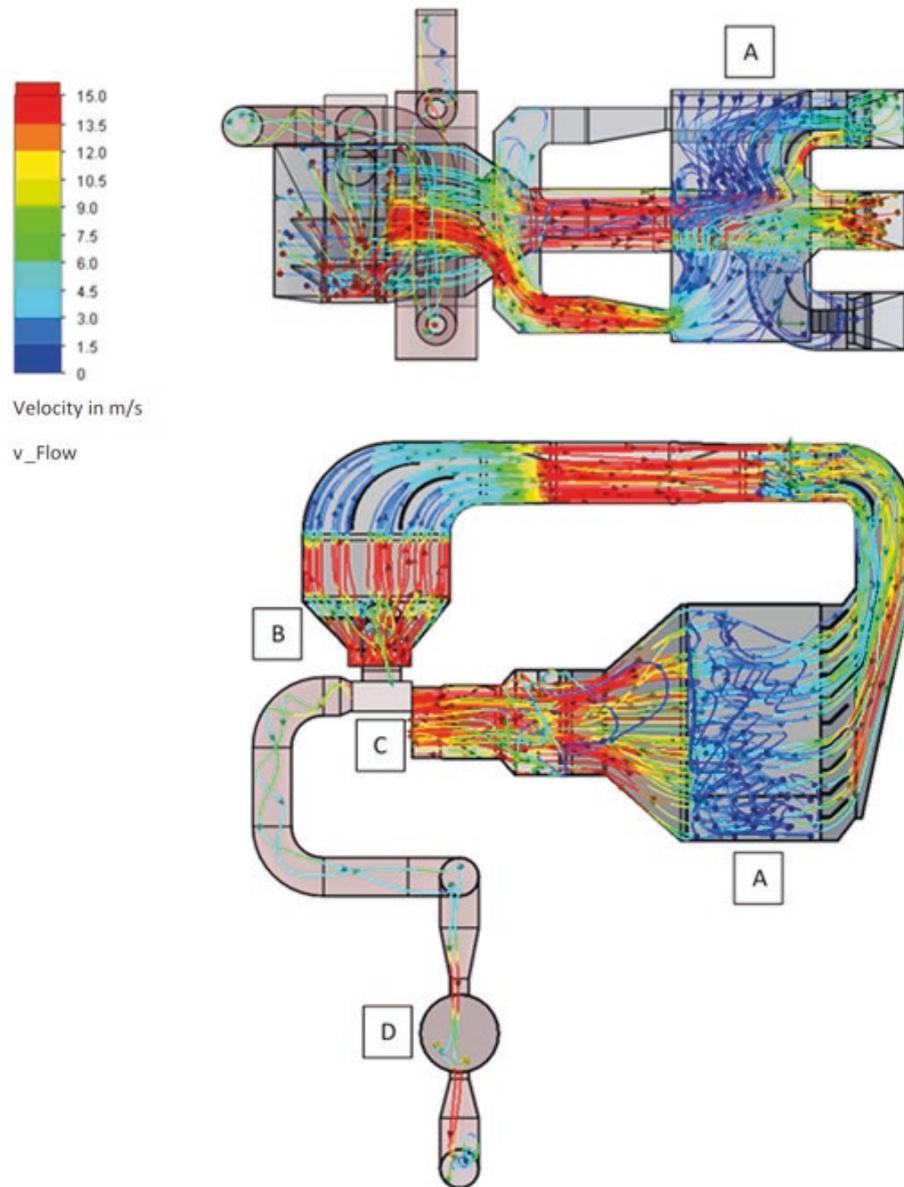


Abbildung 2: Front- und Draufsicht der Luftströmung im Trockner mit den Bereichen Trocknungsbänder (A), Umluftventilator (B), Abluftventilator (C) und Abluftwäscher (D)

Energieverbrauch

Der Trockner hatte einen elektrischen Energiebedarf von 9,7 kW. Tabelle 2 zeigt die relevanten Parameter für die Trocknung von Gärresten im verwendeten Trockner. Der spezifische thermische Energiebedarf wurde als Wärmeenergiebedarf pro kg verdampftes Wasser berechnet.

Tabelle 2: Thermischer Energieeinsatz und spezifischer Wärmebedarf des Zweibandrockners bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen.

Trocknungs- temperatur	Thermische Leistung in kW	Spezifischer thermischer Energiebedarf in kWh kg ⁻¹ verdunstetem Wasser ¹⁾
45 °C	34	0,89
70 °C	85	0,93
80 °C	98	1,04

¹⁾ Basierend auf: Schüttdichte Gärrest 350 kg m⁻³; TM Gehalt 25%; η Wärmetauscher = 80%.

Der spezifische thermische Energieverbrauch lag zwischen 0,89 und 1,04 kWh kg⁻¹, abhängig vom Durchsatz und der Temperatur des Gärückstands. Diese Werte liegen in einem ähnlichen Bereich wie in vergleichbaren Studien. In der Studie zur Gärgutrocknung in Bandrocknern von DÖHLER et al. (2010), lag der spezifische thermische Energiebedarf beispielsweise zwischen 0,85 und 1,15 kWh kg⁻¹. Die Ergebnisse zeigen außerdem zunehmende Wärmeverluste bei höheren Temperaturen, wenn Substrat bei 70 und 80 °C getrocknet wird. Hauptgründe sind Verluste durch unzureichende Dämmung und über die Abluft, welche in Zukunft durch eine verbesserte Dämmung und Wärmerückgewinnung noch optimiert werden könnten.

Einfluss der Gärresttrocknung auf die Nährstoffzusammensetzung

Die Trockenmasse (TM) des entwässerten Gärrests betrug 24,4% und wurde durch Trocknen auf die Ziel-TM von mindestens 90% erhöht. Der Gesamt-N-Gehalt nahm von anfänglich 26,2 mg g⁻¹ TM auf Werte zwischen 13,5 und 13,9 mg g⁻¹ TM nach dem Trocknen ab. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf Stickstoffverluste aus der NH₄-Fraktion zurückzuführen. Der Gehalt sank von anfänglich 14,0 mg g⁻¹ TM im Ausgangsmaterial auf Werte zwischen 1,8 und 2,7 mg g⁻¹ TM. Hier führten die höheren Trocknungstemperaturen zu signifikant höheren Verlusten. Das Trocknen führte zu etwa 50% Verlust an Gesamt-N, was etwa 80% des NH₄-N-Gehalts entspricht. Dies bestätigt die Ergebnisse von MÖLLER und MÜLLER (2012), die ebenfalls feststellten, dass die Trocknung von Gärrest N-Verluste hauptsächlich aus der NH₄-N-Fraktion verursacht.

Ammoniakemissionen und Ammoniakwäscher

Der Trockner verfügte über einen Luftwäscher, welcher in der Lage ist, mittels H_2SO_4 NH_3 in Form von $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ aus der Trocknerabluft zurückzugewinnen und somit den Eintrag von NH_3 in die Umwelt zu minimieren. Die gemessenen NH_3 -Konzentrationen im Trockner und in der gereinigten Abluft sind in Abbildung 3 exemplarisch für einen Messzyklus von 10 min dargestellt.

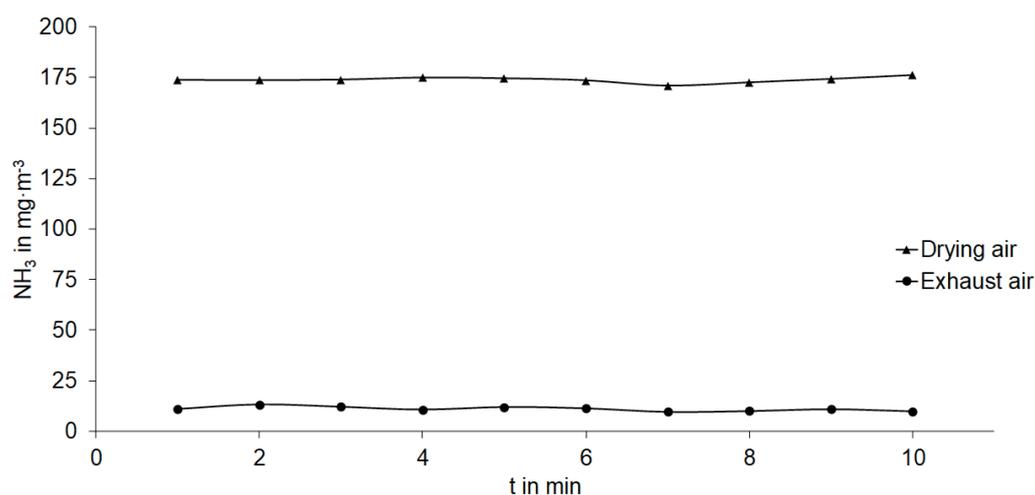


Abbildung 3: NH_3 -Konzentration in der Trocknungsluft und in der Abluft des Ammoniakwäschers bei einer Trocknungstemperatur von 80 °C

In der gereinigten Trocknerabluft wurden NH_3 -Konzentrationen von 10,8 mg m^{-3} gemessen. Dies entspricht rechnerisch einem Massenfluss in die Umwelt von 25,5 g h^{-1} NH_3 nach der Abluftwäsche. Im Vergleich zur durchschnittlichen NH_3 -Konzentration innerhalb des Trockners von 173,9 mg m^{-3} bzw. einem rechnerisch ermittelten Massenfluss von 400,7 g h^{-1} vor der Auskopplung der Abluft wurde eine NH_3 -Reduktion von 93 % beobachtet. Eine temperaturabhängige NH_3 -Freisetzung aus dem Gärrest konnte dabei mittels FTIR nicht eindeutig nachgewiesen werden, wenngleich die Ergebnisse aus Tabelle 2 dies erwarten lassen würden. Die chemische Zusammensetzung und die untersuchten Eigenschaften der Wäscherbrühe (Eluat) zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Chemische Eigenschaften des Eluats

Parameter	Eluat
pH	2,8
Elektrische Leitfähigkeit (EC) in mS cm^{-1}	117,6
Gesamt-N in g L^{-1}	21,6
$\text{NH}_4\text{-N}$ in g L^{-1}	21,4
SO_4 in g L^{-1}	45,1

Im Eluat liegt N nahezu ausschließlich in Form von direkt pflanzenverfügbarem $\text{NH}_4\text{-N}$ vor. Der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ betrug 21,4 g L^{-1} , der Gehalt an SO_4 betrug 45,1 g L^{-1} . Dies entspricht in etwa einer Ammoniumsulfatlösung mit 2 % N-Anteil. Durch den niedrige pH-Wert von 2,8 ist die Lösung für eine

Anwendung als Blattdünger wegen der Gefahr von Ätزشäden ungeeignet. Insgesamt verfügt diese Technik jedoch über das Potenzial den Boden-Stickstoff-Kreislauf teilweise zu schließen. Als Vorteil kann auch die Entkoppelung der Nährstofffraktionen im Gärrest gewertet werden. Der ursprünglich aus dem Gärrest stammende Stickstoff liegt nach der Abluftwäsche in Form einer Ammoniumsulfatlösung vor. Dies ermöglicht eine bedarfsgerechte, d.h. vom P-K-Gehalt entkoppelte N-Düngung. Somit kann das Problem des suboptimalen Nährstoffverhältnisses in Gärresten, wie von MÖLLER et al. (2011) beschrieben, vermieden werden.

Schlussfolgerungen

Die Trocknung von mechanisch entwässertem Gärrest in Zweibandtrocknern führt zu Stickstoffverlusten im Substrat in Form von NH_3 . Eine temperaturabhängige NH_3 -Freisetzung aus dem Gärrest konnte bei kontinuierlicher Trocknung nicht eindeutig nachgewiesen werden. Das bei der Trocknung ausgetriebene NH_3 kann über einen Luftwäscher, bei dem H_2SO_4 zugegeben wird, als $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ zurückgewonnen werden. Hierdurch kann der Eintrag von NH_3 in die Umwelt um 93 % reduziert werden. Der steigende spezifische Wärmebedarf für die Trocknung von Gärresten bei höheren Temperaturen erfordert eine Wärmedämmung der direkt mit der Trocknung zusammenhängenden Komponenten, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Über die Trocknungstemperatur kann der Gärrestdurchsatz deutlich erhöht und damit flexibel an die anfallende Gärrestmenge angepasst werden. Da die Zusammensetzung der Gärreste und damit auch das NH_3 -Emissionspotenzial von den jeweiligen Inputsubstraten abhängt, lassen sich die Ergebnisse aus dieser Studie nur eingeschränkt auf Substrate aus anderen Biogasanlagen übertragen. Weiterführende Untersuchungen sollten daher die Anwendbarkeit der verwendeten Technik auf Gärrückstände unterschiedlicher Herkunft klären. Das Eluat aus dem Abluftwäscher ist durch den niedrigen pH-Wert und den geringen Nährstoffgehalt derzeit nur bedingt als Flüssigdünger geeignet, könnte jedoch durch weitere Prozessschritte für diesen Zweck optimiert werden. Werden Flächen ausschließlich mit dem Eluat gedüngt, ist eine Überversorgung der Böden mit Schwefel denkbar. Daher sollte bei einer Anwendung der Lösung als Flüssigdünger ein Augenmerk auf den Schwefelbedarf der Zielkulturen gelegt werden.

Literatur

- Awiszus, S.; Meissner, K.; Reyer, S.; Müller, J. (2018): Ammonia and methane emissions during drying of dewatered biogas digestate in a two-belt conveyor dryer. *Bioresource Technology* 247, pp. 419–425
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Völler, K.; Beil, M.; Beyrich, W. (2017): Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. DBFZ Report Nr. 30. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Report/DBFZ_Report_30.pdf, Zugriff am 19.07.2018
- DIN (1983): German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; cations (group E); determination of ammonia-nitrogen (E 5), Vol. DIN 38406-5:1983-10
- DIN (2012): Sludge, treated biowaste and soil - Determination of Kjeldahl nitrogen, Vol. EN 16169:2012, German Institute for Standardization
- DIN (2015): Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method Vol. ISO 18134-1:2015, German Institute for Standardization
- Döhler, H.; Schliebner, P. (2006): Verfahren und Wirtschaftlichkeit der Gärrestaufbereitung. In: Verwertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern in der Landwirtschaft - Nutzen und Risiko, KTBL, 19.–20.04.2006, Osnabrück, KTBL, S. 199–212

- Döhler, H.; Wulf, S.; Grebe, S.; Roth, U.; Klages, S.; Amon, T. (2010): Qualität und Verwertung des Gärrestes. In: Leitfaden Biogas, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, S. 211–232
- Fuchs, W.; Drosch, B. (2010): Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Wien, Eigenverlag Universität für Bodenkultur
- Lemmer, A.; Naegele, H.-J.; Sondermann, J. (2013): How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters. *Energies* 6(12), pp. 6255–6273
- Lindner, J.; Zielonka, S.; Oechsner, H.; Lemmer, A. (2015): Effects of mechanical treatment of digestate after anaerobic digestion on the degree of degradation. *Bioresource Technology* 178, pp. 194–200
- Maurer, C.; Müller, J. (2012): Ammonia (NH₃) emissions during drying of untreated and dewatered biogas digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer. *Engineering in Life Sciences* 12(3), pp. 321–326
- Moller, H.B.; Sommer, S.G.; Ahring, B.K. (2002): Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology* 85(2), pp. 189–196
- Möller, K. (2009): Influence of different manuring systems with and without biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84(2), pp. 179–202
- Möller, K.; Müller, T. (2012): Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12(3), pp. 242–257
- Möller, K.; Schulz, R.; Müller, T. (2011): Effects of setup of centralized biogas plants on crop acreage and balances of nutrients and soil humus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89(2), pp. 303–312
- Möller, K.; Stinner, W.; Deuker, A.; Leithold, G. (2008): Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on nitrogen cycle and crop yield in mixed organic dairy farming systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 82(3) pp. 209–232
- Naegele, H.J.; Lindner, J.; Merkle, W.; Lemmer, A.; Jungbluth, T.; Bogenrieder, C. (2013): Effects of temperature, pH and O₂ on the removal of hydrogen sulfide from biogas by external biological desulfurization in a full scale fixed-bed trickling bioreactor (FBTB). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 6(1), pp. 69–81
- Witt, J.; Rensberg, N.; Henning, C.; Naumann, K.; Schwenker, A.; Scheftelowitz, M.; Krautz, A.; Schaubach, K.; Thrän, D.; Scholwin, F.; Kutne, T.; Hilse, A.; Vetter, A.; Graf, T.; Reinhold, G.; . (2010): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/09_Monitoring_ZB_Maerz_2010.pdf, Zugriff am. 22.05.2018

Autoren

Sebastian Awiszus, M.Sc., Dr. Klaus Meissner und **Sebastian Reyer, M.Sc.**, sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Agrartechnik in den Tropen und Subtropen (Leiter: **Prof. Dr. Joachim Müller**), Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, E-Mail: info440e@uni-hohenheim.de.

Danksagung

Das GOBi Projekt wurde über einen Zeitraum von drei Jahren vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), vertreten durch den Projektträger Jülich, unter dem Förderkennzeichen 03EK3525A gefördert. Die Autoren möchten sich beim technischen Personal der Forschungsstation der Universität Hohenheim „Unterer Lindenhof“ für die Unterstützung während der Versuchsdurchführung bedanken.