

Claudia Christine Maurer

**Drying of biogas digestate in a
hybrid waste-heat/solar dryer and
the effect on nitrogen emissions
and fertilizer quality**

***Drying of biogas digestate in a
hybrid waste-heat/solar dryer and the effect
on nitrogen emissions and fertilizer quality***

**Dissertation to obtain the doctoral degree of Agricultural Sciences
(Dr. sc. agr.)**

Faculty of Agricultural Sciences

University of Hohenheim

Institute of Agricultural Engineering 440e
Tropics and Subtropics Group

submitted by
Claudia Christine Maurer

Born in Geislingen an der Steige

2019

This thesis was accepted as a doctoral dissertation in fulfillment of the requirements for the degree “Doktor der Agrarwissenschaften” by the Faculty Agricultural Sciences at University of Hohenheim on 02.10.2019.

Date of oral examination: 11.12.2019

Examination Committee

Supervisor and Reviewer

Co-Reviewer

Additional examiner

Deputy of the Dean

Prof. Dr. Joachim Müller

Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert

PD Dr. Andreas Lemmer

Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

This research was funded by the Ministry for the Rural Areas and Consumer Protection of Baden-Württemberg (Germany) with funds of the Baden-Württemberg Stiftung GmbH within the framework of the bioenergy research platform.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Agrartechnik in den Tropen und
Subtropen der Universität Hohenheim
herausgegeben von Prof. Dr. Joachim Müller

Band 19/2020

Claudia Christine Maurer

**Drying of biogas digestate in a hybrid
waste-heat/solar dryer and the effect on nitrogen
emissions and fertilizer quality**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7620-2

ISSN 1867-4631

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Für Lea, meine Mutter, meinen Vater.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Joachim Müller danke ich für die Möglichkeit meine Dissertation im Fachbereich Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim zu schreiben und die Betreuung meiner Arbeit. Für seine uneingeschränkte Unterstützung, sein Vertrauen, seine wissenschaftliche Anleitung und die wertvollen Gespräche möchte ich mich herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert vom Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart danke für die Übernahme des Zweitgutachtens, die engagierte Durchsicht und das Interesse an der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger vom Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Andreas Lemmer, der mich durch fachliche Gespräche und Anmerkungen motiviert und unterstützt hat sowie für die Mitwirkung bei der mündlichen Prüfung.

Für die Möglichkeit die Messungen an einer Praxisanlage durchzuführen, die Nutzung der Infrastruktur und Versuchsaapparaturen am Institut für Agrartechnik und am Institut für Kulturpflanzenwissenschaften möchte ich mich herzlich bei Thomas Karle, den beteiligten Kolleginnen und Kollegen am Institut für Agrartechnik, der Institutswerkstatt und der Messtechnikabteilung sowie Dr. Rudolf Schulz bedanken.

Großer Dank gilt den ehemaligen und derzeitigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Agrartechnik insbesondere dem Fachbereich Agrartechnik in den Tropen und Subtropen für die gute Zusammenarbeit und Kollegialität. Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr. Martin Kratzeisen und Dr. Nikica Starčević für deren Unterstützung bei der Versuchsplanung. Frau Sabine Nugent gilt mein herzlicher Dank für das sprachliche Korrigieren meiner Arbeit und Ihre freundliche Unterstützung.

Danken möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am ISWA der Universität Stuttgart für die fachlichen Gespräche und den gemeinsamen Weg durch die Höhen und Tiefen des wissenschaftlichen Arbeitens.

Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich herzlich bedanken, insbesondere danke ich meiner Tochter und meinem Vater für das Verständnis und für die Schaffung von Schreibzeit.

Summary

Biogas production to generate electricity is an important pillar of the transition of Europe's energy supply systems. Germany has the largest share of biogas plants in Europe, and these biogas plants are generating approximately 82 Mio. tons of digestate byproduct per year. Generally, digestate is abundant in various plant nutrients and, when used as fertilizer or soil amender, can enhance medium- and long-term soil fertility by and increased formation of humus. Biogas plants are predominately installed in rural areas with intensive livestock farming, where the farmland in the vicinity of the plants is often already very well supplied with nutrients. As the number of biogas plants has continued to expand in recent years, the supply of nutrients per hectare in these livestock intensive regions has increased even further. Hence, nutrient and digestate management is becoming more important for the biogas plants operators. The limited agricultural area and short application periods to fields necessitate large storage capacities as well as the transport over long distances to regions with nutrient deficits. This situation often requires a digestate treatment technology aiming to reduce its mass and volume. The removal of water can considerably decrease the transport costs of digestate, so that it can be transported over longer distances and be used effectively in agriculture. In the wastewater sludge treatment sector a reduction of mass and volume is also necessary to reduce transport costs. Sewage sludge processing with solar energy is a well-approved and comparatively simple technology, which achieved good drying results.

Therefore, the objectives of the present thesis were to investigate the technical applicability of solar drying systems with the additional use of waste-heat from biogas cogeneration plants to improve the efficiency of the drying line and to concentrate the nutrients in digestate. Additionally, this thesis focused on the volatilization of nitrogen during digestate drying and further to investigate the short-term plant uptake of nitrogen and phosphorus for differently processed digestate. The technical applicability was tested in trials in a large-scale hybrid waste-heat/solar dryer to study the influence of additional waste-heat utilization from a combined heat and power unit and a micro turbine on the drying process. Water evaporation and energy consumption of the drying process were measured to determine the drying performance and the drying behavior under different operating modes. The nitrogen emissions in the exhaust air of the large-scale

hybrid waste-heat/solar dryer were detected by Fourier transform infrared spectroscopy. With the results of the measurements, the volatilization of nitrogen in the form of ammonia was calculated to quantify the emission rate and the nitrogen loss during the drying process for untreated digestate and the separated solid fraction of digestate. The short-term fertilizer quality of digestate was investigated in pot experiments with barley plants. The nitrogen and phosphorus uptake of the plants was determined for solid dried digestate, solid and liquid fractions of separated digestate and untreated digestate. Special focus was on the influence of substrate treatment on the nutrient uptake of the organic fertilizer.

A hybrid waste-heat/solar drying system for digestate reached an average daily evaporation performance of 9 kg per m², whereas a solar dryer without waste-heat utilization for sewage sludge achieved about 5 kg per m² daily evaporation performance during summer months. The digestate can be dried to a moisture content of less than 15 %. The specific energy performance for drying digestate was 6.1 MJ per kg evaporated water when using the waste-heat from CHP and 9.7 MJ per kg when using additional waste-heat from the micro turbine. The additional utilization of the waste-heat from the micro turbine had no influence on shortening the digestate drying time. The measured values for the specific energy consumption were higher than those described in the literature for a belt drying system, but in the range for drying sewage sludge in a solar dryer. In the present study, a general technical applicability of digestate drying by a hybrid waste-heat/solar dryer was found. Nitrogen losses of up to 97.5 % were measured during drying of untreated digestate and 91.7 % for dewatered digestate. Ammonia has negative environmental impacts and therefore the ammonia should be recovered from the exhaust air or prevented during drying. The pot experiments have shown that the digestate in all investigated variants can supply sufficient P for the plants according to their growing stage, within the trial period. Regarding the nitrogen uptake, the plants were not sufficiently provided with all digestate variants according to their growing stage, nor can the nitrogen uptake of the plants from the digestate be generalized regarding the different processing forms.

When installing a drying system on a biogas plant, a hybrid waste-heat solar dryer presents a suitable low-maintenance and low-workload option. The drying of digestate leads to a concentration of phosphorus and organically bounded nitrogen.

Zusammenfassung

Die Stromerzeugung aus Biogas ist eine wichtige Säule der Energiewende in Europa. In Deutschland werden im europäischen Vergleich die meisten Biogasanlagen betrieben. Durch die anaerobe Vergärung, von pflanzlicher Biomasse zur Biogasproduktion, entstehen hierzulande jedes Jahr circa 82 Mio. Tonnen Vergärungsrückstände, die auch als Gärreste bezeichnet werden. Diese Gärreste sind wertvolle organische Dünger und beeinflussen den Humusgehalt im Boden mittel- und langfristig positiv. Als Folge dessen werden wichtige Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit verbessert. Biogasanlagen befinden sich überwiegend in ländlichen Gebieten mit intensiver Tierhaltung. Die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen sind deshalb oft bereits sehr gut mit Nährstoffen versorgt. Mit dem Zubau von Biogasanlagen im Laufe der letzten Jahre hat sich das flächenbezogene Nährstoffangebot in diesen Regionen noch weiter erhöht. Daher gewinnt das Nährstoff- und Gärrestmanagement für die Betreiber von Biogasanlagen an Bedeutung. Knappe landwirtschaftliche Nutzflächen und kurze Ausbringzeiten für Wirtschaftsdünger erfordern große Lagerkapazitäten und häufig Transporte über weite Distanzen in Regionen mit Nährstoffbedarf. Diese Umstände machen oft eine Aufbereitung notwendig, um die Masse und das Volumen der Gärreste zu reduzieren. Auch bei der Klärschlammbehandlung spielen Volumen- und Massenreduktion eine wichtige Rolle, um Transportkosten zu senken. Die Klärschlammaufbereitung in einer solaren Trocknungsanlage stellt eine bewährte und wartungsarme Technologie dar, die gute Trocknungsergebnisse erzielt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die verfahrenstechnische Anwendbarkeit und die Effizienz des Trocknungsprozesses für Gärreste in einem solaren Trocknungssystem mit kombinierter Abwärmenutzung untersucht. Ziele der Gärresttrocknung sind eine Massen- und Volumenreduktion sowie eine Aufkonzentration der in den Gärresten enthaltenen Nährstoffe. Ein Schwerpunkt war hierbei, die auftretenden Stickstoffverluste in Form von Ammoniakemissionen zu quantifizieren. Des Weiteren wurde die Düngewirkung für unterschiedlich aufbereitete Gärreste untersucht. Die Forschungsarbeiten zum Trocknungsprozess wurden in einem großtechnischen kombinierten Abwärme-/Solartrockner durchgeführt. Genutzt wurde die Abwärme eines Blockheizkraftwerks und einer Mikrogasturbine. Die zu klärende Forschungsfrage bei dieser Untersuchung war es, den Einfluss einer zusätzlichen Abwärmenutzung aus der

Mikrogasturbine auf das Trocknungsverhalten der Gärreste und die Effizienz des Trocknungsprozesses zu bestimmen. Eine weitere Fragestellung war, inwiefern die Stickstoffverluste während der Trocknung durch eine Gärrestvorbehandlung mittels eines Separators beeinflusst werden. Die während der Trocknung entstehenden Ammoniakemissionen wurden kontinuierlich in der Abluft der Trocknungsanlage mittels Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie detektiert und die Stickstoffverluste von unbehandeltem Gärrest und vom separierten Feststoffanteil des Gärrestes während des Trocknungsprozesses quantifiziert. Die Aufnahme von Stickstoff und Phosphor durch Pflanzen zur Bestimmung der Düngewirkung wurde für separierte, getrocknete Gärreste, für die Feststoff- und Flüssigfraktion von separiertem Gärrest sowie für unbehandelte Gärreste in Topfversuchen untersucht.

Die durchschnittliche tägliche Verdampfungsleistung des kombinierten Abwärme-/Solartrockner lag bei 9 kg Wasser pro m², im Vergleich dazu erreichen Solartrockner ohne Abwärmenutzung für die Klärschlamm-trocknung während der Sommermonate eine durchschnittliche Verdampfungsleistung um 5 kg pro m² pro Tag. Gärreste können bis zu einem Feuchtegehalt von weniger als 15 % getrocknet werden. Der spezifische Energiebedarf für die Trocknung von Gärresten betrug 6,1 MJ pro kg verdampftes Wasser bei der kombinierten Abwärmenutzung aus dem Blockheizkraftwerk und 9,7 MJ pro kg bei zusätzlicher Abwärmenutzung von der Mikrogasturbine. Auf die Trocknungsdauer des Substrates hatte die zusätzliche Abwärmenutzung der Mikrogasturbine hingegen keinen Einfluss. Der spezifische Energiebedarf des Trocknungssystems war größer als der in der Literatur beschriebene für Bandtrockner, er lag jedoch im Bereich des spezifischen Energiebedarfs für die solare Klärschlamm-trocknung. Zusammenfassend betrachtet ist ein kombinierter Abwärme-/Solartrockner, unter prozesstechnischen Aspekten, für die Gärrest-trocknung geeignet. Die Stickstoffverluste während der Trocknung in Form von Ammoniakemissionen wurden mit bis zu 97,5 % bei unbehandelten Gärresten und 91,7 % bei entwässerten Gärresten quantifiziert. Ammoniak in der Luft hat negative Auswirkungen auf die Umwelt und deshalb sollte der reaktive Stickstoff aus der Abluft rückgewonnen, beziehungsweise während der Trocknung nicht emittiert werden. Die Topfversuche zeigten, dass die Pflanzen ausreichend Phosphor aus den Gärresten in allen untersuchten Varianten aufnehmen können und entsprechend ihres Wachstumsstadiums,

innerhalb des Versuchszeitraums ausreichend mit Phosphor versorgt waren. Dagegen war im Hinblick auf die Stickstoffaufnahme der Pflanzen, nicht in allen Gärrestvarianten ausreichend verfügbarer Stickstoff enthalten, um eine dem Wachstum entsprechende Aufnahme zu erreichen. Auch können die Ergebnisse zur Stickstoffaufnahme aus den Gärrestvarianten nicht auf Gärreste aus anderen Biogasanlagen übertragen werden.

Wenn ein Trocknungssystem in eine Biogasanlage integriert werden soll, stellt ein kombiniertes Abwärme-/Solartrocknungssystem eine wartungsarme und mit geringem Personalaufwand zu betreibende Option dar. Die Trocknung des Gärrestes führt zu einer Aufkonzentration von Phosphor und organisch gebundenem Stickstoff.

Table of contents

Summary.....	I
Zusammenfassung	III
Table of contents	VII
List of figures	IX
List of tables	XI
1 General introduction	1
1.1 Biogas as a renewable energy source, environmental aspects of digestate application and digestate processing technologies	2
1.2 Digestate characteristics	5
1.3 Objective and structure of the study.....	7
1.4 References	7
2 Part I: Drying characteristics of biogas digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer	13
2.1 Abstract	13
2.2 Introduction	13
2.3 Material and methods	16
2.3.1 Description of the drying system.....	16
2.3.2 Description of the drying process	17
2.4 Results and discussion.....	19
2.4.1 Drying characteristics and energy input	19
2.4.2 Drying performance of biogas digestate.....	20
2.5 Conclusion.....	23
2.6 References	24
3 Part II: Ammonia (NH₃) emissions during drying of untreated and dewatered biogas digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer	27
3.1 Abstract	27
3.2 Introduction	27
3.3 Material and methods	29
3.3.1 Hybrid waste-heat/solar dryer	29
3.3.2 Material.....	30
3.3.3 Measurements	31
3.4 Results	33
3.4.1 Changes of ammonium content during the drying process	33
3.4.2 NH ₃ emission rate during time	34
3.5 Discussion	36
3.6 Practical Application	37

3.7	References	37
4	Part III: Short-term nitrogen uptake of barley from differently processed biogas digestate in pot experiments	41
4.1	Abstract	41
4.2	Introduction	41
4.3	Material and methods	44
4.3.1	Sampling and analysis of digestate variants	44
4.3.2	Chemical composition of digestate variants	46
4.3.3	Plant growth experiments	46
4.3.4	Statistical analysis	48
4.4	Results and discussion	48
4.4.1	Visual observation of plant development	48
4.4.2	Above-ground biomass yield	51
4.4.3	Nitrogen content of above-ground biomass	52
4.4.4	Phosphorus content of above-ground biomass	54
4.4.5	Nitrogen removal from soil substrate and plant uptake efficiency of nitrogen	55
4.5	Conclusions	56
4.6	References	57
5	General discussion	63
5.1	Drying digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer	63
5.2	Emissions of ammonia during drying	64
5.3	Short-term fertilizer uptake from differently processed digestate	65
5.4	Outlook	66
5.5	References	67

List of figures

Figure 1-1. Inside view of the hybrid waste-heat/solar dryer.....	5
Figure 2-1. Scheme of the hybrid waste-heat/solar dryer with measuring-points for temperature (T), rel. humidity (RH) with continuous recording (IR).	16
Figure 2-2. Ambient temperature, rel. humidity and solar radiation on an exemplary day; (left) in June for variants using the waste-heat of the combined heat and power unit (S-CHP); (right) in September for variants using additionally exhaust air of a micro turbine (S-CHP-MT).	17
Figure 2-3. Cumulative energy input E_{total} from solar energy E_{solar} , waste-heat from a combined heat and power unit E_{CHP} and exhaust gas from a micro turbine E_{MT} for drying of biogas digestate; (left) variant S-CHP with solar energy E_{solar} and waste-heat of a combined heat and power unit E_{CHP} ; (right) variant S-CHP-MT with solar energy E_{solar} , waste-heat of a combined heat and power unit E_{CHP} and exhaust gas from a micro turbine E_{MT}	20
Figure 2-4. Spatial pattern of the moisture content (MC) of the digestate across the drying area based on the interpolation of 20 grid measurements after 1, 7 and 13 d of the drying with solar energy and waste-heat of a combined heat and power unit (S-CHP) and with additional use of the exhaust air of a micro turbine (S-CHP-MT).	21
Figure 2-5. Course of moisture content MC during drying of biogas digestate; (left) variant S-CHP with solar energy and waste-heat of a combined heat and power unit; (right) variant S-CHP-MT with solar energy, waste-heat of a combined heat and power unit and exhaust air of a micro turbine. Mean values of 20 spatial grid measurement, error bars represent the standard deviation.	22
Figure 3-1. Components and control scheme of the dryer.	30
Figure 3-2. Longitudinal section of the experimental set up; (A) drying hall, (B) exhaust air fan, (C) airflow, (D) measurements tube, (E) filter for emission measurements, (F) sensor for temperature and air pressure, and (G) support.	31
Figure 3-3. Percentage of total initial nitrogen content (N _i) before (left) and after drying (right) of untreated (tests 1, 2) and dewatered (tests 3, 4) digestate.	34
Figure 3-4. NH ₃ emission of untreated (tests 1, 2) and dewatered (tests 3, 4) digestate in the exhaust air of the dryer with the corresponding temperature.	35
Figure 3-5. Cumulative NH ₃ loss during drying of untreated and dewatered digestate.	35

Figure 4-1. Barley plants 35 days after sowing with yellow leaf tips and violet discoloration of stalks: (a) Control (without digestate treatment); (b) Treatment SDD2L (solid digestate dried, biogas plant 2, low fertilization level); (c) Treatment SDD2H (solid digestate dried, biogas plant 2, high fertilization level); (d) Treatment SD2L (solid digestate, biogas plant 2, low fertilization level); (e) Treatment SDD1L (solid digestate dried, biogas plant 1, low fertilization level); (f) Treatment SDD1H (solid digestate dried, biogas plant 1, high fertilization level).	50
Figure 4-2. Above-ground biomass yield Y_{DM} of different treatments: (a) Treatments based on manure as feedstock from BP1 with fertilization level L; (b) Treatments based on energy crops as feedstock from BP2 with fertilization level L; (c) Treatments from BP1 with fertilization level H; (d) Treatments from BP2 with fertilization level H; (code see Table 4-1; $n = 4$, whiskers show standard deviation, different letters indicate significant differences, $p = 0.05$).	51
Figure 4-3. Nitrogen content %N of above-ground biomass for different treatments: (a) Treatments based on manure as feedstock from BP1 with fertilization level L; (b) Treatments based on energy crops as feedstock from BP2 with fertilization level L; (c) Treatments from BP1 with fertilization level H; (d) Treatments from BP2 with fertilization level H; (code see Table 4-1; $n = 4$, whiskers show standard deviation, different letters indicate significant differences, $p = 0.05$).	52
Figure 4-4. Phosphorus content %P of above-ground biomass for different treatments: (a) Treatments based on manure as feedstock from BP1 with fertilization level L; (b) Treatments based on energy crops as feedstock from BP2 with fertilization level L; (c) Treatments from BP1 with fertilization level H; (d) Treatments from BP2 with fertilization level H; (code see Table 4-1; $n = 4$, whiskers show standard deviation, different letters indicate significant differences, $p = 0.05$).	54
Figure 4-5. Nitrogen removal N_{re} from soil substrate for different treatments: (a) Treatments based on manure as feedstock from BP1 with fertilization level L; (b) Treatments based on energy crops as feedstock from BP2 with fertilization level L; (c) Treatments from BP1 with fertilization level H; (d) Treatments from BP2 with fertilization level H; (code see Table 4-1; $n = 4$, whiskers show standard deviation, different letters indicate significant differences, $p = 0.05$).	55

List of tables

Table 2-1. Technical data of onside combined heat and power unit (CHP) and micro turbine (MT).....	17
Table 2-2. Initial and final moisture content MC_{ini} and MC_{fin} , mass of evaporated water for the drying of digestate in a solar greenhouse dryer with waste-heat from CHP (variant S-CHP) and additional heat from a micro turbine (variant S-CHP-MT). Mean values $\pm$ standard deviation.	20
Table 3-1. Test conditions for drying untreated and dewatered digestate with initial and final mass m_1 , m_2 ; dry matter content DM_1 , DM_2 ; water evaporation Δm_w ; drying time t ; initial and final total nitrogen content N_{t1} , N_{t2} , and initial and final ammonium-N content NH_4-N_1 , NH_4-N_2	33
Table 4-1. Description and code of digestate variants.....	45
Table 4-2. Chemical composition of digestate variants, values based on DM (code see Table 4-1).	46
Table 4-3. Added basic fertilization to 1 kg soil substrate.	47
Table 4-4. Mass of digestate variant added to 1 kg of soil per pot to achieve calculated low (L) and high (H) N fertilization, i.e., 300 and 500 mg readily available N kg^{-1} and resulting content of NH_4-N , P, K and Mg in each pot (code of digestate variants 1 and 2 means biogas plant 1 and biogas plant 2 respectively, UD = untreated digestate, LD = liquid digestate, SD = solid digestate, SDD = solid digestate dried).....	47
Table 4-5. Plant uptake efficiency of nitrogen (NUE) for untreated digestate (UD), liquid digestate (LD), solid digestate (SD), and solid digestate dried (SDD) at low (L) and high (H) level of fertilization; code 1 and 2 means digestate from biogas plant 1 and biogas plant 2, respectively.	56