

Jens Lansche

**Life cycle assessment of
agricultural biogas systems
in industrialized and developing
countries**

Life cycle assessment of agricultural biogas systems in industrialized and developing countries

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

**Faculty of Agricultural Sciences
University of Hohenheim**

Institute of Agricultural Engineering,
Tropics and Subtropics Group, Prof. Dr. J. Müller

submitted by
M.Sc. Jens Lansche

from
Schwetzingen
2021

This thesis was accepted as a doctoral dissertation in fulfilment of the requirements for the degree “Doktor der Agrarwissenschaften” by the Faculty of Agricultural Sciences at Universität Hohenheim on 01.04.2020.
Date of oral examination: 30.09.2020

Examination Committee

Prof. Dr. Joachim Müller (Supervisor and Reviewer)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (Co-Reviewer)
PD Dr. Andreas Lemmer (Additional examiner)
Prof. Dr. Thilo Streck (Deputy of the Dean)

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

Band 2021/23

Jens Lansche

**Life cycle assessment of agricultural biogas systems
in industrialized and developing countries**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8268-5

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

For Manu, my sons, my family and friends

Acknowledgements

I would like to take this opportunity to thank everyone who supported me during the time this thesis was written and the underlying research was done.

First of all, I would like to express my deep gratitude to the supervisor of the thesis, Prof. Dr. Joachim Müller. For giving me the opportunity to write this thesis, for his tireless support and for his guidance in troubled times. Furthermore, I would like to thank the other members of the examination board, Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert, PD Dr. Andreas Lemmer and Prof. Dr. Thilo Streck for their expert opinions and for participating in and conducting the examination.

My sincere thanks also go to all former and current colleagues at the Institute of Agricultural Engineering, especially Dimitrios, Giuseppe, Jimmy, Martin B., Martin K. and Klaus. Special thanks to Claudia for her tireless motivation and the good professional and friendly exchange over all the years.

Also in my private life there were many people who supported me. My heartfelt thanks go to Manuela, for her unconditional love and support in troubled times. Special thanks to my grandfather Karl Kraus, who sparked my interest in scientific work and furthermore to my father Bertold Lansche, Rita, Hans, Marc and Annette and Sela. Furthermore, I would like to thank all my friends for the countless and yet so necessary hours of joy and amusement, especially my deep gratitude to Jens, Sanella, Vic, Cic and Biene.

The study was partly financed by the Ministry for Rural Areas, Food and Consumer Protection (former: Ministry of Agriculture) Baden-Württemberg, Germany with funds of the Baden-Württemberg Stiftung gGmbH.

This research was partly funded by German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under Project No. 031B0217 “CassavaUpgrade”.

Summary

Environmental problems and resource scarcity lead to an increasing societal demand for a more environmentally friendly energy supply while at the same time conserving finite and scarce resources. A shift to a decarbonized and less emission intensive energy sector is therefore one of the most challenging tasks for global society in the 21st century. The production of biogas by anaerobic digestion of energy crops, manure, residues and waste from primary agricultural production and food processing can make an important contribution to this necessary development. Anaerobic digestion is a biological process that converts organic material into biogas by microbial degradation. The produced biogas mainly consists of carbon dioxide and methane, which makes it a valuable energy carrier that can be used via different utilization pathways and replace fossil fuels. By replacing fossil fuels, resource savings can be achieved and emissions can be avoided. However, the production and use of biogas itself is also associated with emissions and related negative environmental impacts. This aspect is even more relevant because biogas production systems and utilization of biogas differ considerably between developing and developed countries regarding digester type, digester size, feedstock and utilization pathways for the gas produced. Biogas production in technically simple household-scale digesters is common in developing countries, where the gas is used for provision of household energy, mainly for cooking. In contrast, mainly large-scale and technically mature biogas plants are established in developed countries with a broader variety of pathways for biogas utilization ranging from production of heat and electricity to a utilization as vehicle fuel after upgrading to biomethane. From a holistic point of view, the overall environmental impacts are therefore dependent on numerous influencing factors, which have been examined in more detail in this work.

The aim of this work was to assess the environmental impacts of biogas production from agricultural substrates and residues from food production systems as a function of the feedstock used, the biogas technology and the respective reference systems. To reflect the global variability of biogas systems, three different case studies were assessed from different geographical regions, namely Europe, Asia and Africa. Energy crops, manure and residues from food processing were considered and the biogas technology ranged from household-scale to industrial-scale. The estimation of environmental impacts was investigated using the

life cycle assessment method based on the two standards ISO 14040 and 14044. The results of the European case study (located in Germany) indicated that greenhouse gas emissions can be reduced by using agricultural feedstock for anaerobic digestion with utilization of the emerging biogas in a CHP to generate heat and electricity. In comparison to energy crops, liquid manure is more advantageous in this respect when digested as a single feedstock. Furthermore, the results indicated that the reduction potential of manure digestion for global warming potential is relatively small when liquid manure with shares of 0–35% (mass basis) is used for co-digestion together with energy crops. This result is particularly interesting because at the time of the study there were financial incentives in Germany for the co-fermentation of liquid manure if its mass fraction was at least 30%.

Biogas production systems in Africa differ considerably from European ones. The African case study (located in Ethiopia) did therefore assess household-scale digesters. Produced biogas was used for provision of household cooking energy as a substitute of dried cattle dung as traditional fuel. Combustion of dried dung releases high amounts of nitrogen oxides and particulate matter emissions and causes a high indoor air pollution that endangers the health of the rural population. The results indicated that these emissions can be reduced considerably when using biogas instead of dung cakes for the provision of household cooking energy. Besides that, savings of primary energy can be achieved as well as a reduction of impacts on global warming, eutrophication, acidification, terrestrial ecotoxicity.

The use of residues from processing of cassava was selected for the Asian case study (located in Malaysia). The results indicated that environmental impacts of cassava-based products can be reduced considerably with utilization of processing residues for anaerobic digestion if the resulting biogas is used for production of electricity and heat. For starch production, the results indicated that the highest relative reductions are achieved for cumulated energy demand, global warming potential, and deforestation while for cassava crisps, environmental impacts for cumulated energy demand, global warming potential, ozone formation potential and water stress index can be reduced most.

In summary, the results of this work showed that substitution of traditional energy sources by biogas can lead to environmental advantages. Main influencing factors for environmental impacts of biogas production systems are: i) input substrates used for digestion, ii) amount

of methane and ammonia emissions from the biogas plant, iii) types of digestate- and gas-storage, iv) utilization of the digestate, vi) type of energy that is produced, vii) energy conversion efficiency, viii) degree of energy utilization, ix) reference systems and x) the methodological choices that are made.

Zusammenfassung

Umweltprobleme und Ressourcenknappheit führen zu einer zunehmenden gesellschaftlichen Nachfrage nach einer umweltfreundlicheren Energieversorgung bei gleichzeitiger Schonung der endlichen und knappen Ressourcen. Die Umstellung auf einen dekarbonisierten und weniger emissionsintensiven Energiesektor ist daher eine der anspruchsvollsten Aufgaben für die Gesellschaft im 21. Jahrhundert. Die Erzeugung von Biogas durch anaerobe Vergärung von Energiepflanzen, Dung, Rückständen und Abfällen aus der landwirtschaftlichen Primärproduktion und der Lebensmittelverarbeitung kann einen wichtigen Beitrag zu dieser notwendigen Entwicklung leisten. Die anaerobe Vergärung ist ein biologischer Prozess, der organisches Material durch mikrobiellen Abbau in Biogas umwandelt. Das erzeugte Biogas besteht hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid und Methan, wobei Letzteres es zu einem wertvollen Energieträger macht, der über verschiedene Nutzungspfade genutzt werden kann und fossile Brennstoffe ersetzt. Durch den Ersatz fossiler Brennstoffe können Ressourceneinsparungen erzielt und Emissionen vermieden werden. Die Produktion und Nutzung von Biogas erzeugt jedoch auch Emissionen und folglich negative Umweltauswirkungen. Dieser Aspekt ist umso relevanter, als sich die Biogasproduktionssysteme und die Nutzung von Biogas zwischen Entwicklungs- und Industrieländern hinsichtlich des Fermentertyps, der Fermentergröße, der Einsatzstoffe und der Nutzungspfade für das erzeugte Gas erheblich unterscheiden. Die Biogasproduktion in technisch einfachen Fermentern im Haushaltsmaßstab ist in Entwicklungsländern üblich, wo das Gas zur Bereitstellung von Haushaltsenergie, hauptsächlich zum Kochen, verwendet wird. Im Gegensatz dazu werden in den entwickelten Ländern hauptsächlich große und technisch ausgereifte Biogasanlagen errichtet, die eine größere Vielfalt an Nutzungspfaden für das Biogas aufweisen, die von der Produktion von Wärme und Elektrizität bis hin zur Nutzung als Fahrzeugkraftstoff nach der Aufbereitung zu Biomethan reichen. Aus einer ganzheitlichen Sicht sind die gesamten Umweltauswirkungen daher von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig, die in dieser Arbeit näher untersucht wurden.

Ziel dieser Arbeit war es, die Umweltwirkungen der Biogasproduktion aus landwirtschaftlichen Substraten und Rückständen aus der Lebensmittelproduktion in Abhängigkeit von den eingesetzten Rohstoffen, der Biogastechnologie und den jeweiligen Referenzsystemen zu bewerten. Um die globale Variabilität von Biogassystemen

widerzuspiegeln, wurden drei verschiedene Fallstudien aus verschiedenen geographischen Regionen, nämlich Europa, Asien und Afrika, bewertet. Energiepflanzen, Dung und Rückstände aus der Lebensmittelverarbeitung wurden berücksichtigt, und die Biogastechnologie reichte vom Haushalts- bis zum Industriemaßstab. Die Abschätzung der Umweltauswirkungen wurde mit der Methode der Ökobilanzierung auf der Grundlage der beiden Normen ISO 14040 und 14044 untersucht. Die Ergebnisse der europäischen Fallstudie (in Deutschland) zeigten, dass die Treibhausgasemissionen durch die Verwendung von landwirtschaftlichen Rohstoffen für die anaerobe Vergärung und die Nutzung des entstehenden Biogases in einem BHKW zur Wärme- und Stromerzeugung reduziert werden können. Im Vergleich zu Energiepflanzen ist Gülle in dieser Hinsicht vorteilhafter, wenn sie in Monovergärung vergoren wird. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass das Reduktionspotential der Güllevergärung bezüglich des Treibhauspotenzials relativ gering ist, wenn Gülle mit Anteilen von 0-35 Massenprozent zusammen mit Energiepflanzen zur Co-Vergärung verwendet wird. Dieses Ergebnis ist besonders interessant, weil es zum Zeitpunkt der Studie in Deutschland finanzielle Anreize für die Co-Vergärung von Gülle gab, wenn deren Massenanteil mindestens 30% betrug.

Die Biogasproduktionssysteme in Afrika unterscheiden sich erheblich von den europäischen. In der afrikanischen Fallstudie (in Äthiopien) wurden daher Fermenter im Haushaltsmaßstab bewertet. Das erzeugte Biogas wurde zur Bereitstellung von Kochenergie im Haushalt als Ersatz für getrockneten Rinderdung als traditionellen Brennstoff verwendet. Die Verbrennung von getrockneten Dungfladen setzt hohe Mengen an Stickoxiden und Feinstaubemissionen frei und verursacht eine hohe Innenraumluftverschmutzung, die die Gesundheit der ländlichen Bevölkerung gefährdet. Die Ergebnisse zeigten, dass diese Emissionen erheblich reduziert werden können, wenn Biogas anstelle von getrockneten Dungfladen für die Bereitstellung von Kochenergie im Haushalt verwendet wird. Darüber hinaus können Einsparungen von Primärenergie sowie eine Verringerung der Auswirkungen auf das Treibhauspotenzial, Eutrophierung, Versauerung und terrestrische Ökotoxizität erreicht werden.

Die Verwendung von Rückständen aus der Verarbeitung von Maniok wurde für die asiatische Fallstudie (in Malaysia) ausgewählt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Umweltwirkungen von Produkten auf Maniokbasis durch die Nutzung von Verarbeitungsrückständen für die anaerobe Vergärung erheblich reduziert werden können,

wenn das entstehende Biogas zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt wird. Bei der Stärkeproduktion zeigten die Ergebnisse, dass die höchsten relativen Reduktionen beim Energiebedarf, dem Treibhauspotenzial und der Abholzung erreicht werden, während bei Maniok-Chips die Umweltwirkungen beim Energiebedarf, dem Treibhauspotenzial, dem Ozonbildungspotenzial und dem Wasserstress am stärksten reduziert werden können.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Substitution traditioneller Energiequellen durch Biogas zu Umweltvorteilen führen kann. Die Haupteinflussfaktoren für die Umweltauswirkungen von Biogasproduktionssystemen waren: i) die für die Vergärung verwendeten Rohstoffe, ii) die Menge der Methan- und Ammoniakemissionen aus der Biogasanlage, iii) die Art der Gärrest- und Gaslagerung, iv) die Nutzung des Gärrestes, vi) die Art der erzeugten Energie, vii) die Energieumwandlungseffizienz, viii) der Grad der Energienutzung, ix) die Referenzsysteme und x) die methodischen Entscheidungen, die getroffen wurden.

Table of Contents

Acknowledgements	
Summary	v
Zusammenfassung	viii
Table of Contents	xi
List of Figures	xiv
List of Tables	xvi
1 General Introduction	1
1.1 Biogas production in agriculture	2
1.2 Characteristics of biogas production systems in different parts of the world	2
1.2.1 Globally	2
1.2.2 European Union	3
1.2.3 United States of America (USA)	4
1.2.4 Asia	4
1.2.4.1 Malaysia	4
1.2.4.2 China	5
1.2.5 Africa	5
1.2.5.1 Ethiopia	5
1.3 Life Cycle Assessment (LCA) as a method for assessment of the environmental impacts	5
1.4 Problem statement	6
1.5 Objective and structure of the study	7
1.6 References	8
2 Part I: Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates	12
2.1 Abstract	12
2.2 Introduction	12
2.3 Material and methods	14
2.3.1 Goal and scope	14
2.3.2 Method	14
2.3.3 Life cycle inventory analysis (LCI)	16
2.3.4 System boundaries and system expansion	16
2.3.5 Sensitivity analysis	18
2.3.6 Life cycle impact assessment (LCIA)	19
2.4 Results and discussion	19
2.4.1 Global Warming Potential	19
2.4.2 Sensitivity analysis	20
2.4.3 Acidification Potential and Eutrophication Potential	21
2.5 Concluding remarks	23
2.6 Practical application	24

2.7	References	24
3	Part II: Life cycle assessment (LCA) of biogas versus dung combustion household cooking systems in developing countries - A case study in Ethiopia	28
3.1	Abstract	28
3.2	Introduction	28
3.3	Material and methods	30
3.3.1	LCA modeling	30
3.3.2	System definition	31
3.3.3	Life cycle inventory	33
3.3.4	Impact assessment	35
3.3.5	Sensitivity analysis	35
3.3.6	Scenario analysis	36
3.4	Results and discussion	37
3.4.1	Primary energy demand (PED)	37
3.4.2	Global warming potential (GWP)	37
3.4.3	Eutrophication potential (EP)	38
3.4.4	Acidification potential (AP)	39
3.4.5	Human toxicity potential (HTP)	39
3.4.6	Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	39
3.4.7	Sensitivity analysis	40
3.4.8	Scenario analysis	41
3.4.9	Limitations of the study	41
3.5	Conclusion and outlook	42
3.6	References	43
4	Part III: Potential of biogas production from processing residues to reduce environmental impacts from cassava starch and crisp production – a case study from Malaysia	47
4.1	Abstract	47
4.2	Introduction	47
4.3	Materials and Methods	49
4.3.1	Description of the system under study	49
4.3.1.1	Feedstock for production of starch, crisps and biogas	49
4.3.1.2	Processing of roots	50
4.3.1.3	Cassava leaves	51
4.3.1.4	Biogas production and utilization	52
4.3.2	Life cycle inventory (LCI)	52
4.3.2.1	Goal, scope and functional unit	52
4.3.2.2	System boundaries	52
4.3.2.3	Scenarios	54
4.3.2.4	LCI data	54
4.3.2.4.1	Nitrous oxide (N ₂ O)	55
4.3.2.4.2	Phosphorus emissions to water	57
4.3.2.4.3	Heavy metal emissions	57
4.3.2.4.4	Pesticide emissions	57
4.3.3	Life cycle impact assessment (LCIA) method	57
4.4	Results	57

4.4.1	Cassava cultivation	57
4.4.1.1	Cassava Processing and the Utilization of Processing Residues for Biogas Production	59
4.5	Conclusions	62
4.6	References	63
5	Discussion	67
5.1	Environmental impacts of different agricultural feedstock used in anaerobic digestion	68
5.2	Life cycle assessment (LCA) of biogas versus dung combustion household cooking systems in developing countries - a case study in Ethiopia.....	68
5.3	Potential of biogas production from processing residues to reduce environmental impacts from cassava starch and novel food products – a case study from Malaysia	69
5.4	Influence of methodological choices and assumptions	69
5.5	Uncertainties.....	70
5.6	Outlook.....	70
5.7	References	71
	Curriculum vitae.....	74

List of Figures

Figure 1: Representation of the biogas system used in this study and reference systems taken into consideration with system expansion.	18
Figure 2: Global warming potential (GWP) of model biogas plants of different sizes and feedstock composition. The environmental burdens (emissions) are shown above the 0-line while the credits are shown below with a negative algebraic sign.	20
Figure 3: Sensitivity of different assumptions for CH ₄ -emissions (% of total CH ₄ production) of digestate storage on global warming potential (GWP) of 50 kW _{el} (kilowatt electrical power) and 2000 kW _{el} model biogas plant.	21
Figure 4: Eutrophication potential (EP) of model biogas plants of different sizes.	22
Figure 5: Acidification potential (AP) of model biogas plants of different sizes.	23
Figure 6: Household biogas system and baseline system producing equivalent functional output.	32
Figure 7: PED, EP, AP, GWP, HTP, TETP of biogas compared to the baseline system.	38
Figure 8: Sensitivity analysis for GWP in the biogas system.	40
Figure 9: System boundaries of the life cycle assessment (LCA) study (FU: 1 kg of cassava starch, either in the form of dried native starch or based on the corresponding starch content in cassava crisps).	53
Figure 10: Environmental impacts of traditional (1) and modern (2) cassava cultivation per kg of harvested cassava root; cumulated energy demand (CED) in MJ, deforestation (DEF) in 4×10^{-3} m ² , water stress index (WSI) in 4×10^{-2} m ³ , global warming potential (GWP) in 4×100 kg CO ₂ -eq, ozone formation potential (OFP) in 10^{-2} kg NMVOC-eq, acidification potential (AP) in 2×10^{-1} mol H ⁺ , human toxicity potential (HTP) in 10^{-4} kg 1,4-DB-eq and ecotoxicity potential (ETP) in 10^{-2} kg 1,4-DB-eq.	58
Figure 11: Environmental impacts of industrial (1) and advanced (2) cassava processing per kg of starch output; cumulated energy demand (CED) in MJ, deforestation (DEF) in 5×10^{-3} m ² , water stress index (WSI) in 5×10^{-3} m ³ , global warming potential (GWP) in 10^{-1} kg CO ₂ -eq, ozone formation potential (OFP) in 10^{-3} kg NMVOC-eq, acidification potential (AP) in 10^{-3} mol H ⁺ , human toxicity potential (HTP) in 10^{-2} kg 1,4-DB-eq, and ecotoxicity potential (ETP) in 5×10^{-2} kg 1,4-DB-eq.	60
Figure 12: Relative contribution to environmental impacts of the various processing steps in industrial (1) and advanced (2) cassava processing; cumulated energy	

demand (CED), deforestation (DEF), water stress index (WSI), global warming potential (GWP), ozone formation potential (OFP), acidification potential (AP), human toxicity potential (HTP) and ecotoxicity potential (ETP).	62
---	----

List of Tables

Table 1: Overview on global biogas-based electricity production (based on data from [8-12]).	3
Table 2: Technical data of CHP and share of feedstock substrates per mass.	15
Table 3: Feedstock characterization.	16
Table 4: Energy and emission characteristics of dung and biogas combustion.	34
Table 5: Parameter variation for scenario analysis.	36
Table 6: Energy surplus and deficit of the biogas system at different GWP scenarios.	37
Table 7: Total results per biogas plant for all three scenarios.	41
Table 8: Main characteristics of traditional and modern cassava production system under study.	49
Table 9: Main characteristics and assumptions for cassava starch extraction (based on [16]).	50
Table 10: Overview on scenarios.	54
Table 11: Emission models used (adapted from [25]).	55