



Technische Universität München

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

**Analyse der Ertragseffekte und ökonomischen Wirkungen
der Biogasproduktion
in ökologischen Marktfruchtbetrieben**

Martina Serdjuk

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zu Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr. Vera Bitsch
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen
2. Prof. Dr. Ulrich Bodmer

Die Dissertation wurde am 22.11.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 17.07.2019 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Ziel der Arbeit	1
2.	Stand des Wissens	6
2.1.	Viehlose Anbausysteme im ökologischen Landbau	6
2.2.	Systemwirkungen der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau.....	8
2.2.1.	Wirkung auf betriebliche Stoffkreisläufe	8
2.2.2.	Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung	10
2.2.3.	Ökonomische Effekte der Integration einer Biogasanlage in einen ökologischen Betrieb	13
2.3.	Aktuelle Situation der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau in Deutschland	16
2.4.	Herausforderungen der ökologischen Biogaserzeugung.....	19
2.5.	Risikobewertung der Biogaserzeugung.....	20
2.6.	Forschungsbedarf und Hypothesen	22
3.	Material und Methoden	24
3.1.	Feldexperimentelle Untersuchung	24
3.1.1.	Der Systemversuch Viehhausen.....	24
3.1.2.	Statistische Auswertung der Ertragsleistungen	28
3.1.3.	Ökonomisches Planungsmodell.....	29
3.1.3.1.	Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs.....	30
3.1.3.2.	Unternehmergewinn Ackerbau	32
3.1.3.3.	Unternehmergewinn Biogasanlage	33
3.1.3.4.	Stromgestehungskosten und „notwendiger“ Strompreis.....	35
3.1.4.	Modellannahmen	36
3.1.4.1.	Annahmen zu den Modellbetrieben	36
3.1.4.2.	Annahmen zum Betriebszweig Ackerbau.....	37
3.1.4.3.	Modellbiogasanlagen.....	40
3.1.5.	Risikoanalyse	45
3.1.5.1.	Sensitivitätsanalysen	46
3.1.5.2.	Monte Carlo Simulation	48
3.1.5.2.1.	Methodik.....	48
3.1.5.2.2.	Risikoparameter	49
3.2.	Betriebliche Fallstudie unter Praxisbedingungen	57
3.2.1.	Datenbasis	59
3.2.1.1.	Der Ackerbau.....	60
3.2.1.2.	Die Biogasanlage	64
3.2.2.	Bewertungsmethodik	66
3.2.2.1.	Ertragseffekte	66
3.2.2.2.	Ökonomische Fallstudie	66
3.2.2.3.	Monte-Carlo-Simulation	67
4.	Ergebnisse der feldexperimentellen Untersuchungen	72
4.1.	Ertragseffekte im Systemversuch Viehhausen.....	72
4.2.	Ökonomische Bewertung der Integration einer Biogasanlage.....	75
4.2.1.	Ökonomische Kennzahlen der Biogasanlagen.....	75
4.2.2.	Ökonomische Kennzahlen des Gesamtbetriebs	79
4.2.3.	Notwendiger Strompreis für die Vorteilhaftigkeit der Biogassysteme	84
4.2.4.	Sensitivitätsanalysen	86
4.2.5.	Monte-Carlo-Simulation	91

5.	Ergebnisse der betrieblichen Fallstudie unter Praxisbedingungen	96
5.1.	Ertragseffekte der Marktfrüchte durch die Gärrestedüngung.....	96
5.2.	Ökonomische Bewertung der Integration der Biogasanlage.....	97
5.3.	Monte-Carlo-Simulation	99
6.	Diskussion	101
6.1.	Methodik.....	101
6.1.1.	Modellierung auf Grundlage experimenteller Daten	101
6.1.2.	Betriebliche Fallstudie.....	103
6.2.	Ertragseffekte durch die Gärrestedüngung	104
6.3.	Ökonomische Effekte.....	107
6.4.	Betriebliche Risikobewertung.....	109
6.5.	Chancen der Biogaserzeugung im und für den ökologischen Landbau.....	111
6.6.	Empfehlungen	112
7.	Zusammenfassung	113
8.	Summary	118
9.	Literaturverzeichnis	121
10.	Anhang	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Biogasanlage im Stoffkreislauf eines viehlosen Betriebs	9
Abbildung 2: Anlageschema des Systemversuchs Viehhausen (Untersuchungsjahr 2009/10).....	27
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Biogassystems	29
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Marktfruchtsystems	30
Abbildung 5: Zusammenhang von den Investitionskosten (Biogasanlage) und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	46
Abbildung 6: Zusammenhang von verkaufter Wärmemenge bzw. Wärmepreis und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	47
Abbildung 7: Zusammenhang von den Erträgen und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	51
Abbildung 8: Zusammenhang von Marktfrucht- und Substratpreise und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	52
Abbildung 9: Zusammenhang von Agrardieselpreis und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	53
Abbildung 10: Zusammenhang von Eigenstrombedarf, Volllaststunden, Methanertrag, Wirkungsgrad (elektrisch / thermisch) und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	54
Abbildung 11: Zusammenhang von Verlusten bei Marktfrüchten bzw. Silage und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	54
Abbildung 12: Zusammenhang von Instandhaltungskosten sowie Abschreibungsdauer der Biogasanlage und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs	55
Abbildung 13: Zusammenhang von dem Strompreis (Börse) und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs.....	56
Abbildung 14: N-Kreislauf ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) des untersuchten Betriebs vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage (1999 bis 2002) (Hülsbergen und Schmid 2018).....	58
Abbildung 15: N-Kreislauf ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) des untersuchten Betriebs vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage (2014 bis 2016) (Hülsbergen und Schmid 2018).....	59
Abbildung 16: Zusammenhang von den Erträgen und Marktpreisen in Phase 2 und dem Mehr-/ Mindergewinn des Gesamtbetriebs in Phase 2	68
Abbildung 17: Zusammenhang von Instandhaltungskosten sowie Substratkosten der Biogasanlage und dem Mehr-/ Mindergewinn des Gesamtbetriebs in Phase 2	70
Abbildung 18: Zusammenhang von dem Strompreis (Zukauf) und dem Mehr-/ Mindergewinn des Gesamtbetriebs in Phase 2	71
Abbildung 19: Zusammensetzung der Substratkosten aus den Kosten für die eigenbetrieblichen Substrate und die zugekauften Substratkosten (Untersuchungszeitraum 2010-2014)	75
Abbildung 20: Unternehmergewinn der Betriebssysteme in € ha^{-1}	82
Abbildung 21: "Mehr-/ Mindergewinn" der Biogassysteme in € ha^{-1}	83
Abbildung 22: "Notwendiger" Strompreis der Biogassysteme für einen „Mehrgewinn“ in Cent kWh^{-1} (Basis: jährliche arithmetische Mittel der Ernteerträge)	85
Abbildung 23: Einfluss der Investitionskosten auf die Unternehmergewinne.....	87

Abbildung 24: Einfluss der Wärmeabsatzmenge auf die Unternehmergewinne	88
Abbildung 25: Einfluss des Wärmepreises auf die Unternehmergewinne	89
Abbildung 26: Einfluss der Ertragssteigerung auf die Unternehmergewinne	90
Abbildung 27: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Marktfruchtsystems	92
Abbildung 28: Schwankungsbereiche des Unternehmergewinns der Biogassysteme aufgrund der Simulation aller Risikoparameter (Gesamt) sowie von einzelnen Parametergruppen (Marktfrüchte/ Substrate, Biogasanlage) in € ha ⁻¹	94
Abbildung 29: "Mehr-/Mindergewinn" der untersuchten Marktfrüchte in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) in € ha ⁻¹	97
Abbildung 30: "Mehrgewinn" des Betriebs in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) in € ha ⁻¹	98
Abbildung 31: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Mehr-/ Mindergewinns in € ha ⁻¹ in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) bei Simulation der Risikofaktoren der Biogasanlage	99
Abbildung 32: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Mehr-/ Mindergewinns in € ha ⁻¹ in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) bei Simulation aller Risikofaktoren	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ertragssteigerungen durch Gärrestdüngung bei Getreide (Korn)	11
Tabelle 2: Untersuchungsrahmen (Betriebsgröße, Biogasanlagengröße, ökonomische Kennzahlen) von ökonomischen Studien zu Biogasanlagen im ökologischen Landbau	14
Tabelle 3: Zufallsvariablen von Monte-Carlo-Simulationen zum Thema Biogaserzeugung	21
Tabelle 4: Standortbedingungen der Versuchsstation Viehhausen (Castell et al. 2016) und mittlere bodenchemische Kennwerte (Reents et al. 2018)	24
Tabelle 5: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2009 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1961-1990) an der Messstation Dürnast (LFL Wetter 2018)	26
Tabelle 6: Monatliche Niederschlagsmenge [mm] im Versuchszeitraum 2009 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1961-1990) an der Messstation Dürnast (LFL Wetter 2018)	26
Tabelle 7: Fruchtfolge, Ertragsverwendung und Düngung	28
Tabelle 8: Mittlere Marktpreise für Marktfrüchte und Stroh (2010-2014)	37
Tabelle 9: Annahmen zu den Preisen von Saatgut	37
Tabelle 10: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Marktfruchtssystem, Untersuchungsjahr 2011/12).....	38
Tabelle 11: Maschinenausstattung der Modellbetriebe des Marktfruchtssystems und der Biogassysteme	39
Tabelle 12: Gesamtanbaufläche der Betriebssysteme, durchschnittlicher Substratmix der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014) und Gärrestabgabe ...	41
Tabelle 13: Eigenschaften der eingesetzten Substrate	42
Tabelle 14: Technische Parameter der Modellbiogasanlagen.....	43
Tabelle 15: Investitionen der Modellbiogasanlagen und Stromerlöse	44
Tabelle 16: Arbeitszeitbedarf, Pachtkosten des Grundstücks und Maschinenkosten in für den Betrieb der Modellbiogasanlagen.....	45
Tabelle 17: Dreiecksverteilung der Ernteerträge (t TM ha ⁻¹)	50
Tabelle 18: Dreiecksverteilungen für die Marktpreise (€ dt FM ⁻¹) von Marktfrüchten, Stroh und Silomais	51
Tabelle 19: Dreiecksverteilung von dem Preis für Agrardiesel.....	52
Tabelle 20: Dreiecksverteilte Risikofaktoren des Biogasprozesses und des Substratanbaus ...	53
Tabelle 21: Dreiecksverteilung der Instandhaltungskosten Technik.....	55
Tabelle 22: Dreiecksverteilung für die Abschreibungsdauern der Biogasanlage	55
Tabelle 23: Dreiecksverteilung vom Strompreis (Börse)	56
Tabelle 24: Standortbedingungen des Betriebs	57
Tabelle 25: Ackerflächennutzung und Produktverwendung in Phase 1 (Mittel der Jahre 2001-2003 und 2005-2006)	61
Tabelle 26: Ackerflächennutzung und Produktverwendung in Phase 2 (Mittel der Jahre 2012-2014)	62
Tabelle 27: Zwischenfruchtanbau in Phase 2 (Mittel der Jahre 2012-2014).....	62

Tabelle 28: Mittlere Anbauflächen und Erlöse der Marktfrüchte des Praxisbetriebs.....	63
Tabelle 29: Arbeitsverfahren für Winterweizen Phase 2 (beispielhafter Schlag, Untersuchungsjahr 2013/14).....	64
Tabelle 30: Parameter der Biogasanlage im Mittel des Untersuchungszeitraums.....	65
Tabelle 31: Substratmix der Praxisbiogasanlage sowie Substratkosten	66
Tabelle 32: Definition und Erklärung der betrachteten Varianten bei der ökonomischen Bewertung im Praxisbetrieb	67
Tabelle 33: Dreiecksverteilungen für die Marktpreise (€ dt ⁻¹ FM) von Marktfrüchten in Phase 2.....	69
Tabelle 34: Dreiecksverteilung der Instandhaltungskosten Technik und den Substratkosten....	70
Tabelle 35: Dreiecksverteilung vom Strompreis (Börse)	70
Tabelle 36: Mittlere Winterweizenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha ⁻¹	72
Tabelle 37: Mittlere Wintertriticaleerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha ⁻¹	73
Tabelle 38: Mittlere Winterroggenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha ⁻¹	73
Tabelle 39: Mittlere Ackerbohnenenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha ⁻¹	74
Tabelle 40: Mittlere Luzerne-Kleeerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha ⁻¹	74
Tabelle 41: Mittlere Substratkosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)	76
Tabelle 42: Mittlere Jahreskosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)	77
Tabelle 43: Mittlere Stromgestehungskosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014).....	77
Tabelle 44: Wärme- und Stromerlöse der Modellbiogasanlagen.....	78
Tabelle 45: Mittlere Gesamtkosten, Erlöse und Unternehmergewinne der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)	78
Tabelle 46: Mittlere Erlöse, Kosten und Unternehmergewinne der einzelnen Fruchtarten und des Betriebszweigs Ackerbau in € ha ⁻¹ des Marktfruchtensystems in den Untersuchungsjahren 2010-2014.....	79
Tabelle 47: Mittlere Erlöse, Kosten und Unternehmergewinne der einzelnen Fruchtarten und des Betriebszweigs Ackerbau in € ha ⁻¹ des Biogassystems über die Untersuchungsjahre 2010-2014.....	80
Tabelle 48: Unternehmergewinn der Betriebszweige Ackerbau und Biogasanlage sowie des Gesamtbetriebs in € ha ⁻¹ (Basis: arithmetische Mittel der Ernteerträge über die Untersuchungsjahre 2010-2014)	81
Tabelle 49: "Notwendiger" Strompreis im Mittel über die Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 und Erlös des verkauften Stroms mit EEG 2014 bzw. EEG 2017	84
Tabelle 50: Annahmen zu Ernteerträgen im Biogassystem für die Sensitivitätsanalyse.....	90
Tabelle 51: Notwendiger Ertragseffekt der Marktfrüchte zum Erreichen eines Unternehmergewinns und eines Mehrgewinns im Vergleich zum Marktfruchtensystem	91

Tabelle 52: Wahrscheinlichkeit eines Unternehmergewinns der Biogassysteme und des Marktfrucht-systems (keine Berücksichtigung von landwirtschaftlichen Subventionen)	95
Tabelle 53: Wahrscheinlichkeit eines "Mehrgewinns" der Biogassysteme im Vergleich zum Marktfrucht-system	95
Tabelle 54: Durchschnittlich gemessene Erträge in dt FM ha ⁻¹ und Ertragsverhältnis im Praxisbetrieb.....	96
Tabelle 55: Ökonomische Ergebnisse des Betriebs in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014)	98

Anlagenverzeichnis (Abbildungen)

Abbildung A 1: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 1.....	142
Abbildung A 2: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 2.....	142
Abbildung A 3: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 3.....	142
Abbildung A 4: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 4.....	143
Abbildung A 5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 5.....	143
Abbildung A 6: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 6.....	143
Abbildung A 7: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 7.....	144
Abbildung A 8: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 8.....	144
Abbildung A 9: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha ⁻¹ des Biogassystems 9 (extern).....	144

Anlagenverzeichnis (Tabellen)

Tabelle A 1: Arbeitsverfahren für Luzerne-Klee gras (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	131
Tabelle A 2: Arbeitsverfahren für Luzerne-Klee gras (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	132
Tabelle A 3: Arbeitsverfahren für Winterweizen (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	132
Tabelle A 4: Arbeitsverfahren für Winterweizen (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	133
Tabelle A 5: Arbeitsverfahren für Wintertriticale (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	133
Tabelle A 6: Arbeitsverfahren für Wintertriticale (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	134
Tabelle A 7: Arbeitsverfahren für Zwischenfrucht und Ackerbohne (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	134
Tabelle A 8: Arbeitsverfahren für Zwischenfrucht und Ackerbohne (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	135
Tabelle A 9: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	135
Tabelle A 10: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)	136
Tabelle A 11: Arbeitsverfahren für Winterweizen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	136
Tabelle A 12: Arbeitsverfahren für Winterroggen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	137
Tabelle A 13: Arbeitsverfahren für Wintertriticale in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	137
Tabelle A 14: Arbeitsverfahren für Dinkel in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	138
Tabelle A 15: Arbeitsverfahren für Wintergerste in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	138
Tabelle A 16: Arbeitsverfahren für Hafer in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	139
Tabelle A 17: Arbeitsverfahren für Sommergerste in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	139
Tabelle A 18: Arbeitsverfahren für Erbsen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	140
Tabelle A 19: Arbeitsverfahren für Ackerbohnen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	140
Tabelle A 20: Arbeitsverfahren für Klee gras in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	141
Tabelle A 21: Arbeitsverfahren für Ganzpflanzensilage in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)	141

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AKh	Arbeitskraftstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLS	Bayerisches Landesamt für Statistik
C	Kohlenstoff
DE	Dungeinheit
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
dt	Dezitonne
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz EG Europäische Gemeinschaft
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
GLM	grass-legume mixture
GPS	Ganzpflanzensilage
GVO	gentechnisch veränderten Organismen
ha	Hektar
H_0	Nullhypothese
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
KULAP	Bayerisches Kulturlandschaftsprogramm
$kW_{(el/th)}$	Kilowatt (elektrisch / thermisch)
kWh	Kilowattstunde
LFL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LKG	Luzerne-Klee gras
mm	Millimeter
$MWh_{(el/th)}$	Megawattstunde (elektrisch / thermisch)
m^3	Kubikmeter
n	Anzahl
N	Stickstoff
Nm^3	Normkubikmeter
oTM	organische Trockenmasse
p	Signifikanzwert
P_2O_5	Phosphat
StMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
t	Tonne
TM	Trockenmasse
UG	Unternehmergeinn
Vbh	Vollbenutzungsstunden

1. Einleitung und Ziel der Arbeit

Die Endlichkeit fossiler Energien und die notwendige Reduzierung der Treibhausgasemissionen machen die Nutzung und den weiteren Ausbau regenerativer Energien notwendig. In Deutschland wird der Bedarf an Bioenergie durch den Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 verstärkt, wenn die Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Bioenergie ist im Energiesystem (Strom und Wärme) wichtig, um eine nachhaltige Energieversorgung zu erreichen (z.B. Cornelissen et al. 2012, Deng et al. 2011). Die energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen bietet zusätzliche Einkommensperspektiven für landwirtschaftliche Betriebe und die Entwicklung ländlicher Räume. Durch die Bioenergieerzeugung können Arbeitsplätze geschaffen und regionale Wertschöpfung generiert werden (Bioökonomierat 2007).

Neben den positiven ökologischen und ökonomischen Effekten der Bioenergieerzeugung sind aber auch negative Auswirkungen zu beachten. Intensive Bioenergiesysteme werden oftmals wegen ihres hohen Einsatzes an Pflanzenschutzmitteln und synthetischen Düngern bei der Biomasseerzeugung kritisiert (Altieri 2009). Landnutzungsänderungen, Monokulturen, der Verlust der Biodiversität, verstärkte Bodenerosion sowie der Abbau organischer Bodensubstanz und die Minderung der Bodenfruchtbarkeit sind weitere Kritikpunkte an weltweit bedeutenden Bioenergielinien (Bioökonomierat 2012, Leopoldina 2012, Tilmann et al. 2009, Rhigelato und Spracklen 2007).

Die energetische Nutzung von Biomasse konkurriert zudem mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie mit anderen Landnutzungsarten wie z.B. Naturschutzflächen oder Waldflächen (Lin und Hülsbergen 2017, Tuomisto et al. 2012). Die Knappheit der Ressource Boden wird deutlich durch Pachtpreissteigerungen, steigende Lebensmittelpreise und beispielsweise in afrikanischen Ländern auch durch Flächenenteignung; hierbei gelten intensive Bioenergiesysteme als Mitverursacher (Amigun et al. 2011). In der Kritik steht die Bioenergie auch immer wieder aufgrund der fraglichen bzw. unzureichenden Einsparung von Treibhausgasen bei der Bioenergieproduktion. In der Literatur finden sich sehr unterschiedliche Aussagen zur Klimawirkung von Bioenergielinien, insbesondere aufgrund verschiedener Bilanzierungsmethoden und Systemgrenzen (Leopoldina 2012, Crutzen et al. 2008, Ragauskas et al. 2006), aber auch aufgrund der Vielfalt unterschiedlichster Biomasseerzeugung und Bioenergielinien in verschiedenen Boden-/ Klimaräumen. Im Zusammenhang mit der Treibhausgasbilanz von Bioenergielinien werden vor allem direkte und indirekte Landnutzungsänderungen von naturnahen Flächen wegen der Freisetzung von Treibhausgasen kritisiert. Bei Nutzungsänderungen von Flächen mit hohen Kohlenstoffvorräten (z.B. Wälder, Feuchtgebiete, Grünland) entstehen sehr hohe Treibhausgasemissionen, die den Klimawandel verschärfen können (Leopoldina 2012, Rhigelato und Spracklen 2007).

Neben einer verstärkten Bioenergienutzung wird auch der ökologische Landbau überwiegend als „klimafreundliches“ System bewertet, das zu einer wirksamen flächenbezogenen Treibhausgasminderung beitragen kann (z.B. Muller und Aubert 2014). Vor allem die Restriktionen zum Einsatz von synthetischen Mineraldüngern und Pflanzenschutzmitteln der ökologischen „Low-Input-Systeme“ sowie der Aufbau von Bodenkohlenstoff (C-Sequestrierung) durch leguminosenbasierte Fruchtfolgen des ökologischen Landbaus werden als Gründe für geringere Treibhausgasemissionen bei der Bewirtschaftung im Vergleich zum konventionellen Landbau genannt (z.B. Muller und Aubert 2014, Lynch et al. 2014, Lynch et al. 2011, Alluvione et al.

2010, Petersen et al. 2006). Allerdings sind die Fruchtarternerträge im ökologischen im Vergleich zum konventionellen Landbau zum Teil deutlich niedriger (z.B. Seufert et al. 2012), so dass die produktbezogenen Treibhausgasemissionen ökologischer und konventioneller Anbausysteme etwa auf einem Niveau liegen (WBA 2016). Nachhaltige Ertragssteigerungen im ökologischen Landbau (d.h. höhere Erträge ohne zusätzlichen Input fossiler Energie, ohne chemisch-synthetische Dünge- und Pflanzenschutzmittel) könnten eine Strategie sein, um die Treibhausgasemissionen nicht nur flächen-, sondern auch produktbezogen zu reduzieren. Das Konzept der „*sustainable intensification*“ wird weltweit als ein Lösungsansatz angesehen (z.B. Garnett et al. 2013, Niggli et al. 2008), um die Erträge in Low-Input-Systemen, wie beispielsweise im ökologischen Landbau, zu steigern (Ponisio et al. 2015, Bellon und Penvern 2014, Seufert et al. 2012, Maeder et al. 2002).

Die Verbindung beider Konzepte „Bioenergieerzeugung“ und „*sustainable intensification*“ wurde unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus noch nicht erforscht. Bisher spielt die Bioenergieproduktion im ökologischen Landbau eine eher untergeordnete Rolle, obwohl ökologisch wirtschaftende Betriebe mit Kleinst-Biogasanlagen zur energetischen Eigenversorgung sogar zu den Pionieren der Biogasproduktion zählen (Anspach 2010). Die Anbaubedingungen im ökologischen Landbau eignen sich aufgrund der systembedingten Restriktionen und des begrenzten Ertragspotenzials nicht für intensive Bioenergiesysteme (z.B. Biodieselerzeugung aus Raps, Biogaserzeugung aus Mais). Als Bioenergielinien haben sich in Deutschland neben den Agroforstsystemen und Kurzumtriebsplantagen (Nutzung von Festbrennstoffen, Holzhackschnitzel, Holzvergasung) nur Biogassysteme auf der Basis von Klee gras, Gülle und Stalldung im ökologischen Landbau etabliert (Meyer und Priefer 2012).

Die staatliche Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat seit 2004 zu einem „Boom“ bei der Errichtung von Biogasanlagen geführt, wovon auch die Biogaserzeugung in Ökobetrieben profitiert hat. Vor allem die Novellierungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes in den Jahren 2014 und 2017 haben diesen Ausbau durch eine geringere garantierte Förderung gebremst, nur kleine Gülleanlagen (bis 75 kW_e) profitieren noch von einer hohen garantierten Einspeisevergütung. In Deutschland gibt es mehr als 150 Biogasanlagen auf ökologischen Betrieben (Siegmeier et al. 2013), die häufig auch als Gemeinschaftsanlagen überbetrieblich genutzt werden. Zudem sind Ökobetriebe als Substraterzeuger und Abnehmer von Gärresten auch an konventionellen Biogasanlagen beteiligt.

Die Biogastechnik und -produktion im ökologischen Landbau wird jedoch auch innerhalb der Organisationen und Verbände des ökologischen Landbaus kontrovers diskutiert (Meyer und Priefer 2012). Der am stärksten kritisierte Punkt ist der Einsatz von konventionellen Substraten. Gründe für die Nutzung konventionell erzeugter Biogassubstrate können unzureichende Betriebsgrößen und Flächenausstattung entsprechend der Biogasanlagengröße, fehlende Wirtschaftsdünger sowie eine kostengünstigere Substratproduktion sein. Oft ist bei ökologischen Biogasanlagen unklar, ob ein Zwang zum Zukauf besteht, z.B. durch Ernteauffälle oder Fehlplanung der Anlage, oder eine Ko-Vergärung von konventionellen Substraten aus ökonomischen Beweggründen geplant war (Blumenstein et al. 2014). Der Substratzukauf kann auch dem Nährstoffimport bzw. der Erhöhung des Düngenniveaus im Betrieb - im Rahmen der Richtlinien der EU bzw. der Anbauverbände - dienen (Stinner et al. 2003).

Der Einsatz konventioneller Substrate widerspricht dem Prinzip des geschlossenen Betriebskreislaufs im ökologischen Landbau und mindert die Glaubwürdigkeit der ökologischen Land-

wirtschaft im Allgemeinen. Auch die „Tank oder Teller“ Diskussion wird in diesem Zusammenhang geführt. Nach den Prinzipien des ökologischen Landbaus muss der Fokus der landwirtschaftlichen Erzeugung auf der Nahrungsmittelbereitstellung liegen. Es wird befürchtet, dass eine weitere starke politische Unterstützung der Biogasproduktion zu einem verschärften Wettbewerb um Flächen zwischen ökologisch erzeugten Lebensmitteln und (konventionellen) Biogassubstraten führen könnte. Der ökologische Landbau ist bei den Pachtpreisen meist nicht konkurrenzfähig zum Substratanbau für Biogasanlagen (Meyer und Priefer 2012). Weitere Bedenken hinsichtlich der Biogasanlagen im ökologischen Landbau betreffen die Gärrestdüngung. Der Betrieb von Biogasanlagen in ökologischen Betrieben führt zu einer Intensivierung betrieblicher und überbetrieblicher Stoffflüsse (Hülsbergen 2007), wie es zuvor im Ökolandbau nicht möglich war. Der Gärrest enthält einen hohen Anteil an direkt pflanzenverfügbarem, jedoch auch verlustgefährdetem Stickstoff (Blumenstein et al. 2014, Wellinger et al. 1991). Gegenüber dem ursprünglichen Ziel des ökologischen Anbaus, der indirekten Ernährung der Pflanzen mit organisch gebundenem Stickstoff, stellt das Ausbringen von Gärresten einen Wechsel in der Düngestrategie dar.

Die Chancen und Potenziale der Biogasproduktion im ökologischen Landbau werden erst seit wenigen Jahren erforscht. In Feldversuchen hat sich gezeigt, dass die Gärrestdüngung positive Ertrags- und Qualitätseffekte bewirken kann (z.B. Levin et al. 2015, Reents et al. 2011, Möller et al. 2006a, Möller et al. 2006b). Auch Praxisbetriebe haben bei Befragungen positive Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung bestätigt sowie teilweise ökonomische Vorteile für den Gesamtbetrieb durch die Biogasanlage genannt (Tersbøl und Malm 2014). In einigen Arbeiten wurden Wirkungen von Biogasanlagen in viehlosen ökologischen Marktfruchtbetrieben untersucht, aber noch nicht abschließend bewertet. In ökologischen Marktfruchtbetrieben ohne Tierhaltung bzw. Biogasanlage kommt es häufig zu negativen Nährstoffbilanzsalden, zur Verminderung von Nährstoffvorräten der Böden mit negativen Effekten auf die Ertragsleistungen und Produktqualität (z. B. Schneider et al. 2013, Schulz et al. 2013, Schneider et al. 2012, Möller et al. 2006b).

Seit den achtziger Jahren steigt mit dem Trend zur Spezialisierung auch im ökologischen Landbau die Bedeutung von viehlosen Marktfruchtbetrieben (Schulz et al. 2013, Schmidt 2004). Nach Schulz et al. (2013) kann davon ausgegangen werden, dass mittlerweile circa 25 % der Biobetriebe in Deutschland viehlos bewirtschaftet werden. In einigen Regionen Bayerns, z.B. im bayerischen Tertiärhügelland und den Gäuregionen, wirtschaften sogar inzwischen 30 bis über 40 % der Ökobetriebe als Marktfruchtbetriebe (Vockinger 2013). Mit einer Spezialisierung können durch die Verringerung der Anzahl an Produktionsverfahren, Betriebszweigen oder Produkten Skaleneffekte in Produktion und Vermarktung realisiert werden und technische Möglichkeiten besser genutzt werden. Spezialisierung kann allerdings auch eine Verringerung der betrieblichen Flexibilität sowie eine Erhöhung des betrieblichen Risikos bedeuten (Zander et al. 2008). Mit der Spezialisierung und Umwandlung von ökologisch wirtschaftenden Gemischtbetrieben zu viehlosen Marktfruchtbetrieben entfällt die Futternutzung von (Luzerne-)Klee gras und die Erzeugung betriebseigener Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung zur gezielten (zeitlichen und örtlichen) Ausbringung zu den nicht-legumen Feldfrüchten. Es stellt sich die Frage, ob Marktfruchtbetriebe dauerhaft eine ausreichende Nährstoff- und Humusversorgung für stabile Erträge gewährleisten können oder eine negative Stickstoffbilanz und abnehmende Bodenfruchtbarkeit befürchten müssen (Hülsbergen 2015). Mit dem Betrieb einer Biogasanlage in einem Marktfruchtbetrieb können nicht nur Erlöse aus dem Energieverkauf generiert werden, sondern es entsteht auch wieder eine Nutzungsmöglichkeit für

legume Feldfutterpflanzen. Positive Ertrags- und Qualitätseffekte bei nicht-legumen Marktfrüchten durch die gezielte Gärrestdüngung sind zu erwarten (u.a. Levin et al. 2015, Reents et al. 2011, Stinner et al. 2005). Angesichts dieser Synergieeffekte zwischen der Nahrungsmittel- und der Energieproduktion sowie der steigenden Nachfrage nach ökologisch produzierten Lebensmitteln (BMEL 2014) bei begrenzten Ressourcen (Boden, Wasser, Energie, Nährstoffe) sollte der Ökolandbau die Möglichkeiten zum weiteren Ausbau der Biogasproduktion prüfen.

Bestehende ökonomische Analysen von Biogassystemen sind meist auf die Biogasanlagen bzw. die Biogasproduktion fokussiert, ohne die gesamtbetrieblichen Effekte zu untersuchen. Es existieren wenige ökonomische Analysen zu Biogassystemen im ökologischen Landbau (z.B. Blumenstein et al. 2015b, Anspach 2010, Anspach und Möller 2007, Jäger et al. 2007, Michel et al. 2006b), die den Gesamtbetrieb betrachten. Der Schwerpunkt der Analysen lag bisher auf größeren Biogasanlagen, eingebunden in Betrieben mit einer großen Anbaufläche (100 bis 800 ha). Zu den ökonomischen Effekten der Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen ökologischen Marktfruchtbetrieb bestehen in der Literatur bisher große Unstimmigkeiten. Vor allem die Arbeiten von Michel et al. (2006b) und Blumenstein et al. (2015a) zeigen gegensätzliche ökonomische Auswirkungen, wobei die Ertragseffekte in diesen beiden Arbeiten geschätzt bzw. modelliert wurden. Deutlich wird in beiden Studien, dass das Ausmaß der Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung eine entscheidende Rolle für das ökonomische Ergebnis auf der Ebene des Gesamtbetriebes spielt. Es besteht folglich weiterer Forschungsbedarf zu Biogasanlagen in ökologisch wirtschaftenden Betrieben: Die Ertragseffekte von Gärresten bzw. Biogassystemen auf Fruchtarten-/ Fruchtfolgeebene sind bisher nur unzureichend erforscht. Insbesondere fehlen experimentelle Langzeitergebnisse sowie Praxisdaten, die für ökonomische Bewertungen verwendet werden können. Außerdem müssen die Untersuchungen auch für Betriebe mit einer geringeren Flächenausstattung durchgeführt werden.

Hier setzt diese Arbeit an: Sie soll dazu beitragen, die Ertragseffekte sowie die ökonomischen Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen ökologischen Marktfruchtbetrieb zuverlässig zu quantifizieren. Nur so kann bewertet werden, ob der Ökolandbau künftig in der Praxis nachhaltige Ertrags- und Rentabilitätssteigerungen mit Hilfe einer Biogasanlage erreichen kann. Der entscheidende Punkt dabei wird möglicherweise der Ertragseffekt bei den Marktfrüchten durch die Gärrestdüngung sein. Aus diesem Grund stützt sich diese Arbeit auf Ergebnisse aus Feldexperimenten (gemessene Ertragseffekte bei Gärrestdüngung im Vergleich zum ökologischen Marktfruchtbau) und auf Ertragsdaten aus der landwirtschaftlichen Praxis. Die ökonomische Bewertung erfolgt auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen (Fruchtart, Fruchtfolge bzw. Ackerbau, Biogasanlage, Betrieb) mit Hilfe von Kalkulationsdaten bzw. weiteren betrieblichen Daten.

Die Versuchsdaten stammen aus einem Dauerfeldversuch am Standort Viehhausen der Technischen Universität München. Dort werden die Langzeitwirkungen ökologischer und konventioneller Anbau- und Betriebssysteme auf Boden, Pflanzen und Umwelt untersucht. Es handelt sich um einen Systemversuch, bei dem die Fruchtfolgen, die Ertragsverwendung (Ernte, Stroh- und Gründüngung) sowie die Menge und Qualität der Dünger systemkonform sind. In dieser Arbeit werden die Ertragseffekte und ökonomische Leistungen von zwei Anbausystemen des Versuchs mit gleicher Fruchtfolge analysiert. Das Referenzsystem (Marktfruchtssystem ohne Biogasanlage) wird mit dem Biogassystem (Marktfruchtssystem mit Biogasanlage) verglichen, um die Ertragseffekte durch die Integration einer Biogasanlage zu bestimmen. Die Versuchsdaten fließen zusammen mit Kalkulationsdaten in ein ökonomisches Modell. Im Vergleich zu

anderen wissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Thema (z.B. Blumenstein et al. 2015b, Anspach 2010, Jäger et al. 2007, Michel et al. 2006b) basiert in dieser Arbeit die Bewertung der ökonomischen Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in ein ökologisches Betriebssystem auf gemessenen Ertragseffekten und nicht auf geschätzten oder modellierten Ertragseffekten.

Aufgrund der vielfältigen innerbetrieblichen Systemwirkungen eines ökologischen Betriebs werden bei der ökonomischen Bewertung zwar zunächst die einzelnen Fruchtarten, der Ackerbau und die Biogasanlage einzeln bewertet, jedoch in einem gesamtbetrieblichen Modellansatz zusammengefasst. Für die ökonomische Bewertung der Biogasanlage und damit des Gesamtsystems werden die aktuellen Förderbedingungen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (2017) verwendet. Viele vorherige Arbeiten basieren auf früheren EEG-Fassungen (z.B. Blumenstein et al. 2015b, Anspach 2010, Jäger et al. 2007, Michel et al. 2006b) und können damit nicht mehr zur Bewertung der aktuellen Situation verwendet werden.

Als ökonomische Kennzahlen in dieser Arbeit dienen insbesondere der Unternehmervergewinn¹ des Gesamtbetriebs und der „Mehr-/ Minderertrag“ durch die Integration einer Biogasanlage. Die derzeitigen Rahmenbedingungen in Deutschland bei der Förderung der Stromproduktion aus Biogas, durch die aktuelle Fassung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, werden dabei im Modell abgebildet. Als weitere Kennzahlen werden die Stromgestehungskosten sowie der „notwendige“ Strompreis ermittelt, der nötig wäre, damit die Integration einer Biogasanlage positive ökonomische Effekte mit sich bringt.

Auf Basis des EXCEL-Planungsmodells wird in dieser Arbeit eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Für die Analyse des Systemversuchs Viehhausen stellt sich die Frage, wie sich die Integration der Biogasanlage - als eine Diversifizierung im Betrieb - auf das gesamtbetriebliche Risiko bei Berücksichtigung der innerbetrieblichen Effekte auswirkt.

Die Untersuchung in einem ökologischen Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage wird als Fallstudie unter Praxisbedingungen durchgeführt. Die Basis hierfür bilden Ertrags- und Anbaudaten eines ökologischen Praxisbetriebs vor und nach der Inbetriebnahme einer Biogasanlage. Auf Basis der Ertragseffekte werden in dieser Arbeit die ökonomischen Auswirkungen der Biogasanlage untersucht. Auch bei diesem Forschungsansatz werden zunächst die „Mehr-/ Mindererträge“ der einzelnen Fruchtarten ermittelt und darauf aufbauend die „Mehr-/ Mindererträge“ der Fruchtfolge bzw. des Ackerbaus sowie der Biogasanlage und des Gesamtbetriebs berechnet. Ergänzt wird diese Fallstudie durch eine Monte-Carlo-Simulation, für die Risikofaktoren identifiziert werden, die auch noch einige Jahre nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage bestehen.

Beide Forschungsansätze sollen sich in ihrer Aussage ergänzen. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit sollen Schlussfolgerungen hinsichtlich der künftigen Entwicklung von Biogasanlagen in ökologisch wirtschaftenden Betrieben gezogen und Empfehlungen an die Politik zur Förderung von Biogasanlagen im ökologischen Landbau abgeleitet werden.

¹ Der Unternehmervergewinn stellt den (Unternehmens-)gewinn abzüglich der (kalkulatorischen) Faktor-kosten Pacht, Lohn, Zins dar (Mußhoff und Hirschauer 2016).

2. Stand des Wissens

2.1. Viehlose Anbausysteme im ökologischen Landbau

Bereits Anfang und Mitte des 20. Jahrhunderts untersuchten deutsche Agrarökonominnen die Funktion der Tierhaltung in einem landwirtschaftlichen Betrieb unter dem Aspekt der Nährstoffkreisläufe, der Bodenfruchtbarkeit und der Ertragswirkungen. Brinkmann (1922) bewertete die Viehhaltung als essentiell für einen landwirtschaftlichen Betrieb. Die Landwirtschaft bezeichnete er als eine „(...) *innige Vereinigung von Bodennutzung und Viehwirtschaft* (...)“ (Brinkmann 1922, S. 100). Jahrzehnte später beschäftigte sich Andreae (1964, S. 147) unter dem Eindruck einer sich abzeichnenden Spezialisierung der deutschen Landwirtschaft bereits mit der Frage: Kann „(...) *die bodenbefeuchtende Funktion der Nutztierhaltung entbehrt* (...)“ werden? Andreae (1964) sowie auch Steinhauser (1963) betonten in diesem Zusammenhang die starke Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Betriebssysteme von Standort und Boden. Die enge Verbindung von Pflanzenbau und Tierhaltung unter Nutzung betrieblicher Stoffkreisläufe ergab sich vor allem aus den damals noch geringen Einsatzmengen mineralischer Düngemittel. Gemessen an dem inzwischen im konventionellen Landbau erreichten Düngungsniveau handelte sich damals überwiegend um „Low-Input-Systeme“. Heute wird vor allem im ökologischen Landbau noch die Bedeutung einer optimalen Verbindung von Pflanzenbau und Tierhaltung betont, um eine langfristige Humus- und Nährstoffversorgung der Böden zu gewährleisten, die Robustheit und Belastbarkeit von Tieren und Pflanzen zu verbessern und eine Risikominderung durch eine vielseitige Produktion zu erreichen (z.B. IFOAM 2017, Niggli 2014). Allerdings sollte auch in konventionellen Systemen in Bezug auf die Nährstoffversorgung über eine Re-Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung nachgedacht werden. Der lokal und regional sehr unterschiedliche Anfall von Wirtschaftsdüngern und Gärresten aus Biogasanlagen stellt aus Umwelt- und Ressourcenschutzgründen ein großes Problem dar. Während mit abnehmenden Nährstoffgehalten in Marktfruchtregionen gerechnet werden muss, kommt es in Veredelungsgebieten (mit hoher Viehdichte) teilweise zu extremen Nährstoffüberschüssen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen durch organische Düngung (z.B. Wiesler et al. 2016).

Die Entwicklung ökologischer Anbausysteme orientierte sich lange Zeit am Idealbild eines Gemischtbetriebs mit weitgehend geschlossenen Stoffkreisläufen. Betriebliche Nährstoffkreisläufe bilden hierbei die Grundlage für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und die Ertragsbildung. Dies entspricht auch den aktuellen Prinzipien des ökologischen Landbaus, der „*auf lebendigen Ökosystemen und Kreisläufen aufbauen, mit diesen arbeiten, sie nachahmen und stärken*“ und „*in einer vorsorgenden und verantwortungsvollen Weise betrieben werden*“ soll, „*um die Gesundheit und das Wohlbefinden der jetzigen und folgenden Generationen zu bewahren und um die Umwelt zu schützen*“ (IFOAM 2017).

Doch ungeachtet unterschiedlicher Einschätzungen zur Bedeutung der Tierhaltung für ökologische Anbausysteme ist es eine Tatsache, dass mittlerweile ein bemerkenswerter Teil der ökologisch wirtschaftenden Betriebe in Deutschland viehlos betrieben wird (Schulz et al. 2013). Die Gründe für eine Spezialisierung zu einem Marktfruchtbetrieb sind in der Praxis vielfältig. Hierzu zählen Preis- und Kostenverhältnisse, aber auch der hohe Investitions- und Arbeitskräftebedarf im Bereich der Tierhaltung sowie die Neigungen und Fähigkeiten der Betriebsleiter. Allerdings steigt mit einer Spezialisierung auch die Abhängigkeit der Umsatzerlöse von einem bzw. wenigen Betriebszweigen. Im Falle eines viehlosen Marktfruchtbetriebes ist es vor allem die Abhängigkeit von den Markt- bzw. Preisentwicklungen der Marktfrüchte.

Viehlose ökologisch wirtschaftende Betriebe stehen bezüglich ihrer Nährstoffversorgung vor Problemen. Die Nutzung legumer Futterpflanzen ist in viehlosen Anbausystemen zumeist nicht gegeben; zeitlich und räumlich flexibel einsetzbare betriebseigene Wirtschaftsdünger stehen nicht zur Verfügung. Der Zukauf von Düngemitteln ist im ökologischen Landbau stark eingeschränkt und eine Zufuhr von organischen Handelsdüngern ist für den großflächigen Anbau zu kostenintensiv. Der Nährstoffexport beim Verkauf der pflanzlichen Produkte verringert die Rückführung von Nährstoffen auf die Anbauflächen im Vergleich zu viehhaltenden Anbausystemen. Als ein Hauptproblem viehloser ökologischer Anbausysteme wird die Verfügbarkeit von Stickstoff gesehen (David et al. 2005a, David et al. 2005b, Bulson et al. 1996), was unter anderem die Erzeugung von Weizen mit hohen Erträgen und guter Backqualität erschwert (Baresel et al. 2008). Doch auch die Versorgung mit allen anderen Mikro- und Makronährstoffen kann zu einem ertragsbegrenzenden Faktor werden. Möller et al. (2006b) betonen beispielsweise, dass bei viehlosen Marktfruchtssystemen neben Stickstoff zunehmend auch Phosphor nicht immer zum Zeitpunkt des Bedarfs ausreichend im Boden pflanzenverfügbar ist. Mittel- und langfristig wird es aus ökologischer und pflanzenbaulicher Sicht notwendig sein, dass sich der ökologische Landbau mit nachhaltigen Konzepten zum Ausgleich für Nährstoffexporte beschäftigt (Möller et al. 2006a).

Wegen fehlender inner- oder überbetrieblicher Verwertungsmöglichkeit legumer Futterpflanzen in viehlosen bzw. vieharmen ökologisch wirtschaftenden Betrieben werden teils mehr- bzw. überjährige Leguminosen nicht oder nur im eingeschränkten Umfang angebaut. Der Leguminosenanbau stellt jedoch die Hauptgröße für den Stickstoffinput in einen ökologisch wirtschaftenden Betrieb dar (Loges et al. 2000). Auch die Humusproduktion durch Blatt- und Wurzelmasse spricht für den Anbau von Leguminosen-Gras-Gemengen im ökologischen Landbau. Neben der Stickstofffixierung und der Humusproduktionsleistung stellen unter anderem Unkrautunterdrückung durch Beschattung, Bodenlockerung und die Mobilisation von Nährstoffen aus tieferen Schichten (z.B. Überführung von Phosphor aus den Bodenvorräten in pflanzenverfügbare Form) positive Eigenschaften des Leguminosen-Gras-Gemenges dar (Lin et al. 2016, Freyer 2005, Heuwinkel et al. 2005, Hülsbergen 2003).

Werden Leguminosen-Gras-Gemenge wegen fehlender Verwertungsmöglichkeiten nicht geerntet sondern gemulcht, sinkt die Stickstofffixierung im Vergleich zu geernteten Beständen. Die Verminderung der Stickstofffixierung begründen Heuwinkel et al. (2005) mit dem Rückgang des Leguminosenanteils im Gemenge, der Ertragsminderung sowie der geringeren N₂-Fixieraktivität, ausgedrückt durch den Anteil des Luftstickstoffes an der gesamten Stickstoffaufnahme der Leguminosen. Heuwinkel et al. (2005) zeigten auf Basis der Versuchsergebnisse eines Dauerversuchs am Standort Viehhausen die Unterschiede der Stickstoffflüsse bei Schnittnutzung und organischer Düngung (Rindergülle) im Vergleich zum Mulchen von Klee-gras. Bei der Schnittnutzung konnten ca. 300 kg N ha⁻¹ a⁻¹ mit dem Erntegut als N-Gewinn abgefahren werden, während das Mulchen zu einer Verminderung des N-Gewinns um 1/3 auf ca. 200 kg N ha⁻¹ a⁻¹ führte. Die Mineralisierung der im Mulch enthaltenen Nährstoffe erfolgt nur teilweise entsprechend dem Bedarf der Ackerfrüchte in der Fruchtfolge. Häufig kommt es bereits im Herbst / Winter nach Klee-grasumbruch zu einer deutlichen N-Mineralisierung und Nitratbildung, wodurch die Gefahr von Nährstoffverlusten aus dem System steigt, in Form von Nitratreinträgen ins Grundwasser bzw. als Lachgas- oder Ammoniakemissionen in die Atmosphäre (z.B. Stinner et al. 2008, Båth et al. 2006, Heuwinkel et al. 2005, Möller 2002).

Bei viehlosen ökologischen Anbausystemen zeigten sich in verschiedenen Versuchen überwiegend unterdurchschnittliche Erträge bei nicht-legumen Marktfrüchten (Castell et al. 2016,

Schneider et al. 2013, Schulz et al. 2013, Tamarcaz und Clere 2013, Schneider et al. 2012). Besonders stark sind die negativen Ertragseffekte in Fruchtfolgen ohne Grünbrache (Schulz et al. 2013), auch wenn Körnerleguminosen angebaut werden (Schneider et al. 2012). Am Versuchsstandort Viehhausen zeigten Castell et al. (2016) und Schneider et al. (2013) in einem langfristigen Fruchtfolgeversuch (Anlage des Versuchs im Herbst 1997) den Einfluss der Fruchtfolgen bzw. des Betriebssystems (viehlos / viehhaltend) auf den Ertrag und die Qualität von Winterweizen. Viehlose Systeme waren dabei den viehhaltenden Systemen nicht grundsätzlich unterlegen, mit Ausnahme der viehlosen Fruchtfolge, welche anstatt Klee gras eine Körnerleguminose enthält. Körnerleguminose anstatt gemulchtem Klee gras führte nicht nur zu geringen Erträgen, sondern auch zu schlecht ausgeprägten Qualitätseigenschaften des nachfolgenden Winterweizens (Castell et al. 2016, Schneider et al. 2013). Der Zeitpunkt der Verfügbarkeit sowie die Menge an Stickstoff waren im Versuch entscheidend für früh oder spät festgelegte Ertrags- und Qualitätsmerkmale (Castell et al. 2016).

Fazit: Aus den Untersuchungsergebnissen in der Literatur ist zu schlussfolgern, dass die Nährstoffversorgung in ökologischen Marktfruchtbetrieben aufgrund der hohen Nährstoffexporte und der limitierten Nährstoffimporte in die Betriebssysteme langfristig nicht gesichert ist. Dies führt zu sinkenden Nährstoffgehalten im Boden, zur Ertragsstagnation sowie gegebenenfalls zu Qualitätsverschlechterung bei den Marktfrüchten. Die Lösung des Nährstoffproblems von ökologischen Marktfruchtbetrieben ist daher von herausragender Bedeutung für die Weiterentwicklung des ökologischen Landbaus. Es muss nach neuen, innovativen Ansätzen der Nährstoffversorgung gesucht werden.

2.2. Systemwirkungen der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau

In ökologischen Betrieben mit mehreren Betriebszweigen ist es aufgrund der vielfältigen Wechselbeziehungen schwierig, einzelne Betriebszweige isoliert zu bewerten, z.B. hinsichtlich ihrer ökonomischen Effekte. Der ökologische Betrieb kann oftmals nur als Ganzes mit seinen vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen den Betriebszweigen gesehen werden. Bezogen auf die Biogaserzeugung im ökologischen Landbau bedeutet dies, dass neben der Strom- und Wärmeerzeugung zahlreiche Interaktionen und Systemwirkungen zu beachten sind. In der Literatur sind vielfältige Systemwirkungen beschrieben, die durch die Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen bzw. vieharmen ökologischen Betrieb auftreten können. Diese werden im Folgenden dargestellt.

2.2.1. Wirkung auf betriebliche Stoffkreisläufe

Insbesondere in viehschwachen oder viehlosen Betrieben kann eine Biogasanlage Teilfunktionen der Tierhaltung übernehmen. Stoffkreisläufe können teilweise geschlossen und betriebliche Stoffströme besser gesteuert werden. Im Vergleich zu viehhaltenden Systemen, bei denen Marktprodukte erzeugt werden und relevante Nährstoffmengen mit diesen Produkten verkauft werden, verbleiben bei der Biogasanlage nahezu alle Mineralstoffe im Kreislauf. Auch eine Intensivierung der Stoffkreisläufe kann durch Biogasanlagen erreicht werden: Durch die Biogaserzeugung können zusätzlich betriebsfremde Nährstoffe - im Rahmen der Richtlinien der EU bzw. der Anbauverbände - erschlossen werden und damit die Menge der zur Verfügung stehenden Nährstoffe im Betrieb erhöht werden (Hülsbergen 2007, Stinner et al. 2003). Dies

gilt insbesondere, wenn keine oder nur geringe Nährstoffmengen mit den Gärresten in andere Betriebe abgegeben werden (Hülsbergen 2007), wobei dies für einen anderen (ökologisch wirtschaftenden) Betrieb (= Substratlieferant) bedeutet, dass Nährstoffe exportiert werden.

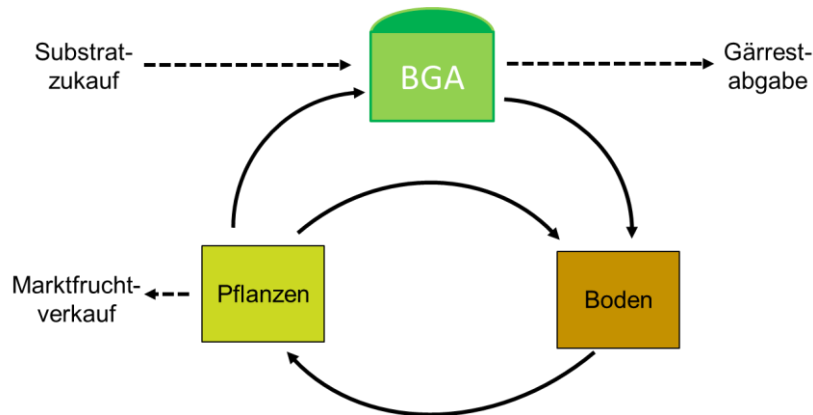


Abbildung 1: Die Biogasanlage im Stoffkreislauf eines viehlosen Betriebs

Legume Feldfutterpflanzen haben durch die Vergärung eine direkte Verwendungsmöglichkeit im Betrieb. Bei der Biogaserzeugung anfallende Gärreste können als mobiler (zeitlich und örtlich flexibel einsetzbarer) Dünger verwendet werden. Eine bedarfsgerechte Ausbringung der Nährstoffe zum Zeitpunkt des Pflanzenbedarfs ist damit möglich. In Feldversuchen wurde eine Optimierung des Nährstoff- bzw. Stickstoffmanagements durch die Biogaserzeugung festgestellt (Frøseth et al. 2012, Stinner et al. 2008, Heuwinkel et al. 2005, Möller 2002).

Die Gefahr von Nährstoffverlusten - insbesondere Stickstoffverlusten - aus dem System durch Kleegrasumbrüche, in Form von Emissionen ins Grundwasser (als Nitrat) bzw. in die Atmosphäre (Lachgas und Ammoniak) (z.B. Stinner et al. 2008, Báth et al. 2006, Heuwinkel et al. 2005, Möller 2002), werden durch die Nutzung der legumen Feldfutterpflanzen minimiert. Bei der Biogasproduktion und der Lagerung der Gärreste in gasdichten Gärrestelagern werden die Stickstoffverluste in die Atmosphäre minimiert (Gollnow und Bahrs 2012, Michel et al. 2006a). Das Gesamtverlustpotential von Stickstoff in Biogassystemen ist jedoch schwierig zu quantifizieren, vor allem aufgrund der Verluste bei der Applikation (Michel et al. 2006a). Die fortschreitende Entwicklung der Gärresteseparierung ermöglicht eine optimierte Ausbringung der Gärreste. Der lösliche, mineralische Stickstoff verbleibt zum Großteil in der Flüssigphase, während der organisch gebundene Stickstoff und Phosphor vor allem mit der Festphase abgeschieden werden (Döhler und Wulf 2009). Die Flüssigphase kann durch den geringen Trockensubstanzgehalt exakter ausgebracht und Ammoniakverluste minimiert werden (Döhler und Wulf 2009).

Als Folge des mikrobiellen Abbaus von Kohlenstoffgerüsten steigt während der Vergärung von Biogassubstraten die Nährstoffkonzentration bezogen auf die Trockensubstanz. Im Gärprozess nimmt der Anteil des organisch gebundenen Stickstoffs ab und der Anteil des mineralischen Stickstoffs (Ammonium) nimmt deutlich zu. Das C/N-Verhältnis wird enger (Michel et al. 2006a, Wellinger et al. 1991).

Aufgrund des Abbaus organischer Kohlenstoffgerüste während der Vergärung wurden in der Vergangenheit zunächst negative Auswirkungen der Gärrestdüngung bzw. der Biogaserzeugung auf den Humusgehalt befürchtet. Die Auswertung relevanter Literatur zeigt jedoch, dass die Integration einer Biogasanlage in ein ökologisches Anbausystem langfristig keine negativen Wirkungen auf die Bodenkohlenstoffmenge bzw. den Humusgehalt erwarten lässt. Bei der Vergärung werden vor allem die leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen zersetzt (u.a. Marcato et al. 2009). Möller (2002) und Reents et al. (2011) gehen davon aus, dass die steigenden Erträge durch die Gärrestdüngung zu einem Ausgleich bei der Menge des zugeführten Kohlenstoffs in den Boden führen, sowohl über die zurückgeführten Düngermengen als auch über ein stärkeres Wurzelwachstum.

Fazit: Biogasanlagen in vieharmen bzw. viehlosen ökologischen Betrieben intensivieren die inner- und überbetrieblichen Nährstoffkreisläufe und verbessern die Nährstoffversorgung von Böden und Pflanzen. Abhängig von der Größe der Biogasanlage, dem Anlagentyp, dem Biogasprozess (z.B. Verweildauer, Abbaurate im Reaktor), den eingesetzten Biogassubstraten, den überbetrieblichen Stoffströmen (Biomassezukauf, Gärrestangabe) ergeben sich sehr differenzierte Wirkungen auf den Humus- und Nährstoffhaushalt des betrachteten Betriebssystems. Auf Betriebsebene sind die Stoffströme zur Biogaserzeugung vielfältig mit den anderen Betriebszweigen (Marktfruchtbau, Futterbau / Tierhaltung) verbunden. Darüber hinaus kann die Biogaserzeugung in ökologischen Betrieben auch zu vernetzten Stoffströmen mit anderen Betrieben führen, wodurch sich Chancen der Nährstoffumverteilung ergeben, z.B. Einsatz von Gärresten in der Qualitätsweizenproduktion, aber auch Probleme, z.B. negative Nährstoffsalden auf den Flächen der Substratlieferanten.

2.2.2. Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung

Positive Ertragseffekte bei nicht-legumen Ackerfrüchten durch die Gärrestdüngung im ökologischen Landbau wurden auf mehreren Versuchsstandorten experimentell ermittelt (u.a. Bryzinski und Hülsbergen 2015, Levin et al. 2015, Råberg et al. 2014, Reents et al. 2011, Möller et al. 2006a, Möller et al. 2006b, Stinner et al. 2005), mit Hilfe eines Pflanzwachstumsmodells berechnet (Blumenstein et al. 2015b) sowie durch Befragungen von Landwirten in der Praxis bestätigt (Tersbøl und Malm 2014, Anspach und Möller 2009). Als Grund für die Ertragseffekte wird vor allem die bessere Stickstoffverfügbarkeit genannt (Möller et al. 2008, Stinner et al. 2008), wobei in viehlosen Marktfruchtssystemen auch die Phosphorversorgung mittlerweile als ertragskritisch betrachtet wird (Möller et al. 2006b).

Es besteht in der Literatur Einigkeit darüber, dass die Ertragseffekte stärker in viehlosen Anbausystemen ausfallen, denen kein mobiler Wirtschaftsdünger zur Verfügung steht, als in viehhaltenden Betrieben (Blumenstein et al. 2015b, Möller et al. 2006a, Möller et al. 2006b). Bei der Höhe der Ertragseffekte unterscheiden sich die Untersuchungsergebnisse allerdings zum Teil erheblich.

Tabelle 1: Ertragssteigerungen durch Gärrestdüngung bei Getreide (Korn)

Literaturquelle	Art der Ermittlung	Ertragssteigerung	Betrachtete Fruchtart
Blumenstein et al. (2015b) ^{a)}	Modellgestützt	ca. 53 %	Winterweizen
Bryzinski und Hülsbergen (2015)	Experimentell	38 %	Winterweizen
Levin et al. (2015)	Experimentell	47 %	Winterweizen
Reents et al. (2011)	Experimentell	28 %	Winterweizen
Anspach und Möller (2009)	Befragung in Praxisbetrieben	10 – 30 %	Getreide
Möller et al. (2006b)	Experimentell	15 %	Getreide

Anmerkungen: ^{a)} Angaben zu der Betrachtung viehloses System mit Zwischenfruchtanbau

Möller et al. (2006b) ermittelten in Versuchen auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Gladbacherhof der Universität Gießen Ertragssteigerungen und Verbesserungen der Backqualität von Weizen durch die Vergärung von Klee gras und Zwischenfruchtaufwüchsen sowie von Neben ernteprodukten und die Gärrestdüngung nicht-legumer Hauptfrüchte bei viehlosen ökologi schen Anbausystemen. Als Grund wird die Optimierung der Stickstoffflüsse genannt, offen sichtlich durch die höheren N-Aufnahmen und Rohproteingehalte der Ernteprodukte. Die Un tersuchungen basierten auf der Fruchtfolge Klee gras, Kartoffeln, Winterweizen, Erbsen, Win terweizen, Sommerweizen. Möller et al. (2006b) bereinigten die Versuchsergebnisse aufgrund von systembedingten Verlusten im Vergärungsprozess, die sich wegen technischer Unzuläng lichkeiten der verwendeten Technikumsanlage ergaben. Demnach ist davon auszugehen, dass sich die Erträge auf dem Untersuchungsstandort durch die Vergärung beim Getreide um ca. 15 % und im Durchschnitt bei allen nicht-legumen Hauptfrüchten (Kartoffeln und Getreide) um ca. 9 % steigern ließen.

Reents et al. (2011) konnten am Standort Viehhausen Ertrags- und Qualitätseffekte auf Win terweizen durch die Düngung mit Gärresten im Vergleich zur Gründüngung zeigen. Die Vari anten mit Düngung von Gärresten hatten im Vergleich zu den Varianten ohne Gärrestdüngung signifikant höhere Kornerträge. Durchschnittlich konnte der Ertrag um ca. 28 % gesteigert wer den (Untersuchungsjahre 2007 bis 2009). Die Gärrestdüngung hatte auch eine Erhöhung des Proteingehaltes beim Winterweizen zur Folge. Die Ertragswirkung der Düngung fiel bei Frucht folgen mit niedrigeren Erträgen stärker aus (Reents et al. 2011). Levin et al. (2015) zeigten anhand des gleichen Versuchs höhere Ertragseffekte auf Winterweizen durch die Gärrestdüngung, im Vergleich zu Reents et al. (2011). Die Kornerträge waren bei Levin et al. (2015) um durchschnittlich 47 % höher. Der Untersuchungszeitraum war hier von 2007 bis 2013. Künftig wird ein noch höherer Ertragseffekt erwartet. Die Betrachtung dieses Effekts in Langzeitversu chen wird deshalb von Levin et al. (2015) als notwendig bewertet.

Bryzinski und Hülsbergen (2015) untersuchten Ertragseffekte im Systemversuch Viehhausen, der auch die experimentelle Basis zu dieser Arbeit bildet. Durch den Schnitt von Luzerne-Klee gras, der Vergärung und dem Ausbringen der Gärresten zu den nicht-legumen Marktfrüchten (ökologisches Biogassystem) anstatt des Mulchens (ökologisches Marktfruchtssystem) wurden Ertragssteigerungen bei der Gesamtertragsfolge sowie beim Winterweizen festgestellt. Die Fruchtfolge dieser beiden Anbausysteme ist identisch. In den Untersuchungsjahren 2011 bis 2013 wurde im Biogassystem ein um 38 % höherer Winterweizenertrag als im Marktfruchtssystem gemessen.

Blumenstein et al. (2015b) ermittelten modellgestützt Ertragseffekte innerhalb einer Fruchtfolge aufgrund der Integration einer Biogasanlage und der damit verbundenen Gärrestdüngung. Die Erträge wurden abhängig vom berechneten jährlichen Angebot an mineralischem Stickstoff modelliert. Die Ermittlung der Erträge basiert auf düngungsabhängigen Ertragsdaten. Es wurde unterstellt, dass Stickstoff der alleinige ertragslimitierende Faktor ist. Der Modellansatz vernachlässigt jedoch die genaue zeitliche Verfügbarkeit des Stickstoffes. Die Gärrestdüngung führt bei den viehlosen Systemen bei fast allen Marktfrüchten zu deutlichen Ertragssteigerungen. Bei der Fruchtfolge ohne Zwischenfruchtanbau fallen die Ertragssteigerungen stärker aus als bei den Fruchtfolgen mit Zwischenfruchtanbau. Bei der Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten ist der Ertrag von Winterroggen beim System mit Biogas niedriger im Vergleich beim System ohne Biogas. Dies ist auf den Modellansatz der betriebswirtschaftlichen Optimierung zurückzuführen, da hier die Erträge zugunsten der Ertragssteigerung einer gewinnbringenderen Fruchtart zurückgehen. Die niedrigeren Ertragssteigerungen bei den Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten erklären Blumenstein et al. (2015b) damit, dass durch den Anbau (legumer) Zwischenfrüchte den Betrieben ohne Biogasanlage mehr Stickstoff aus dem Bodengrundvorrat zur Verfügung steht und sich daher die Erträge den viehhaltenden Betriebstypen angleichen. Die von Blumenstein et al. (2015b) modellierten Ertragssteigerungen für Winterweizen im viehlosen System mit Zwischenfruchtanbau (ca. 53 %) übersteigen die experimentellen Ergebnisse von Levin et al. (2015) mit 47 % und von Bryzinski und Hülsbergen (2015) mit 38%.

Bei einer Befragung von Betreibern ökologischer Biogasanlagen innerhalb der Studie „BioBiogasmonitoring“ der Universität Kassel im Jahr 2007 gaben 60 % der befragten Betriebsleiter an, Ertragssteigerungen zwischen 10 und 30 % seit Beginn der Gärrestdüngung zu erreichen, insbesondere im Getreidebau und auf Grünland. 13 % der Betriebe stellten keine Ertragsveränderungen fest. Darüber hinaus berichteten 50 % der Betriebe von besseren Qualitäten, insbesondere von höheren Proteingehalten im Getreide. Es wurden keine negativen Veränderungen durch die Gärrestdüngung genannt (Anspach und Möller 2009).

Kravchenko et al. (2017) zeigten, dass erhebliche Ertragsunterschiede zwischen dem Anbau in Parzellen und in Feldversuchen bei „Low-Input-Systemen“ sowie bei ökologischen Anbausystemen bestehen können. Vor diesem Hintergrund sind praxisbetriebliche Untersuchungen der Ertragseffekte durch Gärrestdüngung von enormer Bedeutung.

Fazit: Bisher wurden überwiegend Feldversuche mit relativ kurzen Versuchslaufzeiten zu der Thematik Gärrestdüngung im ökologischen Landbau durchgeführt, damit können die langfristigen Ertragswirkungen nicht erfasst werden. In den wenigen Versuchen mit längerer Versuchslaufzeit (Reents 2011, Levin 2015) zeigten sich zum Teil steigende positive Ertragseffekte. Die Ertragseffekte wurden überwiegend auf die Stickstoffwirkung reduziert. Dies kann zutreffend für die bisherigen Versuche mit wenigen Jahren Untersuchungsdauer sein. Bei

langjähriger Gärrestnutzung werden sich darüber hinaus Wirkungen auf z.B. alle Makro- und Mikronährstoffe (die ertragsrelevant / -limitierend sein können), den Humusgehalt / die Bodenfruchtbarkeit, die Bodenbiologie sowie das Bodengefüge ergeben. Es ist damit eine Komplexwirkung auf die Erträge zu erwarten. Neben Feldexperimenten sind Untersuchungen in ökologisch wirtschaftenden Betrieben notwendig, um die Ertragseffekte nach einer Umstellung auf ein Biogassystem unter praxisnahen Bedingungen zu erfassen, wie durch Kravchenko et al. (2017) deutlich wird. Zwischen Feldversuchen und landwirtschaftlicher Praxis können gravierende Ertragsunterschiede (unterschiedliches Ertragsniveau, unterschiedliche Ertragseffekte der Gärrestdüngung) bestehen: Negative Ertragseffekte können unter Praxisbedingungen durch Bodenschadverdichtung durch die Gülleausbringung auftreten, was im Versuch meist durch Trennung von Fahr- und Wuchsraum vermieden werden kann bzw. die Ernteparzellen werden nicht befahren. Sind die Böden bereits stark verarmt an Nährstoffen, so werden gedüngte Nährstoffe zunächst im Boden angereichert (festgelegt) und sind nicht pflanzenverfügbar. Unter Praxisbedingungen ist eine optimale Gärrestverteilung aufgrund von betrieblichen Abläufen gegebenenfalls nicht möglich (Menge und Termin). Eine mangelnde Einarbeitung des Gärrestes kann zu hohen NH_3 -Verlusten führen. Diese Gründe können dazu führen, dass die Ertragssteigerungen unter Praxisbedingungen nach Umstellung auf Gärrestdüngung geringer sind als in Versuchen oder oftmals sogar nicht erkennbar sind. Dabei müssen jedoch auch die Ergebnisse von Reents et al. (2018) berücksichtigt werden: Ertragsdifferenzen zwischen Versuch und Praxis müssen nicht notwendigerweise auftreten. Die Ergebnisse zeigten in den Feldversuchen (mit Parzellen und Wiederholungen) keine höheren Erträge, als auf den Praxisschlägen (in Messparzellen) mit Betriebstechnik.

2.2.3. Ökonomische Effekte der Integration einer Biogasanlage in einen ökologischen Betrieb

Die ökonomischen Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in ein ökologisches Anbausystem wurden bereits wissenschaftlich anhand von Planungsrechnungen analysiert (Blumenstein et al. 2015b, Anspach 2010, Anspach und Möller 2008, Jäger et al. 2007, Michel et al. 2006b) sowie durch die Befragung von Praxisbetrieben erfasst (Tersbøl und Malm 2014).

Tersbøl und Malm (2014) befragten 21 Betriebe in unterschiedlichen europäischen Ländern zu den ökonomischen Auswirkungen der Biogasanlage auf den Gesamtbetrieb. Neun Betriebe gaben an, durch die Biogaserzeugung deutlich höhere Erträge zu erzielen²; ein besseres ökonomisches Ergebnis im Gesamtbetrieb bestätigten fünf Betriebe. Zwei Betriebe nannten negative ökonomische Ergebnisse aufgrund der Biogasanlage, die Gründe werden nicht angeführt.

Ökonomische Studien zu Biogasanlagen im konventionellen Landbau betrachten in der Regel die Biogasanlage isoliert und ohne innerbetriebliche Wechselbeziehungen (z.B. FNR 2013, KTBL 2013, KEYMER 2012, FNR 2009, DLG 2006, Heißenhuber und Berenz 2006). Ökonomische Studien zu Biogasanlagen im ökologischen Landbau berücksichtigen dagegen überwiegend innerbetriebliche Effekte (vgl. Tabelle 2). Diese Studien betrachten allerdings Biogasanlagen mit relativ hoher elektrischer Leistung (bis 500 kW) und Betriebe mit großen Gesamt-

² Es liegen keine Informationen zu applizierten Gärrestmengen, tatsächlichen Ertragseffekten und zum Substrateinsatz in den Biogasanlagen vor.

anbauflächen (100 bis 800 ha). Diese Flächengröße ist für ökologische Betriebe in Deutschland selten und vor allem in Bayern bestehen nur vereinzelt ökologisch wirtschaftende Betriebe mit einer Anbaufläche von ≥ 100 ha.

Tabelle 2: Untersuchungsrahmen (Betriebsgröße, Biogasanlagengröße, ökonomische Kennzahlen) von ökonomischen Studien zu Biogasanlagen im ökologischen Landbau

Literaturquelle	Betriebsgröße ha	Leistungen der Biogasanlagen kW _{el}	Ökonomische Kennzahl
Blumenstein et al. (2015b) ^{a)}	100 bis 800	75 bis 500	Summe aus dem Betriebszweigergebnis der Biogasanlage und Veränderung der Betriebszweigergebnisse des Ackerbaus aufgrund der Biogasanlage
Anspach (2010)	-	50 bis 191	Unternehmehrgeinn und Gesamtkapitalrendite der Biogasanlage ohne Berücksichtigung innerbetrieblicher Effekte
Jäger et al. (2007)	300	120 bis 150	Gewinn der Biogasanlage, Veränderung des Deckungsbeitrags der Fruchtfolge aufgrund der Biogasanlage
Michel et al. (2006b)	200	52 bis 171	Gewinn der Biogasanlage, Berücksichtigung von Mehrkosten und Mehrerlösen im Pflanzenbau durch die Biogasanlage

Anmerkungen: ^{a)} Angaben zu der Betrachtung viehloser Systeme

Michel et al. (2006b) untersuchten, angelehnt an die von Möller et al. (2006b) bestimmten Ertragseffekte (Ertragssteigerung beim Getreide durchschnittlich 15%, vgl. Kapitel 2.2.2), die ökonomische Auswirkung der Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen ökologischen Betrieb (200 ha Anbaufläche). Als Kennzahl diente der Gewinn der Biogasanlage, der durch die Mehrkosten und Mehrerlöse im Pflanzenbau (Gärrestdüngung bzw. der Ertragssteigerung) im Vergleich zur Variante ohne Biogasanlage ergänzt wurde. Die ökonomische Untersuchung basiert auf Kalkulationsdaten zu Modellbetrieben und Biogasanlagen (Variante betriebseigene Substrate: 52 kW_{el}, Varianten betriebseigene und -fremde Substrate: 111 bis 171 kW_{el}). Die Erlöse der Biogasanlagen wurden anhand der Einspeisevergütung des EEG 2004 kalkuliert. Die modellierten Investitions- und Betriebskosten der Biogasanlagen konnten durch die erzielten Erlöse durch die Stromproduktion nicht kompensiert werden. Im Vergleich zu anderen Biogasstudien wurde hier mit sehr hohen Kosten gerechnet. Auch die Differenz aus Mehrerlösen und Mehrkosten für den Pflanzenbau waren in dieser Studie stets negativ.

Zur Analyse der Integration einer Biogasanlage (120 bis 150 kW_{el}) in einen ökologischen Betrieb (300 ha) weisen Jäger et al. (2007) Gesamtdeckungsbeiträge für zwei identische Fruchtfolgen aus (Markfruchtbau). Der Unterschied der Fruchtfolgen liegt darin, dass bei einer der Fruchtfolgen eine Biogasanlage betrieben wird und das Kraut der Futtererbsen, der Roggen

als GPS sowie das Klee gras zur Biogaserzeugung genutzt werden. Jäger et al. (2007) berücksichtigen für alle Früchte eine Ertragssteigerung von 5 % nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage. Trotz der Ertragssteigerungen weist der Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge mit Biogasanlage ein schlechteres Ergebnis auf als ohne Biogasanlage. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass der Roggen in der Fruchtfolge nun nicht mehr als Marktfrucht angebaut und verkauft wird, sondern als Roggen-GPS der Biogaserzeugung dient. Aber auch die Mehrarbeit durch die Gärrestdüngung führt zu höheren Kosten der Fruchtfolge. Die Biogasanlage selbst wird separat in einer Leistungs-Kostenrechnung bewertet. Die Biogasanlage kann mit der angenommenen Stromvergütung von 17,16 Cent kWh⁻¹ einen Gewinn erwirtschaften.

Die Ergebnisse von Blumenstein et al. (2015b) basieren auf modellierten Ertragseffekten (vgl. Kapitel 2.2.2). Die ökonomische Bewertung der Biogaserzeugung im ökologischen Betrieb erfolgte für die Anlagengrößen 75, 250 und 500 kW_{el} mit den Vergütungssätzen für Strom gemäß EEG 2012 und EEG 2014. Die Anbaufläche für die viehlosen Betriebe wurde mit ca. 100 bis 800 ha angenommen. Als Kennzahl der gesamtbetrieblichen Betrachtung diente für viehlose Betriebe die Summe aus dem kalkulatorischen Betriebszweigergebnis der Biogasanlage und der Differenz der kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse des Ackerbaus mit und ohne Biogasanlage in € a⁻¹. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Höhe des Ertragseffekts bei den Marktfrüchten in der Fruchtfolge sowie die ökonomischen Rahmenbedingungen bei der Biogaserzeugung (Höhe der EEG-Vergütung) bestimmende Parameter sind, ob der Gesamtbetrieb von der Integration einer Biogasanlage kurzfristig ökonomisch profitiert.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der ökonomischen Studien ergeben sich insbesondere aufgrund der angenommenen Ertragseffekte, der verschiedenen Biogasanlagengrößen im Verhältnis zur angenommenen Anbaufläche sowie der jeweils geltenden Fassung des EEG und somit der Höhe der Einnahmen aus dem Stromverkauf.

Anspach (2010) untersuchte Biogasanlagen im ökologischen Landbau ohne die Berücksichtigung innerbetrieblicher Effekte. Die betrachteten Biogaskonzepte (hoher Zukauf konventioneller Substrate, Nutzung anfallender Wirtschaftsdünger und überschüssiger Biomasse, ökologischer Anbau von Biogassubstraten) konnten mit Vergütungen des EEG 2009 und überwiegend auch mit den Vergütungen des EEG 2004 rentabel sein. Aufgrund der derzeit schlechteren Vergütungssituation von Biogasstrom in Deutschland ist eine Berücksichtigung der innerbetrieblichen Effekte in aktuellen Studien jedoch notwendig.

Fazit: Die vorhandenen Studien sind nicht ausreichend, um die ökonomischen Potenziale der Biogaserzeugung unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus hinreichend genau zu quantifizieren. Die größten Defizite der bisherigen ökonomischen Studien zur Integration einer Biogasanlage in ein viehloses Betriebssystem bestehen in der unzureichenden Quantifizierung von Ertragseffekten (Schätzungen bzw. Modellierung) sowie der nur teilweisen Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Biogaserzeugung und Nahrungsmittelerzeugung. Da die Ertragseffekte das ökonomische Betriebsergebnis prägen, besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Außerdem können die Ergebnisse nicht auf die derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen übertragen werden. Insbesondere durch die Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes haben sich die Bedingungen für Biogasanlagen stark verändert. Ergebnisse, die noch vor wenigen Jahren Gültigkeit hatten, können heute nicht mehr zur Bewertung der Biogaserzeugung verwendet werden. Die bisherigen Studien betrachten überwiegend große Biogasanlagen und Betriebe mit einer Anbaufläche von 100 bis 800 ha. Dies entspricht

nicht den vorwiegenden Betriebsbedingungen von ökologisch wirtschaftenden Betrieben in Deutschland bzw. Bayern.

2.3. Aktuelle Situation der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau in Deutschland

Ökologisch wirtschaftende Landwirte zählen zu den Pionieren der Biogaserzeugung. Die charakteristischen Biogasanlagen der Anfangsjahre waren Kleinanlagen mit einfachster Technik und Eigenwärmeversorgung des Betriebs. Das Bestreben, Nährstoffkreisläufe zu schließen bzw. Wirtschaftsdünger aus der betriebseigenen Tierhaltung aufzuwerten, waren für ökologische Betriebe vorrangige Gründe für eine Biogasanlage. Gewinnerzielungsabsichten standen weniger im Vordergrund (Anspach 2010).

Die staatliche Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat seit 2004 zu einem starken Ausbau der Biogaserzeugung in Deutschland geführt, wobei zuletzt vor allem die Novellierungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes in 2012 und 2017 diesen Ausbau durch eine geringere garantierte Förderung gebremst haben. Größer dimensionierte Anlagen bis über 500 kW_{el} wurden in Unternehmen mit unterschiedlicher Rechtsform etabliert – auch im ökologischen Landbau. Siegmeier et al. (2013) schätzten den Bestand für das Jahr 2011 auf mindestens 150 Biogasanlagen in Betrieben des ökologischen Landbaus. Im Rahmen des „Bio-Biogasmonitorings“ der Universität Kassel konnten davon 109 Betreiber befragt werden. Aufgrund der Stilllegung kleiner Anlagen und dem Neubau von tendenziell größeren Anlagen stieg die durchschnittliche elektrische Leistung seit der Pionierzeit stark an und lag 2011 im Mittel von 109 untersuchten Biogasanlagen bei ca. 200 kW_{el}, wobei dennoch mehr als die Hälfte der Anlagen davon kleiner als 150 kW_{el} waren (Siegmeier et al. 2013). Die Unterschiede zu Biogasanlagen in konventionellen Betriebssystemen liegen vor allem im Substrateinsatz sowie der entsprechenden Technik und Ausführung der Biogasanlage, um diese Substrate vergären zu können (z.B. hohe Anteile an Klee gras). Der hohe Einsatz von Klee gras- und Grassilage und der vergleichsweise geringe Einsatz von Maissilage prägen die Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. So war der mengenmäßige Einsatz von Maissilage in konventionellen Anlagen im Jahr 2013 mit ca. 39 % (FNR 2013) mehr als doppelt so hoch wie in den Biogasanlagen beim „Bio-Biogasmonitoring“ mit 14 % (Siegmeier et al. 2013). In Abhängigkeit der Anlagengröße variiert der Substratmix der „Bio-Biogasanlagen“ stark. Der Anteil von Wirtschaftsdünger am Gesamt-Substrateinsatz sinkt mit zunehmender Anlagengröße. So dominiert in Anlagen bis 75 kW_{el} der Gülle- und Mistanteil mit über 70 %. Mit zunehmender Anlagengröße steigt die Bedeutung von Klee gras, Gras- und Maissilage. Mehr als die Hälfte der Biogasanlagen des „Bio-Biogasmonitorings“ wurden gemäß der Substratanalyse 2011 teils mit konventionellen Substraten beschickt. Die Anteile der konventionellen Zukaufsubstrate an der Gesamtsubstratmenge schwankten zwischen den einzelnen Biogasanlagen sehr stark, bezogen auf die Frischmasse zwischen 0,5 % und 80 %. Maissilage hatte hierbei die größte Bedeutung, deren Anteil im Einzelfall bei bis zu 70 % lag. Zu erwähnen ist auch der Anteil der konventionellen Wirtschaftsdünger, der vereinzelt bis zu 35 % betrug (Siegmeier et al. 2013).

Es ist unklar, ob der Zukauf konventioneller Substrate vorwiegend aufgrund von Ernteaussfällen bzw. Fehlplanungen der Biogasanlagen erfolgt oder eine Ko-Vergärung von konventionellen Substraten aus ökonomischen Beweggründen von vornherein geplant war (Blumenstein et al. 2014). Auch die Stabilisierung des Gärprozesses kann ein Grund für den Zukauf von konventionellen Substraten sein (z.B. Hinzunahme von konventionellem Wirtschaftsdünger als Ko-

Substrat bei einer überwiegenden Klee grasvergärung). Für den Einsatz konventioneller Biogassubstrate auf Öko-Betrieben sprechen vor allem das hohe Methanertragspotenzial (vor allem bei Maissilage) sowie ein eventuell kostenloser Bezug (z.B. Wirtschaftsdünger) und der folglich wirtschaftliche Vorteil bestimmter Substrate gegenüber dem Einsatz der betriebseigenen Substrate. Speziell beim Zukauf von Maissilage ist zu betonen, dass Maissilage aus ökologischer Produktion kaum verfügbar ist und deren Preis im Ökolandbau wesentlich höher ist (für den Einsatz in Biogasanlagen zu hoch ist). Für Maissilage abgesetzt im Flachsilo werden im ökologischen Landbau als Kalkulationswerte für Marktpreise 40 bis 54 € t⁻¹ FM⁻¹ (KTBL 2016 b) angegeben und für die konventionelle Produktion im Vergleich 35 bis 48 € t⁻¹ FM⁻¹ (KTBL 2016 b).

Der Substratzukauf – im Rahmen der Vorgaben durch Gesetze bzw. Richtlinien - kann der Erhöhung des Düngenniveaus im Betrieb dienen. Die europäische Öko-Verordnung (EG) Nr. 834/2007 zum ökologischen Landbau enthält bisher keine Regelungen, die sich direkt auf die Biogaserzeugung beziehen. Dennoch sind in diesem Zusammenhang vor allem die entsprechenden Regelungen zur Nährstoffversorgung zu beachten. Artikel 12 Absatz 1 hält fest, dass die Fruchtbarkeit durch den Anbau von Leguminosen und weiteren Gründüngungspflanzen innerhalb mehrjähriger Fruchtfolgen sowie durch den Einsatz von tierischen Wirtschaftsdüngern oder organischen Substanzen aus ökologischer bzw. biologischer Produktion erhalten und sogar gesteigert werden soll. Können die Nährstoffansprüche der Ackerfrüchte nicht über diese Maßnahmen gedeckt werden, so lässt die Durchführungsverordnung (EG) Nr. 889/2008 den Einsatz von bestimmten Düngemitteln und Bodenverbesserern zu. Die Gesamtmenge des im Betrieb ausgebrachten Wirtschaftsdüngers tierischer Herkunft darf 170 kg Stickstoff je Jahr und Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche nicht überschreiten. Der Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger ist untersagt. Für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung sind im Anhang I der Durchführungsverordnung (EG) Nr. 889/2008 als relevante Stoffe tierische Exkremente aus der nicht-industriellen Tierhaltung³ sowie „kompostiertes oder fermentiertes Gemisch aus pflanzlichem Material“ gelistet. Demnach können Gärreste als Düngemittel im Ökolandbau eingesetzt werden, die pflanzliche Rohstoffe oder tierische Exkremente enthalten, die nicht im Ökolandbau produziert worden sind. Hierbei ist lediglich zu beachten, dass keine gentechnisch veränderten Organismen (GVO) vergoren werden. Die Tiere selbst dürfen dennoch gentechnisch veränderte Organismen (z.B. Soja-, Rapsextraktionsschrot) gefressen haben.

Die Öko-Anbauverbände nehmen in ihren Richtlinien direkt Stellung zur Biogasproduktion und regeln diese. Naturland beschreibt die Biogasanlage als Verbindung zwischen „*der Produktion von regenerativer Energie auf nachhaltigem Wege mit der Erzeugung von hochwertigen und*

³ Vgl. Zengel (2015): Entsprechend der Definition der „nicht-industriellen Tierhaltung“ durch die Länderarbeitsgemeinschaft Ökologischer Landbau (LÖK) und dem Anhang I der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 dürfen Stallmist, getrockneter Stallmist und getrockneter Geflügelmist, Kompost aus tierischen Exkrementen, einschließlich Geflügelmist und kompostierter Stallmist sowie flüssige tierische Exkremente nur bei Einhaltung der folgenden Bedingungen eingesetzt werden: Die Exkremente stammen aus Betrieben (bzw. Betriebskooperationen) mit einem (Gesamt-)Viehbesatz < 2,5 GV/ha. Bei Düngemitteln aus Schweinehaltungen entsprechen diese den Haltungsvorschriften des Art. 11 Absatz 1 der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 (kein Vollspaltenboden, den Tieren müssen eingestreute Liegeplätze zur Verfügung stehen). Im Fall von Düngemittel aus Geflügelhaltungen entsprechen diese den Haltungsvorschriften des Art. 12 Absatz 1 der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 (Geflügel darf nicht in Käfigen gehalten werden). Unabhängig von dieser Regelung dürfen die genannten organischen Wirtschaftsdünger aus Pferdehaltung und Schaf-/ Ziegenhaltung generell Verwendung finden.

gesunden Nahrungsmitteln, da sie überwiegend Reststoffe nutzen, vielfältige Fruchtfolgen ermöglichen und sehr energieeffizient sind“ (Naturland 2016, S. 50). Die Anlagengröße soll in einem angemessenen Rahmen zur Fläche des Betriebes stehen, so dass das vorrangige Ziel der Lebensmittelproduktion weiterhin gewährleistet ist. Seit dem 01.08.2012 darf bei Biogasanlagen auf Naturland-Betrieben der Anteil pflanzlicher Biogassubstrate aus nicht-biologischer Erzeugung maximal 30 % betragen, wobei „nicht-ökologisches“ Klee gras bzw. Gras ohne jeglichen Einsatz von Mineraldüngern und Pflanzenschutzmitteln nicht unter diese Beschränkung fällt. Erlaubte Biogassubstrate konventionellen Ursprungs sind in der Richtlinie definiert. Die Nutzung von konventioneller Gülle sowie von konventionellem Geflügelmist ist verboten. Bis spätestens 2020 soll nach heutigem Stand der Anteil konventioneller Substrate auf Null reduziert werden. Die Gesamtmenge der organischen Düngemittel darf das Äquivalent von 1,4 DE ha⁻¹ (entspricht 112 kg N ha⁻¹ bzw. 98 kg P₂O₅ ha⁻¹) jährlich nicht übersteigen, wobei davon maximal ein Äquivalent von 0,5 DE ha⁻¹ a⁻¹ betriebsfremd sein darf (Naturland 2015).

Gemäß der aktuellen Richtlinie von Bioland müssen mindestens 50 % aller Substrate einer Biogasanlage aus biologischer Erzeugung stammen. Weitere 20 % müssen entweder aus biologischer Erzeugung stammen oder aus den folgenden Komponenten bestehen (Bioland 2016): Wirtschaftsdünger von konventionellen Betrieben (Rinder-, Schaf-, Ziegen- und Pferdemist), Pflanzenaufwuchs von Flächen, die Naturschutz-Schutzgebietsverordnungen unterliegen, Pflanzenaufwuchs von konventionellen Leguminosen-Grasflächen/-Gemengen. Die Reglementierung der Düngemengen sowie die Reduzierung des erlaubten Anteils konventioneller Biogassubstrate auf Null bis zum Jahr 2020 sind identisch zur Naturland-Richtlinie (Bioland 2016).

Bei Biogasanlagen auf Demeter-Betrieben ist ein konventioneller Substratanteil von 1/3 möglich. Hierfür sind jedoch lediglich Klee, Klee gras, Gras, Grünlandaufwuchs, Grünschnitt aus extensiver Bewirtschaftung sowie pflanzliche Beiprodukte der Verarbeitung (bis max. 10 % der zu fermentierenden Stoffe) erlaubt (Demeter 2015).

Auffällig sind die jüngsten Veränderungen der Richtlinien bei Bioland und Demeter. Während in der Fassung der Bioland Richtlinie aus dem Jahr 2013 (Bioland 2013) noch ein Anteil der Biogassubstrate aus biologischer Erzeugung von 70 % vorgeschrieben war, wurde dieser in der Fassung aus dem Jahr 2016 (Bioland 2016) auf 50 % reduziert. Für die weiteren 20 % werden nun auch definierte konventionelle Substrate zugelassen. In der Demeter-Richtlinie von 2013 wurde die Biogasgewinnung noch sehr kritisch formuliert: „*Biogasanlagen können die besondere Qualität des tierischen Dungs beträchtlich reduzieren. Daher sollte auf die Verwendung von tierischem Dung (insbesondere Rinderdung) für die Biogasgewinnung verzichtet werden.*“ (Demeter 2013, S. 7). Diese Formulierung findet sich nicht mehr in der aktuellen Richtlinie (Demeter 2015).

Fazit: Für Biogasanlagen in ökologischen Betriebssystemen existieren deutliche Unterschiede in den Regelungen auf EU-Ebene und den strengeren Vorgaben der Anbauverbände hinsichtlich des Zukaufs von konventionellen Substraten. Dadurch ergeben sich Wettbewerbsunterschiede für Biogasanlagenbetreiber innerhalb des ökologischen Landbaus: Konventionell erzeugte Substrate sind in der Regel kostengünstiger als ökologisch erzeugte und/ oder sind überhaupt in einer wirtschaftlich vertretbaren Distanz vorhanden (z.B. konventioneller Wirtschaftsdünger). Konventionelle Substrate können auch einen zusätzlichen Nährstoffinput darstellen. In der Praxis wird zwar auch Klee gras aus ökologischem Anbau (oftmals sogar kostenlos) als Substrat bereitgestellt (bzw. bei den Landwirten geerntet), jedoch wird in der Regel

dafür eine äquivalente Nährstoffmenge über die Gärreste zurückgefordert. Die ökonomischen Effekte einer Biogasanlage sind dementsprechend auch abhängig davon, ob und in welcher Menge konventionelle Substrate eingesetzt werden (dürfen).

2.4. Herausforderungen der ökologischen Biogaserzeugung

In der Literatur finden sich Hinweise auf vielfältige technische und ökonomische Herausforderungen, die die Biogaserzeugung im ökologischen Landbau mit sich bringt.

Die im konventionellen Landbau dominierenden Biogassubstrate Maissilage und Gülle gelten mittlerweile verfahrenstechnisch bei der Vergärung als problemlos. Der hohe Anteil von Klee-gras- und Grassilage sowie die Nutzung von Stallmist, wie in vielen ökologischen Anlagen üblich (vgl. Kapitel 2.1), stellen jedoch höhere Ansprüche an die Anlagen- und Verfahrenstechnik der Biogaserzeugung. Bei einer Monofermentation von Gras besteht zudem ein erhöhtes Risiko der Prozesshemmung aufgrund hoher Ammoniumkonzentrationen (Spatz et al. 2011). Die Ansprüche bei faserreichen Substraten betreffen insbesondere die Technik des Substrateintrags, der Rühr- und Pumpetechnik. Darüber hinaus können Sand und Steine, die durch das Schwaden und die Aufnahme in das Substrat gelangen, zu einem höheren Verschleiß bei den Anlagenteilen führen (Spatz et al. 2011). Die zusätzliche Technik erhöht den Eigenstromverbrauch der Biogasanlagen. Auch der Aufwand für die Instandhaltung ist bei grasbetonten Biogasanlagen höher als der Durchschnitt (Wank und Keymer 2011).

Biogasanlagen mit einem hohen Anteil an faserreichen Substraten (z.B. Gras-, Klee-grassilage, Mist) verursachen oftmals höhere Investitions- und Betriebskosten. Wank und Keymer (2011) beziffern die Mehr-Investitionskosten im Vergleich zu maisbetonten Biogasanlagen vergleichbarer Größe auf 14 bis 25 %, aufgrund einer aufwändigeren Rühr- und Substrateinbringetechnik. Auch andere Autoren geben in diesem Zusammenhang Hinweise auf Mehrkosten (z.B. Reinhold 2007). Die Biogasanlagen im ökologischen Landbau in Deutschland verfügen im Vergleich zum konventionellen Landbau über eine geringere installierte Leistung (Siegmeier et al. 2013) und haben damit im Vergleich zu größeren Anlagen höhere spezifische Investitionskosten.

Als Teil der Betriebskosten sind die Substratkosten hervorzuheben. Die Kosten von Gras- und Klee-grassilage als Substrate übersteigen oftmals die Kosten von Maissilage, aufgrund des niedrigeren Methangehalts (KTBL 2013) und einem höheren Ernteaufwand (Wank und Keymer 2011). Sowohl in der deutschsprachigen Literatur, als auch in der internationalen Literatur wird immer wieder der hohe Flächenbedarf des ökologischen Landbaus aufgrund des niedrigeren Ertragsniveaus angesprochen (Niggli 2014, Seufert et al. 2012). Dies gilt auch für den Anbau von Biogassubstraten. Hohe Flächenkosten, also die Pacht bzw. der Pachtansatz, spiegeln sich in den Kosten der eigenbetrieblich erzeugten ökologischen Substrate wieder. Die einzige Möglichkeit zur Einsparung von Substratkosten ist die Nutzung von Abfall- bzw. Nebenprodukten als Substrate. Im ökologischen Landbau ist hierfür vorrangig die Nutzung des Aufwuchses von Mulchflächen zu nennen.

Trotz dieser produktionsbedingten Nachteile werden die ökologischen Leistungen, die ein Landwirt mit der umweltverträglichen Erzeugung von Energie erbringt, aktuell in Deutschland noch nicht speziell gefördert.

2.5. Risikobewertung der Biogaserzeugung

Risikoaspekte haben bei Entscheidungen von Landwirten eine enorme Bedeutung (Pennings et al. 2008). Somit hat das betriebsleiterspezifische Einschätzen von Risiken Auswirkungen auf das Investitionsverhalten und damit auf die betriebliche Entwicklung (Läpple 2007). In der agrarökonomischen Forschung gewinnt neben der Bewertung von Einzelrisiken auf landwirtschaftlichen Betrieben (z.B. Riessen 2010, Laschewski und Pessier 2008) die Monte-Carlo-Simulation, also die Aggregation von Risiken, eine immer größere Bedeutung. Vor allem zu der Thematik Risiko bzw. Risikomanagement der Biogaserzeugung finden sich Monte-Carlo-Simulationen in der Literatur (Riessen 2010, Berenz et al. 2008, Berenz und Heißenhuber 2007, Rauh et al. 2007).

Die Monte-Carlo-Simulation stellt ein stichprobentheoretisches Verfahren bei Risikoanalysen dar (Hildebrand 1988). Mit Hilfe einer Stichprobenerstellung werden Zufallsprozesse (z.B. Marktpreise, Weizenertrag) von Inputgrößen simuliert. Deren Merkmalswerte sind Zufallsvariablen, die eine für den abzubildenden Prozess typische stochastische Verteilung aufweisen (z. B. Dreiecksverteilung, Normalverteilung). Das Ziel einer Monte-Carlo-Simulation ist es, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Outputgrößen (z.B. Unternehmensgewinn) über die relevanten Inputgrößen abzuleiten. Zu den Inputgrößen können hierfür sichere und unsichere Informationen vorliegen (Hildebrand 1988).

Berenz et al. (2008) beschäftigten sich mit einer Strategie zur Risikominimierung von Biogasanlagen. Zur Überprüfung der Stabilität der Gewinne sowie zur Ableitung der Stabilität von Gewinnprognosen wurde die Monte-Carlo-Simulation verwendet. Zunächst ermittelten Berenz et al. (2008) die Varianz ökonomischer Zielgrößen und bestimmten in einem zweiten Schritt durch eine *ceteris paribus* Simulation die Auswirkungen einzelner unsicherer Parameter. Riessen (2010), Berenz und Heißenhuber (2007) und Rauh et al. (2007) nutzten die Monte-Carlo-Simulation zur Bewertung des Gesamtrisikos einer Biogasanlageninvestition auf Basis von Modellanlagen. Die Monte-Carlo-Simulationen dieser Arbeiten zeigten die große Bandbreite des möglichen Gewinns einer Biogasanlageninvestition. Rauh et al. (2007) berücksichtigten beispielsweise insgesamt 13 Zufallsvariablen in der Monte-Carlo-Simulation zu folgenden Bereichen: Substrate, Biogasprozess und BHKW (vgl. Tabelle 3). Für alle Zufallsvariablen wurden Dreiecksverteilungen angenommen, die mit Hilfe von Literaturdaten definiert wurden. Die Betrachtung bezog sich auf den Zeitraum nach einer Investitionsentscheidung. Faktoren, auf die der Investor aufgrund der zeitlichen Dimension keinen Einfluss mehr hat, wurden deshalb als fixe Größen gehandhabt (z.B. Investitionssumme).

Bei Riessen (2010) dagegen, gehen mit den Investitionskosten und dem Eigenkapitalanteil Zufallsvariable in die Monte-Carlo-Simulation ein, die vor der Investitionsentscheidung feststehen (vgl. Tabelle 3). Auch decken die Zufallsvariablen dieser Arbeit zusätzliche Bereiche ab, im Vergleich zur Arbeit von Rauh et al. (2007), z.B. den Wärmeverkauf mit den Zufallsvariablen Verkauf Wärme (Menge) und Wärmepreis.

Tabelle 3: Zufallsvariablen von Monte-Carlo-Simulationen zum Thema Biogaserzeugung

Risikogruppe	Risiko	Rauh et al. (2007)	Riessen (2010)
Produktionsrisiko Substraterzeugung	Flächenertrag Substrate	X	X
	Lagerverluste Silo	X	
Produktionsrisiko Substratqualität und Gasauabeute	TM-Gehalt Substrate	X	
	oTM-Gehalt Substrate	X	
	Methangehalt Substrate	X	X
	Abbaurrate Substrate	X	
	Gasertrag Substrate	X	
Produktionsrisiko Biogasanlage / BHKW	Zündölanteil	X	
	elektrischer Wirkungsgrad	X	X
	Eigenstromverbrauch	X	X
	Vollbenutzungsstunden BHKW		X
	Reparaturaufwand		X
Finanzrisiken	Eigenkapitalanteil		X
	Zinsniveau		X
	Verkauf Wärme (Menge)		X
Markt- und Preisrisiken	Erlöse / Preise für Wärme		X
	Versicherungsaufwand		X
	Investitionskosten		X
	Weizenpreis		X
	Nährstoffpreisniveau		X
	Lohnansatz		X

Die Monte-Carlo-Simulationen zu der Thematik Biogaserzeugung (Riessen 2010, Berenz et al. 2008, Berenz und Heißenhuber 2007, Rauh et al. 2007) zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit des Betriebszweiges Biogas trotz gesicherter Einspeisevergütung sensitiv auf Änderungen bei Produktions-, Finanz- sowie Markt-/ Preisrisiken reagiert und daher mit einem Risiko verbunden ist.

Fazit: Bei den bisherigen Studien zur Risikoanalyse der Biogaserzeugung sind mehrere Aspekte, die diese Arbeit betreffen nicht berücksichtigt, dementsprechend besteht Forschungsbedarf. Keine der Studien berücksichtigt spezifische Risiken des ökologischen Landbaus. Für diese Arbeit ist vor allem der Ertragseffekt durch die Gärrestdüngung von Bedeutung. Im ökologischen Landbau ist dieses Risiko wesentlich bedeutender als im konventionellen Landbau, da risikomindernde Maßnahmen (in diesem Fall z.B. Düngung, Pflanzenschutz) zum Teil nicht durchführbar sind oder mit höheren Kosten verbunden sind. In der Praxis zeigten sich vor allem Biogasanlagen mit einem hohen Anteil faserreicher Substrate (z.B. Klee gras) – typisch

für den ökologischen Landbau - als störanfällig und reparaturaufwendig (u.a. höhere Betriebskosten vgl. Kapitel 2.4). Die oben genannten Monte-Carlo-Simulationen beziehen sich auf einen Zeitpunkt vor der Novellierung des EEG im Jahr 2014. Das Thema Stromverkauf wurde daher bei diesen Risikoanalysen nicht berücksichtigt. Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2014 steht die bisher bekannte Einspeisevergütung nach § 37 EEG 2014 nur noch den sogenannten „kleinen Anlagen“ zu. Der Anspruch hierfür besteht für Strom aus Anlagen mit einer installierten Leistung von maximal 100 kW_{el}. Für alle anderen Anlagen besteht die Möglichkeit der geförderten Selbstvermarktung (Direktvermarktung), wobei nur der Anteil des Stroms gefördert wird, der einer Bemessungsleistung der Anlage von 50 Prozent des Wertes der installierten Leistung entspricht. Gleiches gilt für das EEG 2017. In künftigen Arbeiten zum Thema Risikoanalyse von Biogasanlagen ist somit zusätzlich der Bereich des Stromverkaufs zu berücksichtigen.

2.6. Forschungsbedarf und Hypothesen

Aus dem Stand des Wissens geht hervor, dass die Nährstoffversorgung in ökologischen Marktfruchtbetrieben und in viehschwachen Gemischtbetrieben aufgrund der hohen Nährstoffexporte und der limitierten Nährstoffimporte in die Betriebssysteme langfristig nicht gesichert ist. Die Lösung des Nährstoffproblems von ökologischen Marktfruchtbetrieben ist daher für die Weiterentwicklung des ökologischen Landbaus von enormer Bedeutung. Als eine Möglichkeit hierfür hat sich die Integration einer Biogasanlage in die viehlosen bzw. vieharmen Anbau- und Betriebssysteme gezeigt. Relevante Ertragssteigerungen konnten aufgrund der Gärrestdüngung nachgewiesen werden. Bisherige ökonomische Studien zu diesem Thema weisen Defizite in der Quantifizierung von Ertragseffekten auf (Schätzungen bzw. Modellierung) und basieren auf heute nicht mehr gültigen Fassungen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3). Die Ertragssteigerung durch die Integration einer Biogasanlage in ökologisch wirtschaftende Betriebe ist von außerordentlicher Bedeutung. Anstatt einer Konkurrenzbeziehung zwischen der Nahrungsmittel- und Energieproduktion können Synergieeffekte erzielt werden, wenn primär Wirtschaftsdünger, Zwischenfrüchte und Gründüngungspflanzen (energetische Nutzung anstatt Mulchen) vergoren werden. Dementsprechend besteht ein hoher Forschungsbedarf zu dem ökonomischen Potenzial der Biogaserzeugung unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus.

Ausgehend vom Stand des Wissens werden in dieser Arbeit folgende Hypothesen zur Bewertung der Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem aufgestellt:

- Die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem bewirkt über die Gärrestdüngung eine signifikante Ertragssteigerung bei nicht-legumen Marktfrüchten.
- Eine Biogasanlage kann im ökologischen Landbau mit den aktuellen Strompreisen bzw. der Förderung durch das derzeit geltende EEG 2017 nicht wirtschaftlich betrieben werden (Ausnahme: kleine Gülleanlage, 75 kW_{el}).
- Die Integration einer Biogasanlage in einen ökologischen Marktfruchtbetrieb führt zu einer Verbesserung des ökonomischen Gesamtergebnisses.

- Die positiven Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung führen zu höheren Erlösen im Marktfruchtbau und sind der Grund für die ökonomische Verbesserung des Betriebsergebnisses bei Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem.
- Das unternehmerische Risiko verringert sich durch die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Marktfruchtssystem aufgrund der Diversifizierung im Betrieb.

3. Material und Methoden

Zur Analyse der Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in ein ökologisches Anbau- und Betriebssystem werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Forschungsansätze gewählt, die sich in ihren Aussagen ergänzen:

- Bei dem experimentellen Ansatz bilden Daten eines Feldexperiments (ökologische Markt-bau-Fruchtfolge mit unterschiedlicher Klee-grasnutzung ohne/ mit Gärrestdüngung) sowie die Modellierung der fehlenden Systemkomponenten (Biogasanlage, Betrieb) und Stoffflüsse (z.B. Substrateinkauf, Marktfruchtverkauf) die Grundlage. Die experimentellen Daten stammen vom Systemversuch Viehhausen.
- Bei dem praxisbetrieblichen Forschungsansatz werden die Wirkungen der Integration einer Biogasanlage in einen ökologischen Marktfruchtbetrieb anhand einer betrieblichen Fallstudie analysiert.

3.1. Feldexperimentelle Untersuchungen

Der Forschungsansatz auf der Basis des Systemversuchs Viehhausen verbindet experimentelle Daten mit Kalkulationsdaten, um gesamtbetriebliche Analysen vorzunehmen und ökonomische Kennzahlen zu berechnen. Hierfür erfolgt ein Vergleich zwischen einem „Biogassystem“ und einem „Marktfruchtsystem“. Das „Biogassystem“ beschreibt einen viehlosen Betrieb mit Ackerbau und einer Biogasanlage. Das „Marktfruchtsystem“ stellt einen Betrieb ausschließlich mit Ackerbau dar.

3.1.1. Der Systemversuch Viehhausen

Der Systemversuch ist im August 2009 auf der Versuchsstation Viehhausen bei Freising angelegt worden. Die Versuchsstation liegt im südlichen Tertiär-Hügelland.

Tabelle 4: Standortbedingungen der Versuchsstation Viehhausen (Castell et al. 2016) und mittlere bodenchemische Kennwerte (Reents et al. 2018)

Bodentyp/ Bodenart	Pseudogley-Braunerde, schluffiger Lehm
Höhenlage in m über NN	480
Ackerzahl	55
C _{org} -Gehalt (g kg ⁻¹)	11,85
N-Gehalt (g kg ⁻¹)	1,18
pH-Wert	6,4
P ₂ O ₅ -Gehalt (mg kg ⁻¹)	52
K ₂ O-Gehalt (mg kg ⁻¹)	124

Für die Versuchsergebnisse ist der Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum 2009 bis 2014 relevant (Tabelle 5 und Tabelle 6). Der Witterungsverlauf am Standort der Versuchsstation Viehhausen wird durch Daten der in wenigen Kilometern entfernten Messstation Dürnast beschrieben. Im 30-jährigen Mittel (1961-1990) betragen dort die Jahresniederschläge 787,5 mm und die mittlere Jahrestemperatur lag bei 7,5 °C.

Zum Zeitpunkt der Versuchsanlage (August / September 2009) herrschte eine überdurchschnittlich warme und trockene Witterung. Auch der November 2009 war mit einer Durchschnittstemperatur von 5,7 °C wärmer als im langjährigen Mittel. Nach einem durchschnittlichen Winter 2009/2010 folgte ein Sommer 2010 mit Temperaturen über dem Mittel im Juli sowie einem hohen Niederschlag im August (136,5 mm). Dem durchschnittlichen Winter 2010/2011 folgte ein vergleichsweise trockener Frühling. Die Monate Juni und Juli waren sehr niederschlagsreich mit bis zu 175,6 mm im Juli. Der Winter 2011/2012 war am Versuchsstandort relativ mild, dem schloss sich ein überdurchschnittlicher warmer und trockener Frühling an. Die Folgemonate waren sehr niederschlagsreich mit bis zu 170 mm im August. Der Herbst 2012 war gemäßigt und etwas trocken. Der Winter 2012/2013 hielt sich mit Kälte und beständiger Schneedecke bis Ende März. Einem teilweise zu kühlen Frühjahr 2013 mit hohen Niederschlagsmengen im Mai und Juni folgten ein sehr warmer Juli und August. Vor allem der Juli war extrem trocken. Damit war das Jahr 2013 für den Getreideanbau schwierig. Der Herbst 2013 war überdurchschnittlich feucht. Ihm schloss sich ein sehr milder Winter an. Die vergleichsweise warme Witterung hielt bis Juli 2014. Gleichzeitig fielen von Februar bis Ende April nur 50% der ansonsten für diesen Zeitraum üblichen Niederschlagsmenge und auch der Juni war sehr trocken. Der Mai (vor allem Gewitterregen) und Juli 2014 waren dagegen mit 166,7 bzw. 154,1 mm überdurchschnittlich niederschlagsreich. Dieses Versuchsjahr schloss mit einem milden, feuchten Herbst ab.

Alle Versuchsjahre waren wärmer als das langjährige Mittel, vor allem das Jahr 2014 mit einer um 2,2 °C höheren Jahresdurchschnittstemperatur als das langjährige Mittel. Auch die Jahresniederschlagsmengen aller Versuchsjahre waren im Vergleich zum langjährigen Mittel höher. Im Jahr 2012, dem niederschlagsreichsten Jahr im Betrachtungszeitraum, war die Niederschlagsmenge um 145 mm höher als im langjährigen Mittel.

Tabelle 5: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2009 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1961-1990) an der Messstation Dürnast (LFL Wetter 2018)

	Versuchsjahre						langjähriges Mittel
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Januar	-3,8	-3,3	-0,6	0,8	-0,3	1,5	-2,1
Februar	-1,1	-0,9	0,4	-4,4	-1,8	2,9	-0,7
März	3,4	3,8	4,8	6,0	1,1	6,5	3,0
April	11,6	8,5	11,0	8,7	8,5	10,0	7,3
Mai	14,2	11,3	13,8	14,1	11,4	12,1	11,9
Juni	15,5	16,3	16,2	16,9	15,3	16,7	15,0
Juli	17,8	19,5	15,8	18,1	19,7	18,1	16,7
August	18,6	16,4	18,3	18,2	17,8	15,9	16,1
September	14,6	11,5	14,7	13,3	13,2	13,9	12,9
Oktober	7,9	7,3	8,1	7,9	9,4	10,8	7,9
November	5,7	4,5	2,6	4,5	3,7	5,5	2,8
Dezember	-0,2	-3,1	2,8	0,6	1,1	2,4	-0,7
Mittel	8,7	7,7	9,0	8,7	8,3	9,7	7,5

Tabelle 6: Monatliche Niederschlagsmenge [mm] im Versuchszeitraum 2009 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1961-1990) an der Messstation Dürnast (LFL Wetter 2018)

	Versuchsjahre						langjähriges Mittel
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Januar	25,2	26,5	46,0	105,7	62,7	56,6	43,9
Februar	38,5	22,9	15,1	14,4	66,5	11,0	38,9
März	67,3	39,3	56,5	15,4	34,9	20,8	43,4
April	20,8	26,4	32,7	50,0	40,6	29,9	55,5
Mai	121,8	134,8	58,6	68,7	133,3	166,7	89,6
Juni	124,1	117,2	147,7	136,7	159,6	40,4	103,7
Juli	159,0	104,2	175,6	117,5	17,2	154,1	98,3
August	52,0	136,5	76,2	170,0	99,7	97,8	97,1
September	26,9	56,9	92,1	57,9	90,0	66,5	64,2
Oktober	61,4	37,5	37,3	42,9	69,5	117,7	50,5
November	49,9	55,8	1,4	69,7	57,4	40,7	54,0
Dezember	73,0	91,6	102,3	83,1	11,5	46,3	48,4
Σ	819,9	849,6	841,3	932,0	842,8	848,5	787,5

Bei der Versuchsanlage (vgl. Abbildung 2) handelt es sich um einen Fruchtfolge-Düngungs-Versuch mit sechs Fruchtfolgen (Anbausystemen), bestehend aus jeweils fünf Fruchtfolgefeldern in vier Wiederholungen (n = 4). Die Parzellen sind zur Erfassung langfristiger Effekte ortsstabil angelegt. Untersucht werden im Systemversuch zwei konventionelle Fruchtfolge-

und Betriebssysteme (Marktfruchtsystem, Milchviehsystem mit Gülledüngung) sowie vier ökologische Fruchtfolge- und Betriebssysteme (Marktfruchtsystem, Biogassystem, Milchviehsystem mit Gülledüngung, Milchviehsystem mit Stallmistdüngung). Der Einsatz organischer Düngemittel (Strohdüngung, Gründüngung, Gülle, Biogasgülle, Stalldung) erfolgt systemkonform entsprechend dem berechneten Anfall organischer Dünger der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungssysteme (Marktfruchtbau, Biogaserzeugung, Milchviehhaltung).

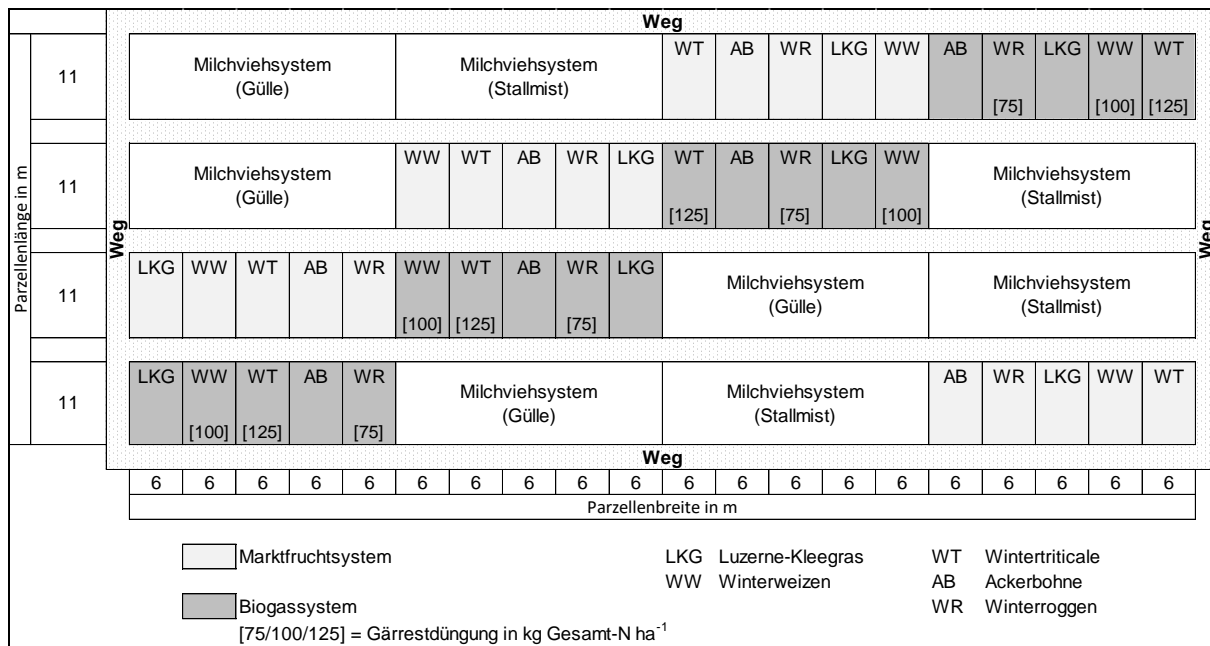


Abbildung 2: Anlageschema des Systemversuchs Viehhausen (Untersuchungsjahr 2009/10)

Im Systemversuch Viehhausen werden kontinuierlich umfangreiche Messwerte gewonnen, wie z.B. Erträge und Inhaltsstoffe (TM-Gehalt, N-Gehalt, C-Gehalt) der Haupt- und Nebenprodukte, Lachgasemissionen für ausgewählte Parzellen und Termine, organische Kohlenstoff- sowie Nährstoffgehalte im Boden sowie Arbeitsgänge (Termine, durchgeführte Feldarbeiten) und Applikationsmengen (z. B. organische Dünger, Inhaltsstoffe) erfasst und dokumentiert. Für diese Arbeit werden Erträge und TM-Gehalte der Haupt- und Nebenprodukte sowie die dokumentierten Arbeitsgänge und Applikationsmengen (Saatgut, Kieserit, Gärreste) verwendet.

Für die Bearbeitung der Forschungsfragen dieser Arbeit werden zwei der ökologischen Anbausysteme in den Untersuchungsjahren 2010 bis 2014 untersucht. Die beiden Anbausysteme haben eine identische fünffeldrige Fruchtfolge (vgl. Tabelle 7): Luzerne-Kleegras (LKG), Winterweizen, Wintertriticale, Ackerbohne und Winterroggen. Beim Marktfruchtsystem wird das Luzerne-Kleegras gemulcht. Das „Marktfruchtsystem“ dient als Referenzsystem für die Untersuchung der Integration einer Biogasanlage in einen ökologischen Marktfruchtbetrieb. Bei dem „Biogassystem“ wird das Luzerne-Kleegras geschnitten und abgefahren. Gärreste werden zu den nicht-legumen Marktfrüchten ausgebracht (einmalige Düngung pro Jahr zu Vegetationsbeginn im Frühling). Das Kleegras und die Ackerbohne erhalten keine Gärrestdüngung. Die Gärreste stammen von einem nahegelegenen ökologischen Betrieb mit Biogasanlage. Bei der

Bemessung der Menge der Gärrestdüngung im Systemversuch Viehhausen wird angenommen, dass ca. 70 bis 80 % der gedüngten Stickstoffmenge der äquivalenten Stickstoffmenge des geernteten LGKs entspricht. Beim Biogassystem wird das Triticalestroh abgefahren (Nutzung als Biogassubstrat), im Marktfruchtsystem dient es der Strohdüngung. Die Zwischenfrucht ist ein Gemenge mit Ölrettich, Alexandrinerklee, Perserklee und Buchweizen.

Tabelle 7: Fruchtfolge, Ertragsverwendung und Düngung

Marktfruchtsystem				Biogassystem		
	Fruchtart	Verwendung	Düngung	Fruchtart	Verwendung	Düngung
1	Luzerne-Kleegras	Mulch	Gründüngung, Kieserit	Luzerne-Kleegras	Biogassubstrat	Kieserit
2	Winterweizen	Marktfrucht	Strohdüngung	Winterweizen	Marktfrucht	Gärrest, Strohdüngung
3	Wintertriticale	Marktfrucht	Strohdüngung	Wintertriticale	Marktfrucht	Gärrest
	Zwischenfrucht	Mulch	Gründüngung	Zwischenfrucht	Mulch	Gründüngung
4	Ackerbohne	Marktfrucht	Strohdüngung	Ackerbohne	Marktfrucht	Strohdüngung
5	Winterroggen	Marktfrucht	Strohdüngung	Winterroggen	Marktfrucht	Gärrest, Strohdüngung

Die Primärdaten (z.B. Ertrag in kg pro Parzelle) aus dem Versuch werden in praxisübliche Einheiten (z.B. Ertrag in t pro Hektar) konvertiert. Für die ökonomische Betrachtung werden bei den Ertragsdaten folgende Verluste berücksichtigt: Für Transport und Lagerung werden auf der Grundlage von Kalkulationsdaten (KTBL 2012a) bei Silage 12 % Trockenmasseverluste abgezogen, bei Marktfrüchten 5 % und bei Stroh 2 %.

3.1.2. Statistische Auswertung der Ertragsleistungen

Die statistische Auswertung der Ertragsdaten des Systemversuchs Viehhausens (Biogas- und Marktfruchtsystem) erfolgt mit der Statistik-Software SPSS. Es wird geprüft, ob sich die Erträge der Fruchtarten der beiden Fruchtfolgen in den einzelnen Untersuchungsjahren (2010 bis 2014) signifikant unterscheiden. Hierfür wird der Zweistichproben t-Test eingesetzt. Es werden von dem Marktfrucht- und dem Biogassystem jeweils die mittleren Erträge der gleichen Fruchtart aus den vier Wiederholungen eines Untersuchungsjahrs miteinander verglichen.

Zunächst werden die Voraussetzungen für den t-Test überprüft:

- Die ermittelten Erträge sind unabhängig voneinander.

- Zur Überprüfung der Normalverteilung der Erträge einer Fruchtart je Untersuchungsjahr und Anbausystem wird der Shapiro-Wilk Test durchgeführt. Es wird die Nullhypothese H_0 aufgestellt, dass eine Normalverteilung der Erträge vorliegt.
- Um die Varianzgleichheit zu überprüfen wird der Levene-Test durchgeführt.

Für den t-Test wird die Nullhypothese H_0 aufgestellt, die besagt, dass sich die mittleren Erträge vom Marktfrucht- und Biogassystem nicht unterscheiden.

Alle statistischen Aussagen in dieser Arbeit basieren auf dem Signifikanzniveau von $p \leq 0,05$.

3.1.3. Ökonomisches Planungsmodell

Die Bearbeitung der ökonomischen Forschungsfragen erfolgt mit Hilfe eines in Microsoft Excel formulierten Planungsmodells, für das ein gesamtbetrieblicher Ansatz gewählt wird, um alle ökonomischen Effekte der Integration der Biogasanlage vollständig erfassen zu können. Das Planungsmodell betrachtet sowohl das Biogassystem als auch das Marktfruchtsystem (= Referenzsystem). Die Datenbasis besteht aus den Anbaudaten des Systemversuchs Viehhausen (experimentelle Ebene) sowie Kalkulationsdaten (modellierte Ebene). Die modellierte Ebene umfasst alle notwendigen Annahmen zur Beschreibung eines Gesamtbetriebes. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die beiden Betriebssysteme schematisch dargestellt.

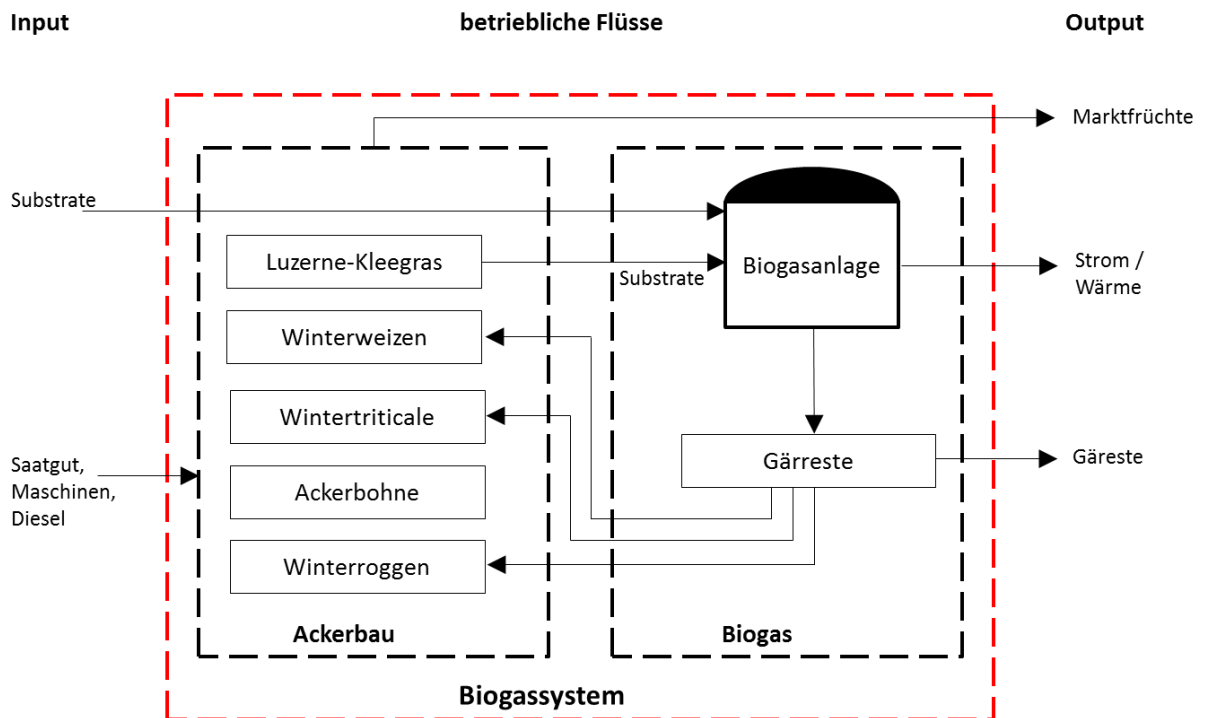


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Biogassystems

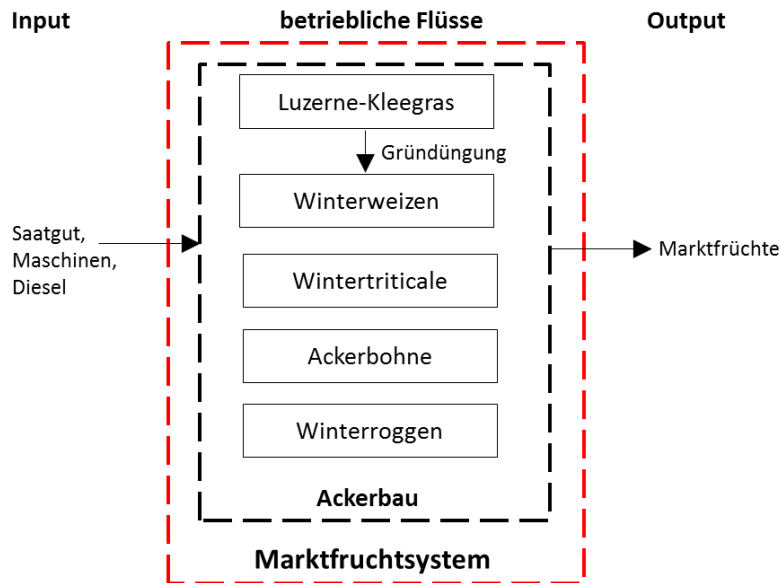


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Marktfruchtsystems

Anhand des in Microsoft Excel formulierten Planungsmodells werden neben dem Unternehmerrgewinn⁴ für das Biogas- und das Marktfruchtsystem in dieser Arbeit auch weitere Kennzahlen für das Biogassystem ausgewiesen: Stromgestehungskosten, Unternehmerrgewinn der Biogasanlage, Mehrgewinn sowie „notwendiger“ Strompreis. Im Folgenden wird die Methodik der Berechnung der Kennzahlen erläutert.

3.1.3.1. Unternehmerrgewinn des Gesamtbetriebs

Die Methode der ökonomischen Bewertung der Betriebssysteme basiert auf der Betriebszweigabrechnung als Vollkostenrechnung in Anlehnung an das von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG 2011, DLG 2006) vorgeschlagene Abrechnungsschema für Betriebszweige in landwirtschaftlichen Betrieben. Als Kennzahl wird der Unternehmerrgewinn (UG) des Gesamtbetriebs des Biogassystems und des Marktfruchtsystems in € ha⁻¹ ermittelt.

Der Unternehmerrgewinn des Marktfruchtsystems (UG_{MF}) entspricht dem Unternehmerrgewinn des Ackerbaus (Formel 1). Er umfasst die Unternehmerrgewinne aller angebauten Fruchtarten sowie gegebenenfalls die anfallenden Kosten eines Zwischenfruchtanbaus. Die Ermittlung des Unternehmerrgewinns einer Fruchtart wird in Kapitel 3.1.3.2 näher erläutert. Der Unternehmerrgewinn für Biogassysteme ohne eigene Biogasanlage, die Substrate an eine fremde Biogasanlage abgeben (in dieser Arbeit als „Biogassystem extern“ bezeichnet), wird nach Formel 1 berechnet.

⁴ Der Unternehmerrgewinn stellt den (Unternehmens-)gewinn abzüglich der (kalkulatorischen) Faktor-kosten Pacht, Lohn, Zins dar (Mußhoff und Hirschauer 2016). In der Literatur wird der Unternehmerrgewinn auch vereinzelt „ordentliches kalkulatorisches Ergebnis“ oder „kalkulatorischer Gewinn“ genannt (vgl. z.B. Mußhoff und Hirschauer 2016). Da vor allem im Bereich der Agrarökonomie die Bezeichnung dieser Kennzahl „Unternehmerrgewinn“ gewöhnlich ist, wird diese Begrifflichkeit auch für diese Arbeit gewählt.

$$\text{Formel 1 } UG_{AB} = ((UG_{\text{Frucht 1}} * AF_{\text{Frucht 1}}) + (UG_{\text{Frucht 2}} * AF_{\text{Frucht 2}}) + \dots + (UG_{\text{Frucht n}} * AF_{\text{Frucht n}})) * AF_{\text{Gesamt}}^{-1}$$

Symbol	Einheit	Beschreibung
UG_{AB}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Betriebszweigs Ackerbau
$UG_{\text{Frucht 1-n}}$	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn einer einzelnen Fruchtart
$AF_{\text{Frucht 1-n}}$	ha	Anbaufläche der einzelnen Fruchtart
AF_{Gesamt}	ha	Gesamtanbaufläche des Betriebszweigs Ackerbau

Der Unternehmergewinn des Biogassystems mit eigener Biogasanlage umfasst den Unternehmergewinn der Biogasanlage und des Ackerbaus (Formel 2). Der Unternehmergewinn des Ackerbaus berücksichtigt in diesem Fall jedoch keine Kosten und Erlöse von Fruchtarten, deren Aufwüchse als eigenbetriebliches Biogassubstrat eingesetzt werden. Die Kosten (z.B. Saatgut, Maschinenkosten, etc.) bzw. Erlöse (z.B. Subventionen) des Substratanbaus werden der Biogasanlage zugerechnet.

$$\text{Formel 2 } UG_{BS} = UG_{AB} + UG_{BGA}$$

Symbol	Einheit	Beschreibung
UG_{BS}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Biogassystems
UG_{AB}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Betriebszweigs Ackerbau
UG_{BGA}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Betriebszweigs Biogas

Die Berechnung des Unternehmergewinns der Biogasanlage wird näher in Kapitel 3.1.3.3 erläutert.

Ergibt sich beim Biogassystem ein höherer Gewinn als beim Marktfruchtsystem, so wird die Differenz zwischen den beiden Unternehmergewinnen als „Mehrgewinn“ bezeichnet, ansonsten als „Mindergewinn“.

$$\text{Formel 3 } MG = UG_{BS} - UG_{MF}$$

Symbol	Einheit	Beschreibung
MG	€ ha ⁻¹	Mehr-/ Mindergewinn des Biogassystems
UG_{BS}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Biogassystems
UG_{MF}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn des Marktfruchtsystems

3.1.3.2. Unternehmergewinn Ackerbau

Der Unternehmergewinn⁵ des Ackerbaus bzw. des Marktfruchtensystems setzt sich aus den Unternehmergewinnen der einzelnen Fruchtarten der Fruchtfolge zusammen (Formel 1). Formel 4 definiert den Unternehmergewinn einer Fruchtart.

Formel 4 $UG_{\text{Frucht}} = L_{\text{Frucht}} - K_{\text{Frucht}}$

Symbol	Einheit	Beschreibung
UG_{Frucht}	€ ha ⁻¹	Unternehmergewinn einer Fruchtart
L_{Frucht}	€ ha ⁻¹	Leistungen einer Fruchtart
K_{Frucht}	€ ha ⁻¹	Kosten einer Fruchtart (Direkt-, Arbeitserledigungs-, Gebäude-, Flächenkosten und Allgemeine Kosten)

Im Folgenden werden die Leistungen und einzelnen Kostenarten in Anlehnung an die DLG-Betriebszweigabrechnung (DLG 2011) erläutert:

- **Leistungen:**
Die Leistungen umfassen die Erlöse aus dem Verkauf der Marktfrüchte. Daneben können direkte Flächen- und Produktförderungen als Leistungen der Fruchtart erfasst werden. Förderungen werden in dieser Arbeit nicht eingerechnet.
- **Direktkosten:**
Die Direktkosten umfassen alle Kosten, die einem Betriebszweig direkt und verursachungsgemäß zugeordnet werden können: Saat- und Pflanzgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Trocknung und Lagerung, Vermarktung sowie Spezialberatung und Hagelversicherung. Ferner wird der kalkulatorische Zinsansatz für die Direktkosten (= Umlaufkapital) ausgewiesen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Umlaufkapital durchschnittlich für ein halbes Jahr gebunden ist (Formel 5).

Formel 5 $ZA_{\text{UK}} = 0,5 \cdot \text{UK} \cdot \text{Zins}$

Symbol	Einheit	Beschreibung
ZA_{UK}	€ ha ⁻¹	Kalkulatorischer Zinsansatz für das Umlaufkapital
UK	€ ha ⁻¹	Umlaufkapital einer Fruchtart in einem Untersuchungsjahr
Zins	%	kalkulatorischer Zinssatz

⁵ In dieser Arbeit wird der „Unternehmergewinn“ als Kennzahl nicht nur für den Gesamtbetrieb verwendet, sondern auch für Betriebszweige und einzelne Fruchtarten.

- **Arbeitserledigungskosten:**
Mit den Arbeitserledigungskosten werden alle Kosten erfasst, die in Verbindung mit der Arbeitserledigung des Produktionsverfahrens stehen. Hierzu zählen vor allem produktionsbezogene Dienstleistungen (z.B. Lohnunternehmer), Personalaufwand bzw. Lohnansatz, Maschinenunterhaltung, Treibstoffe, Maschinenabschreibung, Maschinenversicherung sowie der kalkulatorische Zinsansatz bzw. der Zinsaufwand für das gebundene Kapital im Maschinenvermögen.
- **Gebäudekosten:**
Zu den Gebäudekosten zählen alle Kosten für betriebliche Gebäude. Dies sind die Aufwendungen für Unterhaltung, Abschreibung, Miete, Versicherungen sowie der kalkulatorische Zinsansatz für das gebundene Gebäudekapital.
- **Flächenkosten:**
Zu den Flächenkosten gehören Pachten bzw. ein Pachtansatz, die Grundsteuer sowie die sonstigen Kosten für z.B. Drainagen und den Wegebau.
- **Allgemeine Kosten:**
Allgemeine Kosten können nicht direkt einem Betriebszweig bzw. einer Fruchtart zugerechnet werden, wie z.B. Beiträge, Gebühren, allgemeine Betriebsversicherungen, Aufwendungen für die Buchführung, Unternehmensberatung sowie für Büro und Verwaltung. Dementsprechend werden diese Kosten gleichmäßig auf alle Fruchtarten verteilt. In dieser Kostengruppe werden auch die (kalkulatorischen) Lohnkosten für allgemeine Betriebsarbeiten (v.a. Betriebsleiteraufgaben) berücksichtigt.

3.1.3.3. Unternehmergeinn Biogasanlage

Die ökonomische Bewertung der Biogasanlage erfolgt im Planungsmodell in Anlehnung an das Schema der DLG-Betriebszweigabrechnung (DLG 2006). Formel 6 definiert den Unternehmergeinn der Biogasanlage.

Formel 6 $UG_{BGA} = L_{BGA} - K_{BGA}$

Symbol	Einheit	Beschreibung
UG_{BGA}	€ a ⁻¹	Unternehmergeinn des Betriebszweigs Biogas
L_{BGA}	€ a ⁻¹	Leistungen der Biogasanlage
K_{BGA}	€ a ⁻¹	Kosten der Biogasanlage (Direkt-, Arbeitserledigungs-, Gebäude-, Flächenkosten und Allgemeine Kosten)

Im Folgenden werden die Leistungen und einzelnen Kostenarten der Biogasanlage erläutert:

- **Leistungen:**
Neben den Erlösen aus dem Stromverkauf werden auch (kalkulatorische) Erlöse des Wärmeverkaufs berücksichtigt.
- **Direktkosten:**
Die Direktkosten beschreiben in dieser Arbeit ausschließlich die Substratkosten. Die Kosten für die eigenbetrieblich erzeugten Substrate (Anbau, Ernte und Einlagerung) werden gemäß Formel 7 ermittelt. Die einzelnen Kostenkategorien sind identisch zu den Kostenkategorien von Formel 4 in Kapitel 3.1.3.2. Die Umrechnung von den flächenbezogenen Kosten zu den mengenbezogenen Kosten erfolgt mit dem Ernteertrag abzüglich der Verluste für Transport und Lagerung.

Formel 7 $K_{\text{Substrat}} = (K_{\text{SA}} - L_{\text{SA}}) \cdot \text{Ertrag}_{\text{Substrat}}^{-1}$

Symbol	Einheit	Beschreibung
K_{Substrat}	€ t ⁻¹	Substratkosten (eigenbetrieblicher Anbau)
K_{SA}	€ ha ⁻¹	Kosten des Substratanbaus
L_{SA}	€ ha ⁻¹	Leistungen des Substratanbaus
$\text{Ertrag}_{\text{Substrat}}$	t ha ⁻¹	Ernteertrag des Substrats (abzgl. Verluste für Transport und Lagerung)

Die Kosten für zugekaufte Ko-Substrate können je nach Ko-Substrat die Kosten für das Substrat selbst, Erntekosten, Transportkosten und Einlagerungskosten sein. Zusätzlich werden für diese Kosten (= Umlaufkapital) ein kalkulatorischer Zinsansatz angerechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Umlaufkapital durchschnittlich für ein halbes Jahr gebunden ist (vgl. Formel 5).

- **Anlagenkosten:**
Mit den Anlagenkosten werden die Abschreibungen der Biogasanlage (inkl. BHKW und Siloanlage), der Anlagenunterhalt (Wartung und Instandsetzung) sowie der kalkulatorische Zinsansatz bzw. der Zinsaufwand für das gebundene Kapital im Anlagenvermögen erfasst.
- **Betriebskosten:**
Die Betriebskosten umfassen die Personalkosten, die Kosten für die Versicherung der Biogasanlage sowie sonstige Betriebskosten (Gutachten, Analysen, Betriebsstoffe, ggf. Betriebsstrom).
- **Grundstückskosten:**
Die Grundstückskosten stellt die Pacht bzw. der Pachtansatz für das Betriebsgelände der Biogasanlage dar.

- **Maschinenkosten:**
Die Maschinenkosten enthalten alle Kosten der Mobiltechnik zur Beschickung der Biogasanlage: Maschinenunterhaltung (Reparatur und Wartung), Betriebsstoffe, Maschinenabschreibung sowie der kalkulatorische Zinsansatz bzw. die Zinskosten für das gebundene Kapital im Maschinenvermögen.
- **Allgemeine Kosten:**
Unter die allgemeinen Kosten der Biogasanlage fallen z.B. Beiträge, Gebühren, Aufwendungen für die Buchführung, Beratung sowie die Verwaltung.

Die Umrechnung des Unternehmergewinn der Biogasanlage von der Einheit € a⁻¹ in € ha⁻¹ erfolgt durch die Division durch die Gesamtanbaufläche des Betriebs.

3.1.3.4. Stromgestehungskosten und „notwendiger“ Strompreis

Zur vergleichenden Analyse der Biogassysteme werden die Stromgestehungskosten (GK_{Strom}) der Biogasanlagen betrachtet, die sich in Anlehnung an Kost et al. (2013) wie folgt ergeben:

Formel 8 $GK_{\text{Strom}} = (K_{\text{BGA}} - L_{\text{Wärme}}) \cdot \text{Strom}_{\text{netto}}^{-1}$

Symbol	Einheit	Beschreibung
GK _{Strom}	Cent kWh ⁻¹	Stromgestehungskosten
K _{BGA}	€ a ⁻¹	Kosten der Biogasanlage
L _{Wärme}	€ a ⁻¹	Leistungen aus dem Wärmeverkauf der Biogasanlage
Strom _{netto}	kWh a ⁻¹	Nettostrommenge der Biogasanlage (Menge des produzierten Stroms abzüglich des Eigenstrombedarfs und der Verluste)

Vor dem Hintergrund der regelmäßigen Novellierungen des EEG sowie Veränderungen auf dem Strommarkt wird außerdem der „notwendige“ Strompreis (SP_{Min}) für die Netto-Strommenge (Strom_{netto}) der Biogassysteme dargestellt. Der „notwendige“ Strompreis ist definiert als der Netto-Preis, bei dem im Vergleich zum Marktfreuchtsystem das Biogassystem einen identischen Unternehmergeinn (Gesamtbetrieb) erlangt. Er wird gemäß Formel 9 berechnet.

Formel 9 $SP_{\text{Min}} = GK_{\text{Strom}} - (100 \cdot (UG_{\text{AB(BS)}} - UG_{\text{MF}}) \cdot AF_{\text{BS}} \cdot \text{Strom}_{\text{netto}}^{-1})$

Symbol	Einheit	Beschreibung
SP_{Min}	Cent kWh ⁻¹	„notwendiger“ Strompreis für den verkauften Biogasstrom
$UG_{\text{AB(BS)}}$	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	Unternehmergewinn des Ackerbaus des Biogassystems
UG_{MF}	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	Unternehmergewinn des Marktfruchtensystems
AF_{BS}	ha	Gesamtanbaufläche des Biogassystems
$\text{Strom}_{\text{netto}}$	kWh a ⁻¹	Nettostrommenge der Biogasanlage (Menge des produzierten Stroms abzüglich des Eigenstrombedarfs und der Verluste)
GK_{Strom}	Cent kWh ⁻¹	Stromgestehungskosten

Die Ermittlung des Unternehmergewinns des Ackerbaus vom Biogassystem ($UG_{\text{AB(BS)}}$) bzw. vom Marktfruchtensystem (UG_{MF}) ist in Kapitel 3.1.3.2 näher erläutert. Die einzelnen Kostenkategorien der K_{BGA} können Kapitel 3.1.3.3 entnommen werden.

3.1.4. Modellannahmen

Zur gesamtbetrieblichen Bewertung werden ergänzend für alle im Versuch nicht darstellbaren Komponenten (Betrieb, Biogasanlage) Modellannahmen anhand von Kalkulationsdaten getroffen. Diese werden im Folgenden dargestellt. Alle Kosten und Preise werden in dieser Arbeit ohne Mehrwertsteuer kalkuliert.

3.1.4.1. Annahmen zu den Modellbetrieben

Die beiden betrachteten Betriebssysteme (Biogassystem und Marktfruchtensystem) des Systemversuchs Viehhausen werden nach den Prinzipien des ökologischen Landbaus bewirtschaftet. Auf die Verwendung von synthetischen Stickstoffdüngern wird somit verzichtet. Als Schwefeldünger wird im Systemversuch der sulfathaltige Kieserit verwendet, der entsprechend den Richtlinien der EU-Ökoverordnung zugelassen ist. Auf die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln wird verzichtet. Es wird angenommen, dass die Bewirtschaftung der Modellbetriebe nach den Richtlinien der EU-Ökoverordnung (EG) 834/2007 erfolgt.

Für die Modellbetriebe wird eine durchschnittliche Schlaggröße von 2 ha⁶ angenommen. Die Entfernungen der Schläge zum Betrieb werden im Mittel mit 6 km angenommen. Die Modellbetriebe variieren in ihrer Gesamtanbaufläche. Die Biogassysteme 1 bis 8 verfügen über betriebseigene Biogasanlagen, so dass deren Anbaufläche mit der jeweiligen Biogasanlage (Größe und Substrate) korrespondiert (vgl. Kapitel 3.1.4.3) und eine Größe zwischen 67 und

⁶ Im Mittel betragen im Jahr 2010 die Schlaggrößen ökologisch bewirtschafteter Flächen in Bayern 1,73 ha (LfL 2011b).

800 ha aufweist (vgl. Tabelle 12). Das Biogassystem 9 („extern“) sowie das Marktfruchtsystem verfügen über Anbauflächen von jeweils 200 ha.

Für die Berechnung der Kennzahlen werden in dieser Arbeit keine Fördermittel berücksichtigt, die der landwirtschaftliche Betrieb erhalten kann (z.B. Betriebsprämie, Öko-Prämie), um Rückschlüsse auf notwendige Fördermittel ziehen zu können.

3.1.4.2. Annahmen zum Betriebszweig Ackerbau

Sowohl beim Biogassystem als auch beim Marktfruchtsystem wird angenommen, dass die angebauten Marktfrüchte verkauft werden, beim Biogassystem zusätzlich das Triticalestroh. Als Preise für die verkauften Marktfrüchte bzw. für Stroh (vgl. Tabelle 8) werden die durchschnittlichen bayerischen Marktpreise im Zeitraum 2010 bis 2014 angenommen (LfL 2014).

Tabelle 8: Mittlere Marktpreise für Marktfrüchte und Stroh (2010-2014)

Einheit	Winterweizen	Wintertriticale	Winterroggen	Ackerbohne	Stroh
€ dt FM ⁻¹	40,3	30,9	30,4	42,7	7,3

Erläuterungen: Winterweizen: 80 % Kategorie I und 20 % Kategorie II; Winterroggen 100 % Brotroggen; Stroh: konventioneller Marktpreis; Annahmen basieren auf Kalkulationsdaten (LfL 2014)

Die Direktkosten umfassen die Kosten für Saatgut sowie für das Düngemittel Kieserit. Die angenommenen Preise für Saatgut können Tabelle 9 entnommen werden. Für Kieserit wird ein Preis von 0,25 € kg⁻¹ angesetzt (KTBL 2010).

Tabelle 9: Annahmen zu den Preisen von Saatgut

Einheit	Luzerne-Kleegras	Winterweizen	Wintertriticale	Winterroggen	Ackerbohne	Zwischenfrucht
€ kg ⁻¹	5,48	0,82	0,70	0,74	0,92	2,66

Kommentar: Annahmen basieren auf Kalkulationsdaten (KTBL 2010)

Ausgehend von den erfassten experimentellen Arbeitsverfahren im Systemversuch werden die Maschinenausstattung und die Arbeitsgänge für die Modellbetriebe abgeleitet und die Arbeitserledigungskosten kalkuliert. Tabelle 10 zeigt exemplarisch das Arbeitsverfahren für den Anbau von Winterroggen im Untersuchungsjahr 2011/12 im Marktfruchtsystem. Die Arbeitsverfahren aller weiteren Fruchtarten des Marktfrucht- und des Biogassystems sind im Anhang dargestellt (Tabelle A 1 bis Tabelle A 10).

Tabelle 10: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
26.08.2011	Grubbern flach	Schlepper 83 kW + Grubber	
13.09.2011	Grubbern tief	Schlepper 83 kW + Grubber	
27.09.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
29.09.2012	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Pal-lazo): 104 kg/ha
27.07.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
27.07.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Die Maschinenausstattung der Modellbetriebe unterscheidet sich aufgrund der Unterschiede bei den Arbeitsverfahren zwischen dem Marktfrucht- und dem Biogassystem: Im Biogassystem wird das Triticalestroh geerntet (Rundballenpresse), das Luzerne-Klee gras geschnitten (Rotationsmä hwerk), abgefahren (Ladewagen) und eingelagert (Radlader) sowie die Gärreste ausgebracht (vgl. Tabelle 11). Arbeitszeitbedarf und Maschinenkosten werden mit aktuellen Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL 2016a, KTBL 2016b, KTBL 2012b) kalkuliert. Der Zeitbedarf der Arbeitsverfahren berücksichtigt neben der eigentlichen Arbeitszeit auch Rüst- und Wegezeit, Wartezeit, Verlustzeit und Nebenzeit (Wenden). Die variablen Maschinenkosten setzen sich aus Betriebsstoffen (Diesel, Schmiermittel), Betriebsmittel (Netz, Pressgarn für Strohernte) sowie Reparaturen zusammen. Die fixen Maschinenkosten beinhalten die Abschreibungs-, Zins- und Versicherungskosten sowie Kosten für die technische Überwachung. Für alle Zinsansätze bzw. Zinskostenberechnungen wird ein Zinssatz von 4 % angenommen. Es erfolgt eine leistungsabhängige Abschreibung anhand des technischen Nutzungspotentials gemäß KTBL (2016a, 2016b, 2012b). Es wird davon ausgegangen, dass die Maschinen am Ende ihrer technischen Nutzungsdauer keinen Restwert aufweisen. Bei der Kalkulation wird nicht zwischen betriebseigenen und -fremden Maschinen unterschieden. Kann eine Maschine auf einem Betrieb nicht an der Auslastungsschwelle genutzt werden, so wird davon ausgegangen, dass diese überbetrieblich eingesetzt wird. Damit sind die Arbeitserledigungskosten nicht abhängig von der Gesamtanbaufläche der Modellbetriebe.

Tabelle 11: Maschinenausstattung der Modellbetriebe des Marktfruchtsystems und der Biogassysteme

Einsatz	Maschine	Technische Parameter	Marktfrucht-system	Biogas-system
Schlepper	Schlepper 1	83 kW	X	X
	Schlepper 2	67 kW	X	X
Bodenbear-beitung	Anbaudrehpflug mit Pa-cker	Arbeitsbreite 1,4 m	X	X
	Grubber	Arbeitsbreite 3 m	X	X
Saatbeetbe-reitung und Saat	Kreiseleggen-Sämaschi-nen-Kombination	Arbeitsbreite 3 m	X	X
Düngung	Frontlader	1 300 daN, 45 kW	X	X
	Mineraldüngerschaufel	0,55 m ³	X	X
	Anhängeschleuder-streuer	4 m ³ , Arbeitsbreite 15 m	X	X
Wirtschafts-düngeraus-bringung	Pumptankwagen mit Schleppschlauchvertei-ler	10 m ³ , Arbeitsbreite 15 m		X
Mähdrusch und Körner-transport	Mähdrescher	200 kW, Arbeitsbreite 6 m	X	X
	Dreiseitenkippanhänger (Doppelzug)	je 14 t	X	X
Mechanische Pflege und Pflanzen-schutz	Hackgerät	Arbeitsbreite 3 m	X	X
	Striegel	Arbeitsbreite 12 m	X	X
	Mulcher	Arbeitsbreite 3 m	X	X
Futterwerbung	Rotationsmähwerk	Arbeitsbreite 3 m		X
	Kreiselzettwender	Arbeitsbreite 7,5 m		X
	2-Kreiselschwader-Mit-tenschwader	Arbeitsbreite 7,5 m		X
	Rundballenpresse	Ballen 1,8 m, 395 kg		X
Futterbergung	Ladewagen	25 m ³ , 7 t		X
	Radlader	13,5 t, 105 kW		X
	Leichtgutschaufel	4 m ³		X

Die Höhe des Stundenlohns ist angelehnt an den tariflichen Bruttolohn eines Landarbeiters mit abgeschlossener Berufsausbildung und wird mit 12,41 € AKh⁻¹ angenommen (KTBL 2012b, BSH 2014, MAIS 2014). Zuzüglich der durchschnittlichen Lohnnebenkosten in Höhe von 36 % (Bereich: 23-49 %) als Zuschlag zum Bruttolohn (KTBL 2012b), ergeben sich Gesamtlohnkosten in Höhe von 16,87 € AKh⁻¹. Es wird nicht zwischen angestellten Arbeitern und Familienarbeitskräften bzw. Betriebsleiter unterschieden. Für weitere allgemeine Betriebsarbeiten (v.a. Betriebsleiteraufgaben) werden 4,4 AKh ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

Als Flächenkosten werden 524 € ha⁻¹ a⁻¹ für die Pacht bzw. als Pachtansatz angesetzt; dies entspricht dem Durchschnitt für neu gepachtetes Ackerland in Bayern im Jahr 2016 (BLS 2017b). Außerdem werden weitere 10 € ha⁻¹ a⁻¹ für sonstige Flächenkosten berücksichtigt.

Die Kosten für Maschinenhallen sowie sonstige bauliche Anlagen werden anhand der Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL 2012b) kalkuliert.

Die Allgemeinen Kosten beinhalten alle jährlichen Kosten, die nicht den einzelnen Betriebszweigen zuordenbar sind. Es werden insgesamt 39,00 € ha⁻¹ für allgemeine Versicherungen (Betriebshaftpflicht, Feuerversicherung für Maschinen und technische Anlagen, Gebäudebrandversicherung, Elementarschadenversicherung) und Beiträge (Bauernverband, Berufsgenossenschaft, Maschinenring) angesetzt. Für die Beratung werden Kosten in Höhe von 35,50 € ha⁻¹ und für den sonstigen Betriebsaufwand (Telefon, Allgemeine Transporte, PKW, Buchführung, Kleingeräte) 62,00 € ha⁻¹ angenommen (KTBL 2012b).

3.1.4.3. Modellbiogasanlagen

Im Ökolandbau finden sich unterschiedliche Biogasanlagen in Bezug auf die Substratzusammensetzung, die technische Ausführung der Anlage und die Anlagengröße (vgl. Kapitel 2.3). Folglich können die Forschungsfragen nicht anhand einer Modellbiogasanlage untersucht werden; Betrachtungen unterschiedlicher Anlagentypen/-größen sind notwendig. Die acht definierten Modellbiogasanlagen unterscheiden sich vorrangig anhand ihrer Größe und der eingesetzten Substrate (Tabelle 12). Das eigenbetriebliche Substrat ist bei jeder Biogasanlage Luzerne-Kleegras. Die Ko-Substrate bzw. zugekauften Substrate sind Rindergülle, -mist und / oder Maissilage, die zur Auslastung der Anlagen bzw. zur Prozessstabilisierung zugekauft werden.

Die Modellbiogasanlagen 1 bis 4 bzw. deren dazugehörigen Betriebssysteme (Tabelle 12) sind so definiert, dass die Größe der Biogasanlage und die Anbaufläche jeweils im gleichen Verhältnis stehen, das zu den Bedingungen (eigenbetriebliches Substratmenge und Gärrestmenge je Flächeneinheit, 1/5 der Anbaufläche für Luzerne-Kleegras) des Systemversuchs Viehhausen passt. Bei der Bemessung der Menge der Gärrestdüngung im Systemversuch Viehhausen wird angenommen, dass ca. 70 bis 80 % der gedüngten Stickstoffmenge der äquivalenten Stickstoffmenge des geernteten LGKs entspricht. Bei den Anlagen 1 bis 4 werden demnach ca. 85 % der Substrate (bei Betrachtung der Frischmasse) durch das eigenbetriebliche Luzerne-Kleegras gestellt. Insbesondere bei den größeren Anlagen wird ein Zusammenschluss von mehreren nahgelegenen Betrieben notwendig sein.

Ausgehend von dem Betriebssystem der Anlage 2 sind die Betriebssysteme der Anlagen 5 und 6 konzipiert. Bei gleichbleibender Anbaufläche (200 ha) wird die Modellbiogasanlage verdoppelt (150 kW_{el}, Anlage 5) bzw. vervierfacht (300 kW_{el}, Anlage 6). Als zusätzliches Substrat wird Rindergülle hinzugenommen. Bewertet am Gesamtmethanertrag der Substrate nimmt Rindergülle bei diesen beiden Anlagen den größten Anteil ein. Bei Anlage 5 stammen ca. 48 % des Gesamtmethanertrags aus der Rindergülle, bei der Anlage 6 72 %. Durch Vergrößerung der Anlage bzw. den höheren Fremdsubstrateinsatz bei gleichbleibender Anbaufläche ergibt sich ein Überschuss an Gärresten im Vergleich zur tatsächlich ausgebrachten Menge im Systemversuch Viehhausen. Auf die Gesamt-N-Menge bezogen sind dies bei Anlage 5 ca. 50 % und bei Anlage 6 ca. 75 %. Eine Modellierung zunehmender Gärrestmengen durch Substratzukauf ist mit den Versuchsergebnissen aus dem Systemversuch Viehhausen nicht möglich. Hier wird deshalb davon ausgegangen, dass diese Gärreste kostenfrei ab Biogasanlage (u.a. an die Substratlieferanten der Rindergülle) abgegeben werden. Für die Abgabe des Gärrestes wird kein Erlös angesetzt. Gleiches gilt im Folgenden auch für die Anlagen 7 und 8.

Ausgehend von dem Betriebssystem der Anlage 6 ist das Betriebssystem der Anlage 7 konzipiert (300 kW_{el}, 200 ha), jedoch wird als Ko-Substrat ausschließlich (konventionelle) Maissilage eingesetzt. Gemessen am Gesamtmethanertrag der Substrate nimmt Maissilage einen Anteil von ca. 77 % ein. Diese Modellbiogasanlage wird trotz des hohen Anteils an hinzugekommener Maissilage betrachtet, da solche Biogasanlagen (Größe und Substrate) in der Praxis auf ökologisch wirtschaftenden Betrieben existieren (vgl. Kapitel 2.3).

Das Betriebssystem der Anlage 8 ist definiert, um die Situation von kleinen Gülleanlagen (bis 75 kW_{el}) zu beschreiben. Die Realisierung von den Modellbiogasanlagen 5, 6 und 8 ist damit nur möglich, wenn gesichert hohe Mengen an Rindergülle in naher Umgebung zur Verfügung stehen.

Tabelle 12: Gesamtanbaufläche der Betriebssysteme, durchschnittlicher Substratmix der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014) und Gärrestabgabe

Anlage	installierte Leistung	Gesamtanbaufläche	Luzerne-Klee gras	Rinder-gülle	Rinder-mist	Mais-silage ^{a)}	Gärrestabgabe ^{b)}
	kW _{el}						
1	25	67	478 (86 %)		29 (3 %)	55 (11 %)	Nein
2	75	200	1.435 (84 %)		108 (3 %)	203 (13 %)	Nein
3	150	400	2.870 (87 %)		159 (3 %)	298 (10 %)	Nein
4	300	800	5.740 (92 %)		196 (2 %)	366 (6 %)	Nein
5	150	200	1.435 (43 %)	9.430 (48 %)	108 (2 %)	203 (7 %)	Ja
6	300	200	1.435 (23 %)	27.249 (72 %)	108 (1 %)	203 (4 %)	Ja
7	300	200	1.435 (23 %)			4.305 (77 %)	Ja
8	75	50	359 (21 %)	8.172 (79 %)			Ja

Anmerkung: ^{a)} Es wird unterstellt, dass es sich um konventionell produzierte Maissilage handelt. ^{b)} Eine Gärrestabgabe erfolgt, wenn die anfallenden Mengen (Stickstoff) die im Versuch ausgebrachten Mengen übersteigen. ^{c)} Anteil am Gesamtmethanertrag pro Jahr der Modellbiogasanlagen (Berechnungsgrundlage vgl. Tabelle 13)

Alle Biogasanlagen sind konform mit der EU-Ökoverordnung (EG) 834/2007. Die Biogasanlagen 1 bis 4 entsprechen zusätzlich den Richtlinien der Anbauverbände Naturland und Bioland. Es ist dabei unerheblich, ob der Rinderstallmist aus konventioneller oder ökologischer Land-

wirtschaft stammt. Die Biogasanlagen 5, 6 und 8 entsprechen den Richtlinien der Anbauverbände Naturland und Bioland nur, wenn die hinzugenommene Rindergülle aus ökologischer Landwirtschaft stammt. Biogasanlage 7 entspricht nicht den Richtlinien der Anbauverbände Naturland und Bioland, wegen des hohen Anteils konventioneller Maissilage im Substratmix. Der Demeter-Richtlinie kann nur Biogasanlage 8 entsprechen, wenn die Rindergülle aus einem Kooperationsbetrieb stammt. Bei den hohen angenommenen Mengen an Wirtschaftsdünger als Ko-Substrat muss in der Regel jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich überwiegend um konventionellen Wirtschaftsdünger handelt.

Als Kosten für Maissilage wird der durchschnittliche Marktpreis von 2010 bis 2014 für den Feldbestand zur Ernte angenommen. Dieser beläuft sich auf 7,24 € dt TM^{-1} (LFL 2014). Hinzu kommen die Kosten der Ernte, des Transports und der Einlagerung. Für das Biogassystem 4 wird von einer Transportstrecke der Maissilage von 10 km ausgegangen, für das Biogassystem 7 von 20 km (aufgrund der höheren Menge). Für alle anderen Biogassysteme wird eine Transportentfernung von 5 km kalkuliert. Die Kosten der Ernte, des Transports und der Einlagerung sind mit Kalkulationsdaten ermittelt (KTBL 2016a), genauso wie die Transportkosten von Rinderstallmist und Rindergülle. Für Rinderstallmist wird mit einer Transportentfernung von 5 km gerechnet. Die Transportentfernung für die Rindergülle beträgt in den Biogassystemen 5 und 8 jeweils 10 km und im Biogassystem 6 20 km. Für Rinderstallmist und Rindergülle fallen keine weiteren Kosten an.

Zur Berechnung des Methanertrags werden Standardwerte aus der Literatur (KTBL 2012b, KTBL 2013) verwendet (vgl. Tabelle 13), gleiches gilt für den Heizwert von Methan⁷.

Tabelle 13: Eigenschaften der eingesetzten Substrate

	TM-Gehalt	oTM-Gehalt	Biogasertrag	Methananteil	Methanertrag
	% von FM	% von TM	$m^3 (t \text{ oTM})^{-1}$	%	$m^3 (t \text{ TM})^{-1}$
Luzerne-Kleegrassilage	35	90	580	55	287
Maissilage	35	95	650	52	321
Rinder-Stallmist	25	85	450	55	210
Rindergülle	10	80	380	55	167

Die technischen Annahmen zu den Biogasanlagen (vgl. Tabelle 14) beruhen auf Kalkulationswerten (KTBL 2014). Es wird davon ausgegangen, dass die Modellbiogasanlagen 8.000 Vbh in jedem Betrachtungsjahr erreichen. Bei dem 25 kW_{el} BHKW handelt es sich typischerweise für diese Größenklasse um einen Zündstrahlmotor, bei den anderen Modell-BHKWs um Gas-Otto-Motoren. Durch den Gesamtwirkungsgrad des BHKWs (Summe aus elektrischem und thermischen Wirkungsgrad) wird die Höhe der Energieverluste durch die Umwandlung berechnet (v.a. Methanschlupf, Wärmeverluste). Der Gesamtwirkungsgrad der BHKWs nimmt mit steigender Leistung zu, wobei bei der Planung aufgrund der angenommenen Fahrweise (stromgeführt) auf einen hohen elektrischen Wirkungsgrad und weniger auf den thermischen

⁷ Für Methan wird ein Heizwert in Höhe von 9,97 kWh je Nm^3 angesetzt (FNR 2013).

Wirkungsgrad Wert gelegt wird. Für den Stromertrag werden zusätzlich Übertragungsverluste (BHKW- und Transformationsverluste) in Höhe von 1 % berücksichtigt (KTBL 2012b). Weiterhin wird für die Modellanlage in Anlehnung an Spatz et al. (2011) und KTBL (2012b) ein Eigenstromverbrauch in Höhe von 11% (Anlagen 1 bis 4: Wegen sehr hohem Anteil an Kleegras-silage und Stallmist im Substratmix besteht ein stärkerer Pump- und Rührbedarf.), 10 % (Anlage 6), 9 % (Anlagen 5 und 7) bzw. 8 % (Anlage 8, hoher Gülleanteil) der Brutto-Strommenge angesetzt. Die Eigenstrommenge berücksichtigt alle für den Anlagenbetrieb notwendigen elektrischen Verbraucher: Rühr- und Fördertechnik, Komponenten des BHKWs (z.B. Lüfter, Heizkreis-, Kühlkreis-pumpen), Lüftung und Beleuchtung von Anlagenräume sowie Steuerungs- und Regelungstechnik.

Mit Ausnahme der Anlage 8 nutzen alle Modellbiogasanlagen den produzierten Strom und die produzierte Wärme zur Eigenversorgung. Die Nettostrommenge wird verkauft, genauso wie 50 % der produzierten Wärmemenge, welche nicht für die Eigenbeheizung der Biogasanlage notwendig ist. Die Anlage 8 dagegen kauft Strom für den Eigenbedarf zu einem Preis von 15 Cent kWh⁻¹ zu und verkauft die Bruttostrommenge aufgrund der hohen Einspeisevergütung für kleine Gülleanlagen bis 75 kW_{el}.

Tabelle 14: Technische Parameter der Modellbiogasanlagen

Anlage	Instal-	Gesamtan-	Wirkungs-	Wirkungs-	Eigen-	Netto-	Wärme-
	lierte						
	Leistung		elektrisch	ther-	bedarf ^{a)}	menge ^{b)}	
	kW _{el}	ha	%	misch	%	MWh _{el}	MWh _{th}
				%	%		
1	25	67	36,3 %	36,1 %	11 %	176	99
2	75	200	35,2 %	50,0 %	11 %	528	426
3	150	400	36,8 %	49,0 %	11 %	1.056	799
4	300	800	38,7 %	47,7 %	11 %	2.112	1.479
5	150	200	36,8 %	49,0 %	9 %	1.080	799
6	300	200	38,7 %	47,7 %	10 %	2.136	1.479
7	300	200	38,7 %	47,7 %	9 %	2.160	1.479
8	75	50	35,2 %	50,0 %	8 %	546	426

Anmerkung: ^{a)} Eigenstrombedarf abhängig von Substratmix (notwendige Pumpenleistung) ^{b)} Die Nettostrommenge stellt die produzierte Strommenge abzüglich Verlust und dem Eigenstrombedarf dar.

Die Investitionen sind anhand von Kalkulationsdaten angenommen (KTBL 2014). Abhängig von der Größe der Anlage und der Ausstattung belaufen sich die spezifischen Investitionskosten der Modellbiogasanlage auf 4.370 bis 19.550 € kW_{el}⁻¹ (vgl. Tabelle 15) ohne Siloanlage. Die spezifischen Investitionskosten steigen mit sinkender Anlagengröße überproportional an. Mögliche Einsparungen bei den Investitionen kleinerer Biogasanlagen sind kaum möglich und seltene Anlagengrößen (z.B. deutlich unter 75 kW_{el}) können bei der Herstellung nicht durch Einsparungen aufgrund von hohen Stückzahlen profitieren.

Für die Modellbiogasanlagen 1 bis 4 wird aufgrund des hohen Anteils von Klee gras und Stallmist im Substratmix ein Investitionsaufschlag von 15% berücksichtigt (z.B. aufwendigere Rührtechnik, Pumpen), im Vergleich zu gleichgroßen Anlagen mit einem hohen Maissilage- bzw. Gülleanteil (vgl. Wank und Keymer 2011). Die Gesamtinvestitionskosten der Biogasanlagen setzen sich durchschnittlich aus Investitionen für bauliche Anlagen in Höhe von ca. 44 % und Investitionen für Anlagentechnik in Höhe von 56 % zusammen (LfL 2011a, FNR 2009). Als Abschreibungsdauer werden für technische Anlagen 10 Jahre und für bauliche Anlagen 20 Jahre angenommen (KTBL 2012b). Die Siloanlagen sind so geplant, dass die Substratmenge (Luzerne-Klee gras, Maissilage) für das gesamte Jahr gelagert werden kann. Als Investitionskosten werden Kalkulationswerte verwendet (KTBL 2015). Für alle Zinsansätze bzw. Zinskostenberechnungen wird ein Zinssatz von 4 % angenommen.

Die durchschnittlichen Stromerlöse je kWh (Netto-Strommenge) ergeben sich für die Berechnungen aus dem EEG 2017 mit einer Inbetriebnahme vor dem 1. April 2017 (vgl. Tabelle 15). Bei allen Modellbiogasanlagen wird die Direktvermarktung unterstellt. Die durchschnittlichen Stromerlöse setzen sich zusammen aus den Erlösen der Direktvermarktung (Annahme: durchschnittlicher Börsenpreis 35 € MWh_{el}⁻¹, EEX 2016) und der EEG-Marktprämie. Für die Anlagen größer 100 kW_{el} wird zusätzlich angenommen, dass diese den EEG-Flexibilitätszuschlag in Höhe von 40 € kW⁻¹ installierter Leistung und Jahr erhalten. Die Biogasanlagen 4 und 6 fallen im EEG 2017 unter das Ausschreibungsverfahren. Der Stromerlös je kWh wird dementsprechend mit dem Höchstwert des anzulegenden Wertes im Ausschreibungsverfahren kalkuliert. Die Biogasanlage 7 ist aufgrund des hohen Anteils von Maissilage im Substratmix nicht förderfähig gemäß EEG 2017. Die Stromerlöse, die sich aus dem EEG 2014 ergeben, sind außerdem in Tabelle 15 für weitere Betrachtungen aufgeführt (Inbetriebnahme im Jahr 2014). Auch hier wird für alle Modellbiogasanlagen die Direktvermarktung unterstellt. Für alle Modellbiogasanlagen wird ein Wärmepreis von 20 € MW_{th}⁻¹ angenommen.

Tabelle 15: Investitionen der Modellbiogasanlagen und Stromerlöse

Anlage	Installierte Leistung kW _{el}	Gesamtanbaufläche ha	Gesamtinvestitionen (ohne Silo) € kW _{el} ⁻¹	Durchschnittliche Stromerlöse	
				EEG 2014 ^{a)}	EEG 2017 ^{a)}
1	25	67	19.550	13,66	13,32
2	75	200	7.790	13,66	13,32
3	150	400	5.790	9,62	9,44
4	300	800	5.022	9,16	10,30 ^{b)}
5	150	200	5.035	9,62	9,44
6	300	200	4.370	9,16	10,30 ^{b)}
7	300	200	4.370	9,16	3,50 ^{c)}
8	75	50	6.780	23,73	23,14

Anmerkung: ^{a)} Inbetriebnahme der Anlagen vor der ersten Degressionsstufe im jeweiligen EEG, ^{b)} Ermittlung mit dem Höchstwert des anzulegenden Wertes bei Ausschreibungsverfahren (14,88 Cent kWh⁻¹), ^{c)} aufgrund des Substratmix nicht förderfähig gemäß EEG 2017, deshalb nur die Stromerlöse aus der Direktvermarktung angesetzt

Für den Anlagenunterhalt (Wartung und Instandsetzung) werden für die baulichen Anlagen jährlich 1 % der Investitionskosten angesetzt und für technische Anlagen 5 %. Die Kosten für die Instandhaltung der Modell-BHKWs werden separat anhand von Kalkulationswerten angesetzt (ASUE 2015).

In den Betriebskosten sind die Personalkosten berücksichtigt. Die Arbeitszeit wird anhand von Kalkulationsdaten (KTBL 2014) festgelegt (vgl. Tabelle 16). Die (kalkulatorische) Personalkosten werden mit 16,78 € h⁻¹ angenommen (vgl. Kapitel 3.1.4.2).

Tabelle 16: Arbeitszeitbedarf, Pachtkosten des Grundstücks und Maschinenkosten in für den Betrieb der Modellbiogasanlagen

Anlage	1	2 / 8	3 / 5	4 / 6 / 7
Installierte Leistung in kW _{el}	25	75	150	300
Jahresarbeit in h a ⁻¹	513	613	625	765
Pacht Grundstück in € a ⁻¹	300	500	700	900
Maschinenkosten zur Beschickung in € a ⁻¹	1.976	3.680	4.797	8.414

Als Pachtkosten für das Betriebsgrundstück werden 500 bis 900 € a⁻¹ berücksichtigt. Die Maschinenkosten (Abschreibung, Zins, Reparatur / Wartung, Betriebsstoffe) für die Beschickung der Biogasanlage werden anhand von Kalkulationsdaten mit insgesamt 3.680 € bis 8.414 € a⁻¹ (KTBL 2014, KTBL 2016a) ermittelt.

Die allgemeinen Kosten beinhalten alle jährlichen Kosten, die nicht den einzelnen Betriebszweigen zuordenbar sind (z.B. Verwaltung, Beiträge) und werden mit 750 € a⁻¹ kalkuliert (KTBL 2014). Die Kosten für die Anlagenversicherung werden mit 1 % auf Investitionssumme angenommen. Unter sonstige Betriebskosten wird der Aufwand für Gutachten, Analysen, und Betriebsstoffe mit 2.000 € a⁻¹ angesetzt.

Neben den acht Modellbiogasanlagen wird in der Variante 9 ein externes Biogassystem analysiert. In diesem wird das angebaute Luzerne-Klee gras als Bestand zur Selbsternte an eine betriebsfremde Biogasanlage kostenfrei abgegeben und erhält im Gegenzug die im Versuch unterstellte Menge an Gärresten zurück (Lieferung bis Hof). Für das externe Biogassystem wird angenommen, dass die Biogasanlage gemäß den gesetzlichen Bestimmungen (EU-Ökoverordnung (EG) 834/2007) betrieben wird, so dass der Modellbetrieb die Gärreste zur Düngung seiner nicht-legumen Marktfrüchte verwenden darf.

3.1.5. Risikoanalyse

Mit Hilfe des EXEL-basierten Planungsmodells (vgl. Kapitel 3.1.3) werden anhand einer Risikoanalyse die Stabilität der Unternehmervgewinne sowie die Wahrscheinlichkeit eines „Mehrgewinns“ überprüft. Damit wird analysiert, wie sich die Integration der Biogasanlage - als eine Diversifizierung im Betrieb - auf das gesamtbetriebliche Risiko bei Berücksichtigung der innerbetrieblichen Effekte auswirkt. Zunächst wird für die Biogassysteme mit eigener Biogasanlage

eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wird die Auswirkung einzelner Parameter auf den Unternehmensgewinn überprüft, die vor einer Investitionsentscheidung für eine Biogasanlage festgelegt werden können. Im Anschluss erfolgt eine Monte-Carlo-Simulation für alle Biogassysteme und das Marktfruchtssystem mit Parametern, die zeitlich erst nach einer Entscheidung für oder gegen eine Biogasanlage eintreten.

3.1.5.1. Sensitivitätsanalysen

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse werden in dieser Arbeit die Auswirkungen einzelner Parameterabweichungen der Biogasanlage auf den Plan-Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs dargestellt. Hierfür werden Parameter verwendet, die vom Biogasanlagenbetreiber vor der Investitionsentscheidung beeinflussbar sind (Investitionskosten, Wärmeabsatzmenge und Wärmepreis). Außerdem wird mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse dargestellt, wie stark die Ertrags-effekte ausfallen müssen, um eine Vorteilhaftigkeit der Biogassysteme zu erreichen.

Investitionen der Biogasanlage

Die Höhe der Gesamtinvestitionen der Biogasanlage ist beeinflussbar über Eigenleistung und vorhandene Infrastruktur bzw. Mobiltechnik. Auch durch das Einholen mehrerer Angebote von Herstellerfirmen und das Verhandeln der Angebote können Vorteile bei den Investitionskosten entstehen. Auf der anderen Seite können Zeitdruck beim Bau, schlecht verhandelte Angebote und besondere Auflagen (z.B. in Schutz-, Hochwassergebieten) einen Anstieg der Investitionskosten bedeuten. In der Sensitivitätsanalyse wird eine Erhöhung und Minderung von jeweils 25 % ausgehend von den Plan-Investitionen untersucht.

Im Planungsmodell bestimmen die Investitionskosten über die Abschreibung, die Zinskosten sowie die Instandhaltungskosten den Unternehmensgewinn der Biogasanlage bzw. des Gesamtbetriebs (vgl. Abbildung 5).

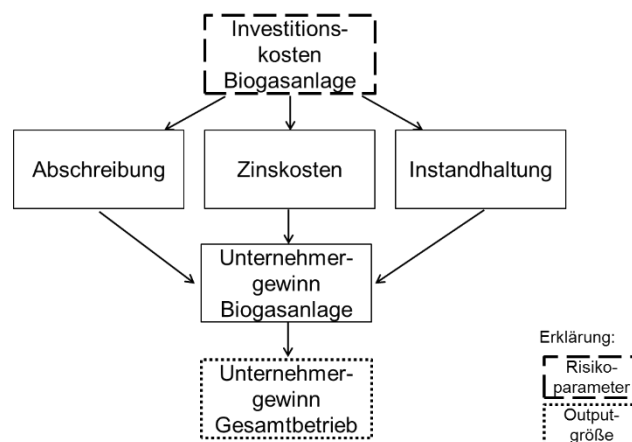


Abbildung 5: Zusammenhang von den Investitionskosten (Biogasanlage) und dem Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs

Wärmepreis und -menge

Einen bedeutenden Anteil an den Erlösen einer Biogasanlage kann der Wärmeverkauf erbringen. In den Fallstudien ist der Wärmepreis mit $20 \text{ € MWh}_{\text{th}}^{-1}$ angesetzt. 50 % der produzierten, in MWh_{th} angegebenen Wärme können verkauft werden. Die Wärmekonzepte von Biogasanlagen variieren in der Praxis stark und somit auch ihr ökonomischer Beitrag zum Gesamtergebnis. Dementsprechend werden die beiden Parameter Wärmepreis und -absatzmenge in der Sensitivitätsanalyse betrachtet. Die Wärmeabsatzmenge wird dabei zwischen 0 % und maximal 60 % variiert. Die Auswirkungen der Veränderung des Wärmepreises werden in einem Bereich zwischen $0 \text{ € MWh}_{\text{th}}^{-1}$ und $85 \text{ € MWh}_{\text{th}}^{-1}$ untersucht ⁸.

Im Planungsmodell bestimmen die verkaufte Wärmemenge sowie der erzielte Wärmepreis die Erlöse aus dem Wärmeverkauf und damit den Unternehmergewinn der Biogasanlage bzw. des Gesamtbetriebs (vgl. Abbildung 6).

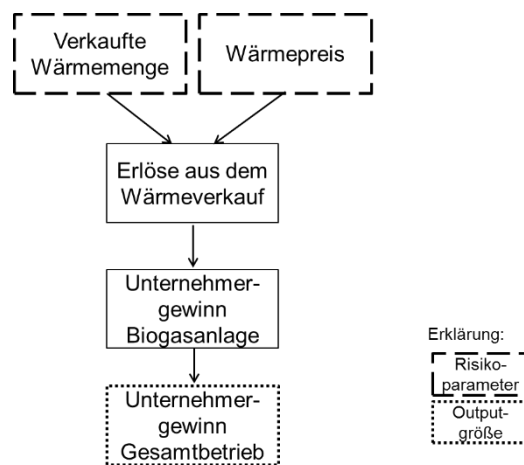


Abbildung 6: Zusammenhang von verkaufter Wärmemenge bzw. Wärmepreis und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

Bei der Sensitivitätsanalyse (Investitionskosten, Wärmeabsatzmenge, -preis) wird mit dem arithmetischen Mittel der Ernteerträge aus dem Systemversuch Viehhausen über den gesamten Untersuchungszeitraum (2010 bis 2014) gerechnet (vgl. Tabelle 17).

Ertragseffekte

Zwar sind die Ertragseffekte durch die Gärrestedüngung nicht vor der Entscheidung für oder gegen die Integration einer Biogasanlage in das Betriebssystem beeinflussbar, dennoch sollten sich Landwirte vor dieser Entscheidung bewusstmachen, welche Ertragseffekte notwendig sind, so dass das Gesamtbetriebssystem durch die Biogasanlage verbessert wird. Diese Untersuchung soll auch für eine bessere Übertragung der Ergebnisse auf landwirtschaftliche Betriebe dienen. Hierfür werden die arithmetischen Mittel der Ernteerträge aus dem Systemversuch Viehhausen über den gesamten Untersuchungszeitraum (2010 bis 2014) als Datenbasis

⁸ Der durchschnittliche Wärmepreis für einen Modellkunden mit einer Leistung von $160 \text{ kW}_{\text{th}}$ sowie 1.500 Vbh a^{-1} liegt in Deutschland derzeit bei $84,28 \text{ € MWh}_{\text{th}}^{-1}$ (AGFW 2015).

verwendet (vgl. Tabelle 17). Der Ertragseffekt wird zwischen 0 % und 140 % variiert: 0 % bedeutet, dass keine Ertragseffekte bei den Marktfrüchten im Biogassystem durch die Gärrestedüngung auftreten (= Erträge des Marktfruchtensystems). 100 % bedeutet, dass die Ertragseffekte eintreten, die im Systemversuch Viehhausen gemessen wurden (= Erträge des Biogassystems). 140 % bedeutet einen um 40 % höheren Ertragseffekt, als im Systemversuch Viehhausen gemessen wurde. Die Marktfrüchterträge bestimmen die Gesamterlöse der Marktfrüchte und damit den Unternehmergewinn des Ackerbaus bzw. des Gesamtbetriebs (vgl. Abbildung 7).

3.1.5.2. Monte Carlo Simulation

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation wird in dieser Arbeit das unternehmerische Risiko anhand des Unternehmergewinns des Gesamtbetriebs analysiert, das zum einen von Risikoparametern der Biogaserzeugung (z.B. realisierter Wirkungsgrad des BHKWs) ausgeht, die erst nach der Investition in eine Biogasanlage auftreten. Zum anderen werden in der Monte-Carlo-Simulation aber auch gesamtbetriebliche Risiken berücksichtigt, die sowohl das Biogassystem als auch das Marktfruchtensystem betreffen (z.B. Preise für Marktfrüchte) und auch erst nach einer Investitionsentscheidung eintreten. Zur technischen Umsetzung der stochastischen Simulation wird zu dem EXCEL-basierten Planungsmodell die Risiko- und Analysesoftware (= Simulationsprogramm) @RISK (PALISADE 2008) genutzt.

3.1.5.2.1. Methodik

Die grundlegende Methodik der Monte-Carlo-Simulation geht auf Hertz (1964) zurück:

Der erste Schritt beim Aufbau der Monte-Carlo-Simulation ist bereits mit der Erstellung des EXCEL-basierten Planungsmodells erfolgt (vgl. Kapitel 3.1.3). In diesem sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Inputgrößen sowie der zu untersuchenden Outputgrößen (= Unternehmergewinn des Gesamtbetriebes, Mehrgewinn) formuliert.

Zur Generierung von Zufallsgrößen mit dem Simulationsprogramm, müssen den variablen und unsicheren Inputgrößen (= Risikoparameter) Wahrscheinlichkeitsfunktionen zu Grunde gelegt werden. Damit wird jedem Stichprobenergebnis der Zufallsvariable X eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeteilt (Precht et al. 2005). In der Realität überwiegen stetige Zufallsvariablen. Bei den Zufallsvariablen liegen also meist keine Einzelwahrscheinlichkeiten für den Eintritt eines bestimmten Ereignisses vor, sondern es existieren Dichtefunktionen. Die Dichtefunktion $f_{(x)}$ zeigt, welcher Bereich mit größter Wahrscheinlichkeit auftritt. Die dazugehörige Verteilungsfunktion $F_{(x)}$ wird durch die Bildung des Integrals unter der Dichtefunktion ermittelt. Die Werte der Verteilungsfunktion sind stets im Intervall $[0; 1]$ zu finden.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms wird eine gleichverteilte, stetige Pseudozufallszahl z im Intervall $[0; 1]$ generiert. Dieser Pseudozufallszahl kann der Zufallswert für ein Stichprobenergebnis zugeordnet werden. Die Lösung erfolgt über die Umkehrfunktion $F^{-1}_{(x)}$ der Verteilungsfunktion: Die Pseudozufallszahl z wird hierfür in die Umkehrfunktion $F^{-1}_{(x)}$ eingesetzt. Dem y_1 -Wert wird damit aus dem Intervall $[0; 1]$ der dazugehörige x -Wert $x_{(1)}$ zugeordnet (Rauh et al. 2007, Finke 2005, Hertz 1964).

Die mit dem Simulationsprogramm erzeugten Stichproben aller Inputvariablen können dann in die Berechnungsfunktion eingesetzt werden. Dabei erhalten alle unabhängigen Inputgrößen eigens berechnete Zufallswerte, so dass ein völlig zufälliges Szenario berechnet wird (Hertz 1964). Der Simulationsvorgang ist zu wiederholen, bis eine repräsentative Anzahl an Zufallsergebnissen vorliegt (Hertz 1964). Für alle festgelegten Risikoparameter (Zufallsvariablen) werden gemäß deren geschätzten Verteilungen computergestützt Zufallszahlen gezogen und die aggregierten Zielgrößen (Unternehmergeinn, „Mehrgewinn“) berechnet. In dieser Arbeit werden 10.000 Wiederholungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Simulation bilden die Grundlage für die Darstellung der kumulierten relativen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Outputgrößen (= Unternehmergeinn des Gesamtbetriebs, Mehrgewinn). Diese relativen Häufigkeiten entsprechen näherungsweise der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Outputgröße. Damit kann eine Aussage dazu getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein gewisser Zielwert der Outputgröße erreicht werden kann (Hertz 1964).

Für die Risikoanalyse des Biogassystems ist zunächst die Wahrscheinlichkeit, einen positiven Unternehmergeinn im Gesamtbetrieb erwirtschaften zu können, von Bedeutung. Große Schwankungsbreiten bei der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Unternehmergeinne werden zusätzlich als Risiko angesehen, aufgrund der schwierigeren Planungssicherheit.

Die Wahrscheinlichkeit des „Mehrgewinns“ der Biogassysteme durch die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses Betriebssystem zeigt, welche Risikobereitschaft ein Landwirt bei einer Investitionsentscheidung für eine Biogasanlage eingehen muss.

3.1.5.2.2. Risikoparameter

Im Folgenden werden die Risikoparameter (= Zufallsvariablen) definiert und deren Verteilung dargestellt. In dieser Arbeit wird angenommen, dass alle Zufallsvariablen dreiecksverteilt sind. Die Zusammenhänge der Risikoparameter im Planungsmodell zu der Zielgröße „Unternehmergeinn des Gesamtbetriebs“ des Biogassystems werden graphisch dargestellt. Die Zusammenhänge im Marktfruchtsystem werden beschrieben.

Ertragsdaten aus dem Systemversuch Viehhausen

Die Höhe der Mehrerträge im Biogassystem bestimmt die Vorteilhaftigkeit gegenüber dem Marktfruchtsystem und damit das unternehmerische Risiko. In den Fallstudien werden die Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 analysiert. Für die Monte-Carlo-Simulation werden diese bereits realisierten Ertragseffekte als Dreiecksverteilungen formuliert (vgl. Tabelle 17). Die Minimum-/ Maximum-Werte sind die tatsächlich gemessenen niedrigsten bzw. höchsten Erträge in einer Versuchsparzelle im Untersuchungszeitraum. Der Modalwert ist der Durchschnittswert aller Parzellen ($n = 4$) einer Fruchtart über alle Untersuchungsjahre (2010-2014).

Tabelle 17: Dreiecksverteilung der Ernteerträge (t TM ha⁻¹)

Fruchtart	Minimum	Modalwert	Maximum
Marktfruchtssystem			
LKG		Gemulcht	
Winterweizen	2,08	3,88	5,35
Wintertriticale	2,29	4,41	7,21
Ackerbohne	1,35	2,78	4,22
Winterroggen	2,13	5,27	8,57
Biogassystem			
LKG (Schnitt 1)	2,93	5,65	8,74
LKG (Schnitt 2)	1,29	4,01	12,32
LKG (Schnitt 3)	1,16	3,18	4,85
LKG (Schnitt 4)	0,00	1,43	3,81
Winterweizen	4,02	5,29	6,47
Wintertriticale (Stroh)	4,39 (4,79)	6,46 (7,06)	8,88 (10,72)
Ackerbohne	1,66	3,13	4,27
Winterroggen	2,38	6,70	10,19

Die Marktfruchterträge bestimmen die Gesamterlöse der Marktfrüchte und damit den Unternehmergewinn des Ackerbaus bzw. beim Marktfruchtssystem den Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs. Beim Biogassystem wird der Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs zusätzlich von den Erträgen des Luzerne-Klee gras bestimmt. Die Menge an eigenbetrieblichem Luzerne-Klee gras bestimmt die Substratkosten sowie die notwendige Menge an zugekauften Ko-Substraten und damit nochmals indirekt die Substratkosten (vgl. Abbildung 7).

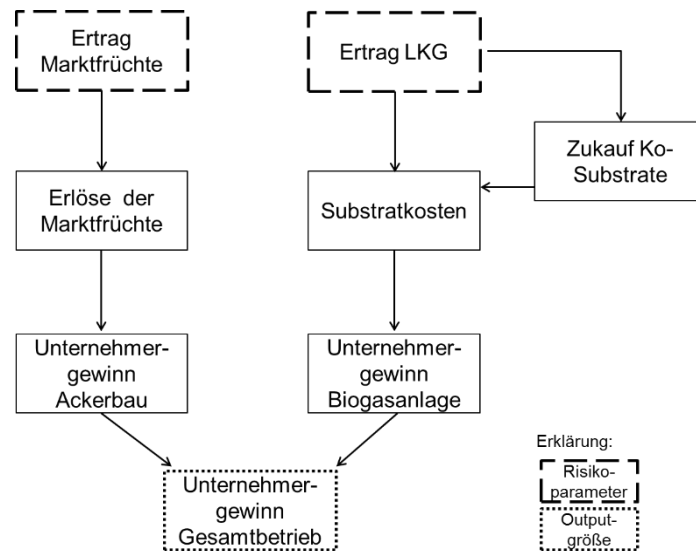


Abbildung 7: Zusammenhang von den Erträgen und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

Preise für Marktfrüchte, Silomais und Stroh

Entwicklungen auf den Märkten stellen Quellen des Risikos für den Erfolg der wirtschaftlichen Tätigkeit dar. Vor allem die Höhe der Preise für Marktfrüchte, Stroh und zum Teil für Silomais bestimmt über die Vorteilhaftigkeit des Biogassystems. Die Verteilungen der Marktpreise werden mit den tatsächlichen Marktpreisen der Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 (LfL 2014) als Dreiecksverteilung beschrieben (vgl. Tabelle 18). Der Modalwert ist der Durchschnittspreis der jeweiligen Marktfrucht im Untersuchungszeitraum (2010-2014). Das Maximum bei dem Preis für Silomais beschreibt das Risiko, dass künftig nur noch ökologisch angebauter Mais in den Biogasanlagen eingesetzt werden darf und ist dementsprechend höher angesetzt (KTBL 2012)

Tabelle 18: Dreiecksverteilungen für die Marktpreise (€ dt FM⁻¹) von Marktfrüchten, Stroh und Silomais

Marktfrucht, Biomasse	Minimum	Modalwert	Maximum
Ökoweizen I	40,09	41,03	42,63
Ökoweizen II	35,69	37,44	39,05
Triticale	28,74	30,86	33,91
Stroh	5,74	7,27	9,32
Ackerbohne	39,18	42,65	46,13
Brotroggen	27,31	30,43	36,13
Silomais (Feldbestand zur Ernte)	1,80	2,53	4,00

Die Preise der Marktfrüchte bestimmen die Erlöse und damit den Unternehmergewinn des Ackerbaus bzw. beim Marktfruchtsystem den Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs. Bei den Biogassystemen, die als Ko-Substrat Silomais verwenden, wird der Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs zusätzlich vom Preis des Silomais bestimmt (vgl. Abbildung 8).

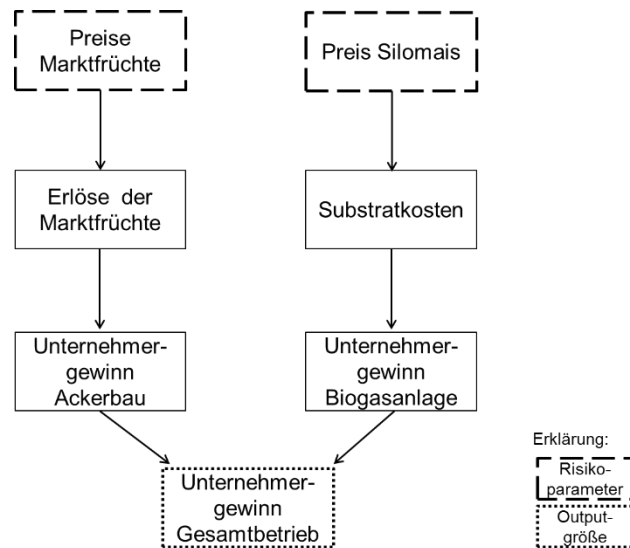


Abbildung 8: Zusammenhang von Marktfrucht- und Substratpreise und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

Preis für Agrardiesel

Der Preis für Agrardiesel richtet sich nach den Kraftstoffmärkten und nach der Besteuerung bzw. Steuerbefreiung. Für die Dreiecksverteilung von Agrardiesel wird der aktuelle Kalkulationswert im Jahr 2016 als Minimalwert verwendet (KTBL 2016a). Der Modalwert berücksichtigt die aktuell wieder steigenden Dieselpreise. Der Maximalwert beschreibt eine jährliche Preissteigerung von 3 % über 20 Jahre (Förderzeitraum EEG), ausgehend vom Modalwert (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Dreiecksverteilung von dem Preis für Agrardiesel

	Minimum	Modalwert	Maximum
Preis Agrardiesel in € l ⁻¹	0,8	0,9	1,6

Der Preis für Agrardiesel beeinflusst als Treibstoff für Schlepper, Erntemaschinen und Transportfahrzeuge die Anbaukosten der Marktfrüchte und des Luzerne-Klee gras und damit den Unternehmergewinn des Ackerbaus bzw. beim Marktfruchtsystem den Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs. Beim Biogassystem bestimmen die Anbaukosten des Luzerne-Klee gras die Substratkosten. Diese werden außerdem über die Ernte bzw. den Transport von Ko-Substraten durch den Preis von Agrardiesel beeinflusst (vgl. Abbildung 9).

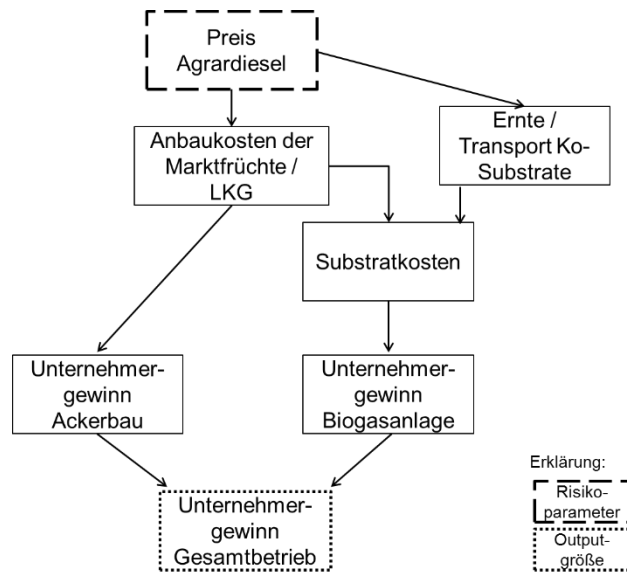


Abbildung 9: Zusammenhang von Agrardieselpreis und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

Risikofaktoren des Biogasprozesses, der Verstromung und der Substratbereitstellung

Für die Risikofaktoren des Biogasprozesses, der Verstromung und der Substratbereitstellung werden Annahmen anhand von Literaturangaben (u.a. KTBL 2013, KTBL 2014, FNR 2009, FNR 2013, Rauh et al. 2007) gewählt. Auf Basis dieser Angaben werden die Dreiecksverteilungen für die Risikofaktoren bestimmt (vgl. Tabelle 20).

Tabelle 20: Dreiecksverteilte Risikofaktoren des Biogasprozesses und des Substratanbaus

	Minimum	Modalwert	Maximum
Volllaststunden des BHKWs pro Jahr	7.000	8.000	8.500
Veränderung des Methanertrags der Biogassubstrate zum Planwert (= Modalwert, 100 %)	90 %	100 %	110 %
Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades zum Planwert (= Modalwert, 100 %)	95 %	100 %	105 %
Veränderung des thermischen Wirkungsgrades zum Planwert (= Modalwert, 100 %)	95 %	100 %	105 %
Veränderung des Eigenstrombedarfs der Biogasanlage zum Planwert (= Modalwert, 100 %)	75 %	100 %	125 %
Verluste Silage (LKG, Mais)	8 %	12 %	16 %
Verluste Marktfrüchte	3 %	5 %	7 %

Die Risikofaktoren des Biogasprozesses wirken sich über die Erlöse des Strom- bzw. Wärmeverkaufs, die Betriebskosten sowie die Substratkosten auf den Unternehmensgewinn des Biogasanlage und des Gesamtbetriebs aus (vgl. Abbildung 10).

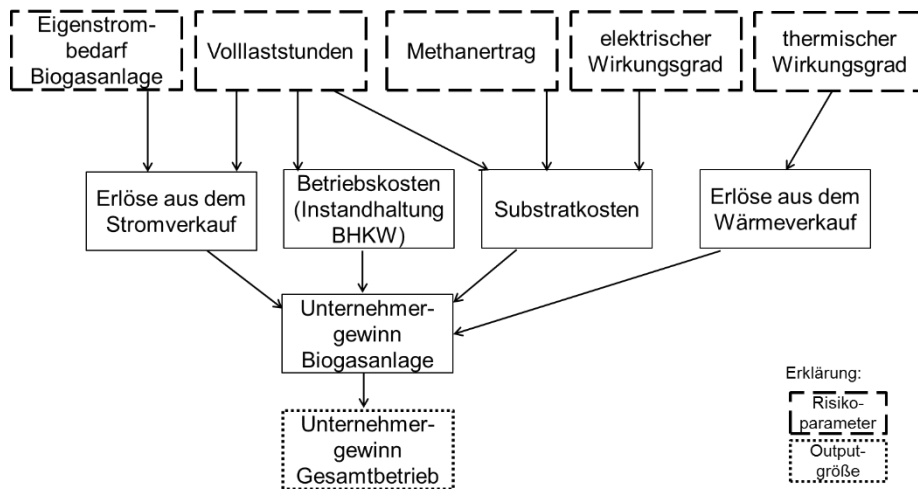


Abbildung 10: Zusammenhang von Eigenstrombedarf, Volllaststunden, Methanertrag, Wirkungsgrad (elektrisch / thermisch) und dem Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs

Die Verluste der Marktfrüchte bestimmen die Gesamterlöse der Marktfrüchte und damit den Unternehmensgewinn des Ackerbaus bzw. beim Marktfruchtensystem den Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs. Beim Biogassystem wird der Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs zusätzlich von den Verlusten bei der Silage (Luzerne-Klee gras und Mais) bestimmt. Die Verluste bestimmen die Menge an eigenbetrieblichem Luzerne-Klee gras und damit die notwendige Menge an Ko-Substraten. Bei Biogassystemen mit dem Ko-Substrat Silomais bestimmen die Verluste zusätzlich die notwendige Menge des Zukaufs als Feldbestand zur Ernte (vgl. Abbildung 11).

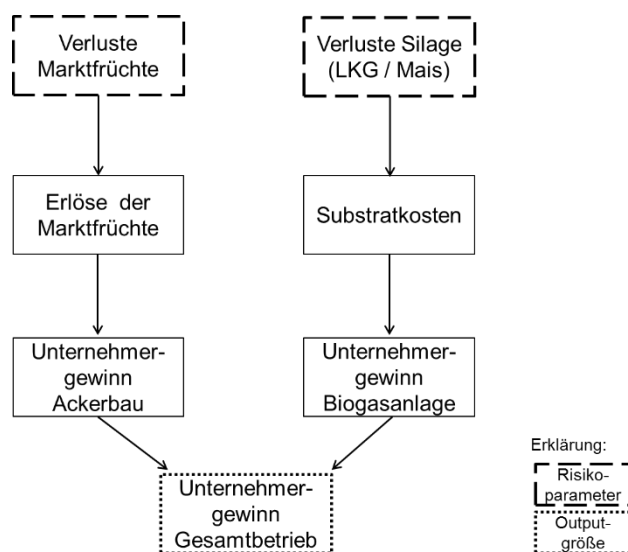


Abbildung 11: Zusammenhang von Verlusten bei Marktfrüchten bzw. Silage und dem Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs

Risikofaktoren der Biogasanlage (Instandhaltung und Abschreibung)

Ein weiterer Risikofaktor bei der Biogaserzeugung ist der Aufwand für die Instandhaltung der Technik, durch außerplanmäßige Reparaturen oder einen erhöhten Verschleiß. Aber auch der komplette Austausch von Anlagenteilen und damit eine verkürzte Abschreibungsdauer stellt ein ökonomisches Risiko dar. In der Praxis hat sich gezeigt, dass insbesondere Biogasanlagen mit einem hohen Anteil faseriger Substrate (Klee gras, Stallmist) störanfällig sind und höhere Instandhaltungskosten verursachen (vgl. Kapitel 2.4). In der Monte-Carlo-Simulation wird für alle Biogasanlagen folgende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Instandhaltungskosten der Technik angenommen (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Dreiecksverteilung der Instandhaltungskosten Technik

	Minimum	Modalwert	Maximum
Instandhaltungskosten Technik in % von den Investitionen	4 %	5 %	8 %

Für alle Biogasanlagen wird in der Monte-Carlo-Simulation folgende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Abschreibungsdauern angenommen (vgl. Tabelle 22). Als Modalwerte werden die Plan-Abschreibungsdauern angesetzt, für technische Anlagen 10 Jahre und für bauliche Anlagen 20 Jahre (KTBL 2012b).

Tabelle 22: Dreiecksverteilung für die Abschreibungsdauern der Biogasanlage

	Minimum	Modalwert	Maximum
Abschreibungsdauer in Jahre für technische Anlagen	6	10	14
Abschreibungsdauer in Jahre für bauliche Anlagen	15	20	25

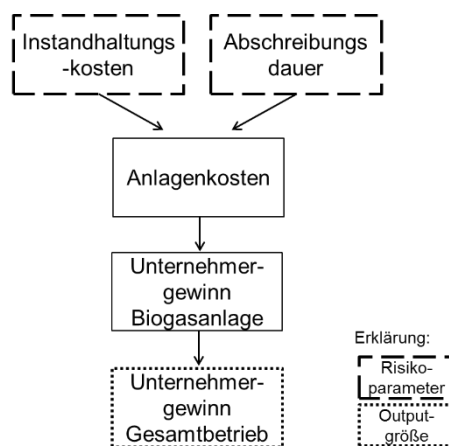


Abbildung 12: Zusammenhang von Instandhaltungskosten sowie Abschreibungsdauer der Biogasanlage und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

Börsenpreis für Strom

Der Börsenpreis für Strom richtet sich nach Angebot und Nachfrage und ist maßgebend für den Verkaufspreis des Stroms der Biogasanlagen mit einer Leistung von über 100 kW_{el}. Für die Dreiecksverteilung wird der aktuelle Börsenpreis (Spotmarkt, PHELIX) von ca. 0,035 € kWh⁻¹ (EEX 2016) als Modalwert verwendet (vgl. Tabelle 23). Der Minimalwert stellt die derzeitigen Tiefstwerte dar (EEX 2016). Der Maximalwert beschreibt eine jährliche Preissteigerung von 3,5 % über 20 Jahre (Förderzeitraum EEG) ausgehend vom Modalwert. Von dieser Strompreissteigerung wird in aktuellen Energieprognosen ausgegangen (z.B. Schlesinger et al. 2014).

Tabelle 23: Dreiecksverteilung vom Strompreis (Börse)

	Minimum	Modalwert	Maximum
Börsenpreis Strom in € kWh ⁻¹	0,026	0,035	0,067

Der Strompreis beeinflusst die Erlöse aus dem Stromverkauf und damit den Unternehmergewinn der Biogasanlage und des Gesamtbetriebs im Biogassystem (vgl. Abbildung 13).

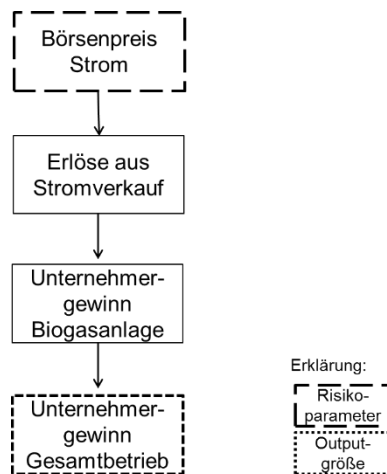


Abbildung 13: Zusammenhang von dem Strompreis (Börse) und dem Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs

3.2. Betriebliche Fallstudie unter Praxisbedingungen

Der in dieser Arbeit analysierte Praxisbetrieb ist ein ökologisch wirtschaftender Marktfruchtbetrieb im oberbayerischen Tertiär-Hügelland, nahe der Versuchsstation Viehhausen der TU München gelegen. Die Umstellung des Betriebes auf ökologische Pflanzen- und Tierproduktion erfolgte in den Jahren 1991/92. Der Betrieb gehört dem Anbauverband Naturland an. Demnach muss der Betrieb neben der Öko-Verordnung (EG) Nr. 834/2007 sowie deren Durchführungsverordnung (EG) Nr. 889/2008 die Anbaurichtlinien von Naturland einhalten. Neben den ökologischen Gesichtspunkten steht die Wirtschaftlichkeit des Betriebs als eine Grundvoraussetzung im Vordergrund.

Der Betrieb bewirtschaftet rund 290 ha Ackerland- und Grünland auf 53 Schlägen mit einer durchschnittlichen Feld-Hof Entfernung von 4,2 km. Der wichtigste Betriebszweig des Unternehmens ist der Marktfruchtbau (ca. 2/3 der Anbaufläche, ökologische Saatgutproduktion und Saatgutaufbereitung). Daneben existieren weitere kleine Betriebszweige, wie die Viehhaltung (Mutterkuhherde 7,7 GV, Mastrinder 19,1 GV, Mastschweine 5,6 GV, Geflügel 12,6 GV), die Gemüseproduktion und Brennerei⁹.

Aufgrund der räumlichen Nähe des Betriebs zur Versuchsstation Viehhausen gelten die Witterungsdaten aus Kapitel 3.1.1.

Tabelle 24: Standortbedingungen des Betriebs

Niederschlag in mm	Durchschnittstemperatur in °C	Höhenlage in m über NN	Bodenart (vorwiegend)	Bodenzahl
816	8,2	471	Sandiger Lehm, Lehm	38-63

Daten: Böswirthund Hülbergen (2016)

Im Jahr 2008 wurde eine Biogasanlage in Betrieb genommen. Die Situation zuvor war ähnlich wie beim Marktfruchtssystem des Systemversuchs Viehhausen. Es gab keine ausreichende Nutzungsmöglichkeit für Klee gras, dieses wurde deshalb überwiegend gemulcht. Durch den Betrieb der Biogasanlage kann das Klee gras als Biogassubstrat genutzt werden. Der Betriebsleiter verfolgte mit der Integration der Biogasanlage - neben der Produktion von Strom und Wärme - folgende Ziele: die Intensivierung der innerbetrieblichen Nährstoffflüsse, die Verbesserung der Humus- und Nährstoffversorgung der Böden durch den gezielten Einsatz von Gärresten in der Fruchtfolge, um deutliche Verbesserungen von Ertrag und Qualität der Marktfrüchte zu erreichen.

Mehrere Untersuchungen zu den Nährstoffkreisläufen dieses Betriebs haben bereits gezeigt (u.a. Böswirth 2017, Hülbergen und Schmid 2018), dass die Biogasanlage zu einer Intensivierung der Nährstoffkreisläufe (Makro- und Mikronährstoffe) geführt hat. Vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage war der innerbetriebliche Nährstoffkreislauf schwach ausgeprägt, die wichtigste Stickstoffzufuhr war die symbiotische N₂-Fixierung der Leguminosen (Hülbergen und Schmid 2018). Insbesondere hinsichtlich einer bedarfsgerechten Stickstoffversorgung des Getreides bestand Optimierungsbedarf (Hülbergen und Schmid 2018). Die Tierhaltung war

⁹ Diese Betriebszweige dienen der Diversifizierung der Produktion bzw. der Nutzung von Vermarktungschancen in speziellen Marktnischen. Sie sind für die betrieblichen Stoffströme und die Effekte der Biogasanlage nicht relevant und daher nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

für die Nährstoffversorgung der Böden nicht von Bedeutung. Mit organischen Düngern wurde nur ca. 1 kg ha⁻¹ Stickstoff zugeführt (vgl. Abbildung 14). Da keine weiteren Wirtschaftsdünger (z.B. Gülle) im Betrieb verfügbar waren, konnte keine gezielte Stickstoffdüngung des Getreides erfolgen. Die Erträge im Pflanzenbau waren durch die begrenzte Stickstoffzufuhr limitiert, was sich auch am relativ geringen Stickstoffentzug von 116 kg ha⁻¹ zeigt (Hülsbergen und Schmid 2018, vgl. Abbildung 14).

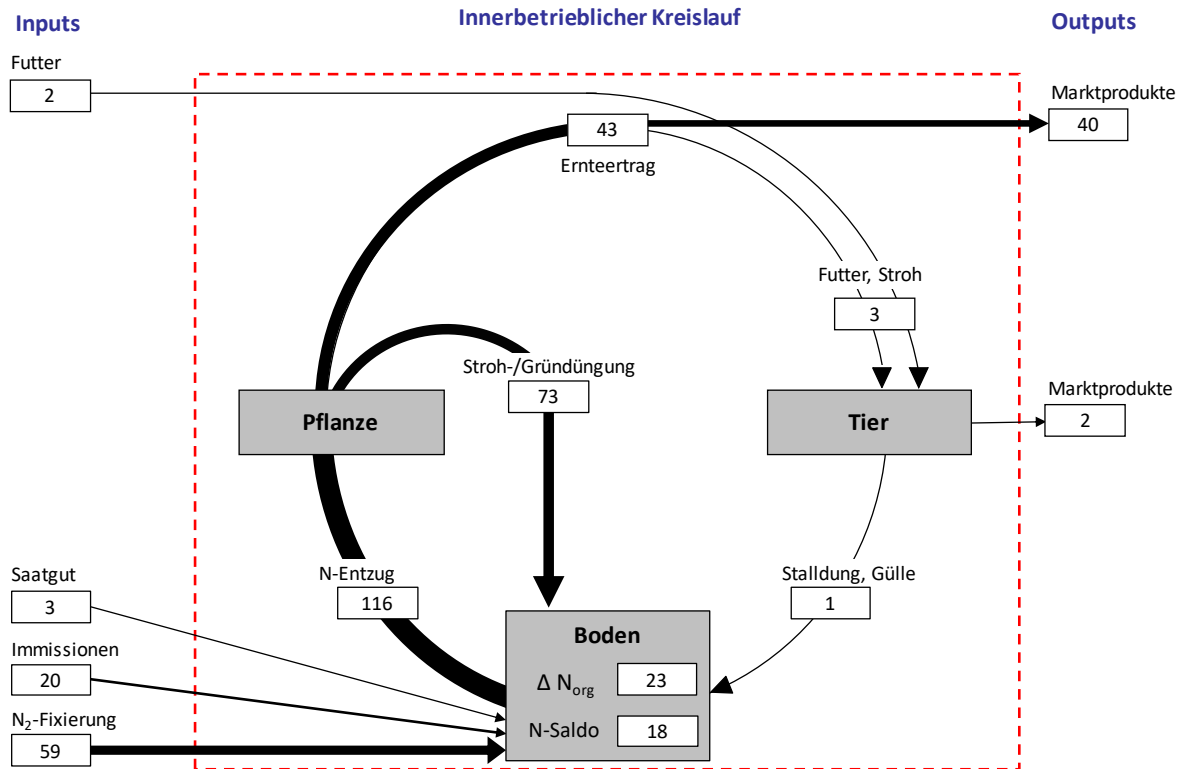


Abbildung 14: N-Kreislauf (kg ha⁻¹ a⁻¹) des untersuchten Betriebs vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage (1999 bis 2002) (Hülsbergen und Schmid 2018)

Durch die Inbetriebnahme der Biogasanlage (und den Ausbau der Tierhaltung) konnte der innerbetriebliche Stickstoffkreislauf enorm verstärkt werden (Hülsbergen und Schmid 2018, vgl. Abbildung 15). Mit dem Substratzukauf werden ca. 145 kg ha⁻¹ Stickstoff in das Betriebssystem geführt, wobei ein Teil des Gärrestes und damit Stickstoff den Betrieb verlassen (42 kg ha⁻¹). Damit stehen aktuell 159 kg ha⁻¹ Stickstoff aus dem Gärrest für den Einsatz im Pflanzenbau zur Verfügung, was ein erhebliches Ertragspotenzial bedeutet (Hülsbergen und Schmid 2018).

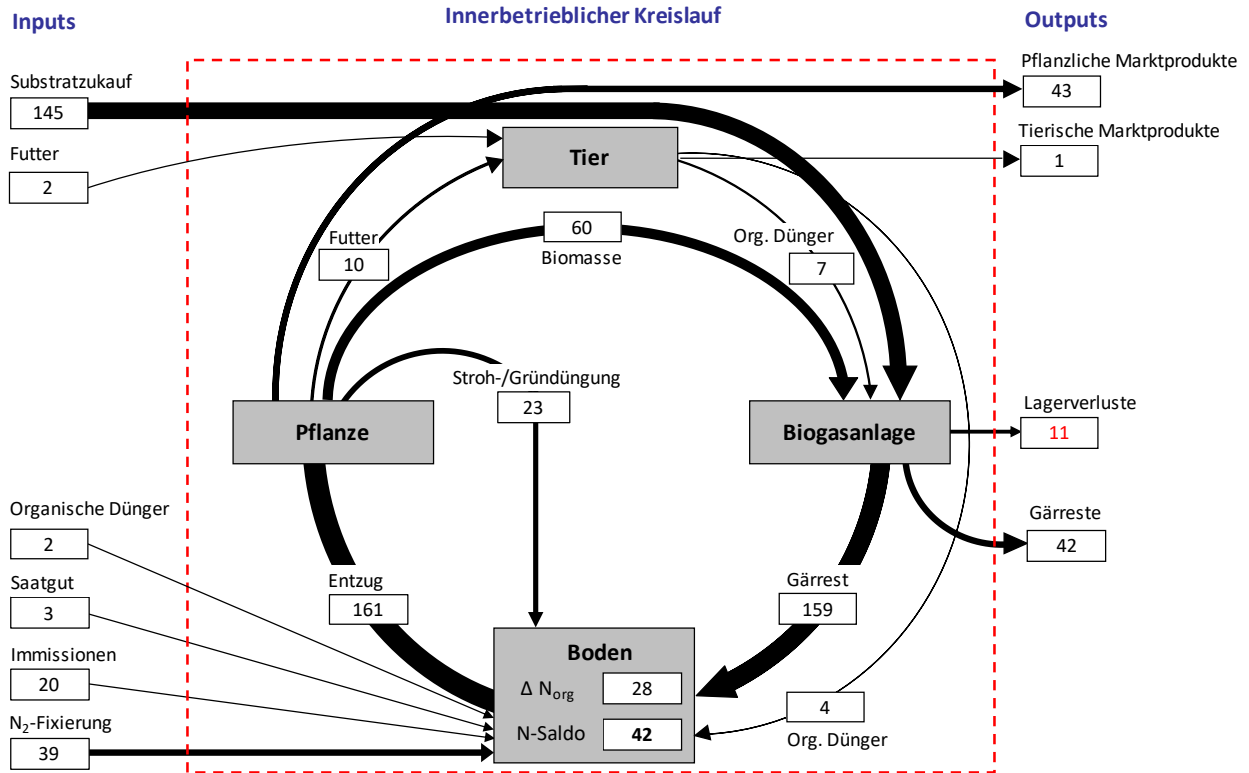


Abbildung 15: N-Kreislauf (kg ha⁻¹ a⁻¹) des untersuchten Betriebs vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage (2014 bis 2016) (Hülsbergen und Schmid 2018)

Analog zur Bearbeitung der Forschungsfragen auf der Grundlage des Systemversuchs Viehhäuser, wird auch für den Praxisbetrieb die Gesamtbetrachtung von Ackerbau und Biogasanlage als methodischer Ansatz gewählt. Hier handelt es sich jedoch nicht um eine vollständige gesamtbetriebliche Analyse. Alle Betriebszweige und Marktfrüchte, die durch die Biogasanlage nicht beeinflusst werden, sind von den Untersuchungen ausgeschlossen. Nur die Marktfrüchte, die in allen betrachteten Bewertungsjahren angebaut wurden, können in die Bewertung eingehen.

Ein bedeutender Unterschied zur feldexperimentellen Untersuchung besteht darin, dass bei der Analyse des Praxisbetriebs als Fallstudie nicht zwei unterschiedliche Anbausysteme miteinander verglichen werden können, sondern die Situation vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage (Phase 1) und die Situation nach der Inbetriebnahme (Phase 2) untersucht wird.

3.2.1. Datenbasis

Die Untersuchungen basieren überwiegend auf Betriebsdaten. Teilweise werden für die ökonomischen Berechnungen anstatt der betrieblichen Daten Kalkulationswerte verwendet, insbesondere zur Abstraktion von betriebsspezifischen Besonderheiten.

Für die Betrachtung der ökonomischen Auswirkungen der Integration der Biogasanlagen in den Praxisbetrieb werden zwei verschiedene Phasen gewählt:

- Phase 1: Der Zeitraum vor der Inbetriebnahme der Biogasanlage, Untersuchungsjahre 2001 bis 2003 und 2005 bis 2006.
- Phase 2: Der Zeitraum nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage, Untersuchungsjahre 2012 bis 2014.

Die Festlegung der beiden Betrachtungsphasen ergibt sich aus den Betriebsdaten. Es können nur Untersuchungsjahre in die Betrachtung eingeschlossen werden, für die vollständige Datensätze und keine extreme Beeinflussung der Ernteerträge durch Wetterschäden vorliegen. Das Jahr 2004 war geprägt durch einen hohen Hagelschaden und wird deshalb aus der Untersuchung ausgeschlossen. Die Phase 2 wird bewusst erst einige Jahre nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage gewählt, um einen Zeitraum abzubilden, in dem sich die neuen Betriebsprozesse bereits etabliert haben.

3.2.1.1. Der Ackerbau

Der Betrieb hat im Untersuchungszeitraum rund 280 ha Ackerland (vgl. Tabelle 26) und 10 ha Grünland (Weidefutter) bewirtschaftet. Die Ackerfläche wurde in Phase 2 überwiegend mit folgender Fruchtfolge bewirtschaftet: Klee gras, Weizen / Hybridroggen, Zuckerrüben / Hafer / Gerste / Roggen / Triticale, Ölkürbis / Kartoffeln. Teilflächen wurden abweichend von dieser Fruchtfolge bewirtschaftet (Erbsen / Ackerbohnen, Roggen / Triticale / Dinkel). Die exakte Fruchtfolge einzelner Schläge wird auf diesem Betrieb nach Eignung und Ertragspotenzial, Verunkrautung der Flächen sowie nach dem Bedarf an Saatgut und Biogasausgangssubstrat flexibel gestaltet. Auch durch Wegfall von Pachtflächen bzw. neu gepachteten Flächen ergeben sich Veränderungen in der Anbaustruktur.

Die hauptsächliche Veränderung bei der Anbaustruktur zwischen Phase 1 und Phase 2 ist, dass das Klee gras in Phase 2 als Biogassubstrat geerntet wurde und nicht wie in Phase 1 hauptsächlich gemulcht wurde (mit Ausnahme als Futter) und in Phase 2 zusätzlich als Biogassubstrat Klee gras als Zwischenfrucht und Ganzpflanzesilage angebaut wurden.

Tabelle 25: Ackerflächennutzung und Produktverwendung in Phase 1 (Mittel der Jahre 2001-2003 und 2005-2006)

	Anbaufläche in ha	Anteil an Ackerfläche in %	Verwendung
Getreide		52,7	
Winterweizen	22,1	22,1	Saatgut
Winterroggen	37,0	37,0	Saatgut
Hafer	13,3	13,3	Saatgut, Futter
Wintergerste	6,4	86,4	Saatgut
Dinkel	7,0	7,0	Saatgut
Sommerweizen	15,0	15,0	Saatgut
Sommergerste	16,9	15,4	Saatgut
Wintertriticale	15,4	5,4	Saatgut
Sommertriticale/ -roggen	5,4	2,0	Saatgut
Hackfrüchte		1,5	
Zuckerrüben	2,4	0,9	Verkauf
Kürbis	1,6	0,6	Verkauf
Körnerleguminosen		8,5	
Ackerbohnen	7,0	2,6	Saatgut, Futter
Erbsen	13,3	5,0	Saatgut, Futter
Wicken	2,2	0,8	Saatgut
Ölpflanzen		7,0	
Sonnenblume	6,0	6,0	Saatgut
Lein	1,0	1,0	Saatgut
Futterpflanzen		35,3	
Rotklee	6,0	2,3	Saatgut
Kleegras	87,8	33,0	Brache
Gesamt	266,8	100,0	

Tabelle 26: Ackerflächennutzung und Produktverwendung in Phase 2 (Mittel der Jahre 2012-2014)

	Anbaufläche in ha	Anteil an Ackerfläche in %	Verwendung
Getreide		75,3	
Ganzpflanzensilage	47,9	17,1	Biogassubstrat
Winterweizen	31,4	11,2	Saatgut
Winterroggen	26,4	9,4	Saatgut
Hafer	24,5	8,8	Saatgut, Futter
Wintergerste	24,9	8,9	Saatgut
Dinkel	18,4	6,6	Saatgut
Sommerweizen	11,9	4,3	Saatgut
Sommergerste	12,6	4,5	Saatgut
Wintertriticale	12,7	4,5	Saatgut
Hackfrüchte		3,2	
Zuckerrüben	7,6	2,7	Verkauf
Kartoffel	1,5	0,5	Verkauf
Körnerleguminosen		7,2	
Ackerbohnen	10,6	3,8	Saatgut, Futter
Erbsen	9,6	3,4	Saatgut, Futter
Futterpflanzen		14,3	
Kleegras	39,9	14,3	Biogassubstrat
Gesamt	279,9	100,0	

Tabelle 27: Zwischenfruchtanbau in Phase 2 (Mittel der Jahre 2012-2014)

	Anbaufläche in ha	TM-Ertrag in dt ha ⁻¹	Verwendung
Kleegras ^{a)}	45,2	44	Biogassubstrat
Welsches Weidelgras	13,8	19	Biogassubstrat, Futter
Landsberger Gemenge	24,9	16	Gründüngung
Gräsermischung	31,4	12	Gründüngung

Anmerkung: ^{a)} als Untersaat der Ganzpflanzensilage

In die Untersuchung fließen nur die Daten der Marktfrüchte ein, die in allen betrachteten Bewertungsjahren angebaut wurden. Dementsprechend fallen die Hackfrüchte aus der Betrachtung. Auch Sommerweizen wird aufgrund seiner allgemein geringeren Bedeutung im Anbau sowie der geringen Anbaufläche in Phase 2 im untersuchten Betrieb aus der Betrachtung ausgeschlossen. Dementsprechend beziehen sich die Berechnungen auf die durchschnittliche

Anbaufläche der in Tabelle 28 dargestellten Marktfrüchte sowie die Fläche des (Klee-)Grasanbaus: In Phase 1 wird mit einer Anbaufläche für Klee gras von 87,8 ha gerechnet, in Phase 2 mit 39,9 ha zzgl. der Flächen für die Zwischenfrüchte (45,2 ha Klee gras und 13,8 ha Welsches Weidel gras, vgl. Tabelle 27). Der weitere Zwischenfruchtanbau (Gräsermischungen / Gemenge) bleibt von der Betrachtung unberücksichtigt, da dieser auch in Phase 1 stattgefunden hat. Der Anbau der Ganzpflanzensilage in Phase 2 als Biogassubstrat (vgl. Tabelle 26) wird kostenseitig der Biogasanlage zugerechnet und bleibt damit kostenseitig im Ackerbau unberücksichtigt.

Bei der Düngung der Marktfrüchte bestehen Unterschiede in der Menge und Häufigkeit sowie bei der Art des organischen Düngers (flüssige und feste Phase des Gärrests, Festmist). Die Unterschiede gelten auch für die verschiedenen Schläge der gleichen Fruchtart.

Im Mittel über alle Getreidearten wurde beispielhaft im Untersuchungszeitraum ca. 25 m³ ha⁻¹ flüssiger Gärrest (= ca. 125 kg ha⁻¹ N) ausgebracht, wobei Winterweizen mit ca. 41 m³ ha⁻¹ (= ca. 205 kg ha⁻¹ N), Wintergerste mit ca. 37 m³ ha⁻¹ (= ca. 185 kg ha⁻¹ N), Sommergerste mit ca. 27 m³ (= ca. 135 kg ha⁻¹ N) gedüngt wurde und Winterroggen nur mit ca. 14 m³ ha⁻¹ (= ca. 70 kg ha⁻¹ N). Hafer erhielt bei Düngung mit ausschließlich flüssiger Phase ca. 20 m³ ha⁻¹ (= ca. 100 kg ha⁻¹ N) und Dinkel ca. 11 m³ ha⁻¹ (= ca. 55 kg ha⁻¹ N). Hafer und Dinkel wurden zum Teil kombiniert mit flüssiger und fester Phase gedüngt, das gleiche gilt für die Erbsen. Zu den Erbsen wurde ca. 14 m³ ha⁻¹ flüssiger Gärrest und 240 dt ha⁻¹ fester Gärrest ausgebracht. Zur Ackerbohne wurde nur fester organischer Dünger ausgebracht (ca. 121 dt ha⁻¹).

Tabelle 28: Mittlere Anbauflächen und Erlöse der Marktfrüchte des Praxisbetriebs

	Phase 1		Phase 2	
	Anbaufläche ha	Erlöse € dt ⁻¹	Anbaufläche ha	Erlöse € dt ⁻¹
Wintergerste	16,0	33,3	24,9	45,7
Winterroggen	37,0	33,3	26,4	45,0
Wintertriticale	15,4	31,4	12,7	35,8
Dinkel	7,0	65,8	18,4	74,2
Winterweizen	22,1	37,0	31,4	43,2
Hafer	13,3	35,7	24,5	42,8
Sommergerste	16,9	34,1	12,6	51,1
Erbsen	13,3	38,0	9,6	59,0
Ackerbohne	7,0	37,5	10,6	50,5
SUMME	148,0^{a)}		171,1^{a)}	

Anmerkung: ^{a)} Die Summe der Anbaufläche in Phase 1 und Phase 2 spiegelt nicht die Gesamtanbaufläche des Ackerbaus wider, sondern ist die Summe der Anbauflächen der in dieser Arbeit untersuchten Marktfrüchte.

Ausgehend von den dokumentierten Arbeitsgängen (Ackerschlagkartei) des Untersuchungsbetriebs werden die Kosten der Arbeitsverfahren (Arbeits erledigungskosten) berechnet. Die Arbeitsverfahren jeder Fruchtart variieren schlagbezogen abhängig von der Vorfrucht und dem

Untersuchungsjahr. Tabelle 29 sowie Tabelle A 11 bis Tabelle A 21 zeigen die Arbeitsverfahren der untersuchten Marktfrüchte, der Ganzpflanzensilage sowie des Kleeegrases in Phase 2. Der Unterschied in den Arbeitsverfahren von Phase 1 und Phase 2 liegt in der zusätzlichen Gärrestausbringung in Phase 2 sowie dem Ernten des Kleeegrases.

Sowohl der Arbeitszeitbedarf, wie auch die fixen und variablen Maschinenkosten werden mit Hilfe der Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL 2016a, KTBL 2016b, KTBL 2012b) kalkuliert (vgl. Kapitel 3.1.3.2), um die Ergebnisse nicht von betriebsspezifischen Besonderheiten zu prägen. Die Kosten für das Saatgut (= Direktkosten) ergeben sich durch die Erlöspreise im Marktfruchtverkauf (vgl. Tabelle 28), die Kosten für weitere Betriebsmittel (z.B. Diesel, Dünger) werden zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse anhand von Kalkulationsdaten angesetzt (KTBL 2016b, KTBL 2012b).

Tabelle 29: Arbeitsverfahren für Winterweizen Phase 2 (beispielhafter Schlag, Untersuchungsjahr 2013/14)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen
01.10.2013	Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
19.10.2013	Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
03.03.2014	Organische Düngung (Gärrest; 20 m ³ ha ⁻¹)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
14.04.2014	Organische Düngung (Gärrest, 14 m ³ ha ⁻¹)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
15.04.2014	Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
05.06.2014	Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
05.08.2014	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
05.08.2014	Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug
05.08.2014	Strohbergung	Schlepper 102 kW + Quaderballenpresse
05.08.2014	Transport des Nebenproduktes	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger; Frontlader

3.2.1.2. Die Biogasanlage

Die von einem Komplettanbieter geplante und errichtete Biogasanlage wurde im Jahr 2008 in Betrieb genommen. Der produzierte Strom wird ins Netz eingespeist und die anfallende Wärme wird für den Eigenbedarf der Biogasanlage genutzt sowie zur Wärmeversorgung von Kunden. Die Biogasanlage wird überwiegend mit Kleegrassilage betrieben. Der Einsatz von Ganzpflanzensilage, Festmist und Getreideschrot dienen der Prozessstabilisierung und Verringerung gärobiologischer Probleme. Bei der technischen Auslegung der Biogasanlage wurde der hohe Anteil an Klee gras bzw. faseriger Substrate im Substratmix berücksichtigt.

Eine technische Besonderheit ist der liegende Pfpfenstromfermenter. Er verfügt über ein dauerhaft langsam drehendes Haspelrührwerk, um das zähe und dickflüssige Gärgemisch im Fermenter durchmischen zu können. Dem Fermenter folgt ein herkömmlicher stehender Nachgärbehälter mit Tragluftdach zur Gasspeicherung. Der Nachgärer ist mit einer Kombination

aus Langachsührwerk und Tauchmotorührwerk ausgestattet. Das ausgegorene Gärgemisch wird in einen Pressschneckenseparator gefördert. Die flüssige Phase wird in ein gasdichtes Gärrestlager gepumpt. Das Gärrestlager ist mit einem Tragluftdach zur Gasspeicherung und zwei Tauchmotorührwerken ausgestattet. Die separierten festen Gärrückstände werden in einem Fahrsilo gelagert. Das in der Anlage erzeugte Biogas wird in zwei Gas-Otto-BHKWs zu Strom und Wärme umgewandelt. Die installierte elektrische Leistung betrug im Untersuchungszeitraum 385 kW_{el}.

Die Biogasanlage wurde im Jahr 2008 in Betrieb genommen, dementsprechend gilt für diese Anlage das EEG 2004. Durch Ausschöpfung sämtlicher Boni erhält die Biogasanlage für den eingespeisten Strom eine EEG-Vergütung von 26,66 Cent kWh_{el}⁻¹. Der Eigenstrombedarf der Biogasanlage wird über den Zukauf von Strom gedeckt (vgl. Tabelle 30). Die anfallende Wärme wird für den Eigenbedarf der Biogasanlage genutzt sowie zur Belieferung von Wärmekunden.

Tabelle 30: Parameter der Biogasanlage im Mittel des Untersuchungszeitraums

Parameter	Einheit	Wert
Brutto-Strommenge	kWh _{el} a ⁻¹	3.100.900
Eigenstrombedarf der Biogasanlage	%	10,7
EEG-Vergütung	Cent kWh _{el} ⁻¹	26,66
Preis Stromeinkauf	Cent kWh _{el} ⁻¹	15,68
Verkaufte Wärme	MWh	2.715
Wärmepreis (Verkauf)	€ MWh _{th} ⁻¹	75

Die anhand von betrieblichen Daten ermittelten Investitionskosten der Biogasanlage (ohne Siloanlage) in Höhe von ca. 5.000 € kW_{el}⁻¹ sind im oberen Bereich aktueller Kalkulationsdaten einzustufen (vgl. z.B. KTBL 2014), insbesondere aufgrund der dargestellten technischen Besonderheiten. Pro Jahr fallen rund 40.000 € sonstige Maschinenkosten (Abschreibung, Wartung / Instandsetzung und Treibstoff) an, zum Beispiel zur Beschickung der Anlage.

Die Lohnkosten für den Betrieb der Biogasanlage werden aufgrund von betriebsspezifischen Besonderheiten anhand von Kalkulationsdaten angesetzt (KTBL 2014). Außerdem fallen für die Biogasanlage ca. 90.000 € weitere Kosten an. Diese setzen sich aus Instandhaltungskosten (ca. 75.000 €), Betriebskosten (z.B. Gutachten, Analyse, sonstige Betriebsstoffe) sowie Allgemeinen Kosten (z.B. Verwaltung) zusammen.

Die Substratkosten für die Biogasanlage betragen ca. 253.714 € a⁻¹ (vgl. Tabelle 31). Die Biogasanlage wird überwiegend mit Kleegrassilage betrieben, die sowohl eigenbetrieblich (1.846 t FM) hergestellt wird als auch von Fremdbetrieben (3.457 t FM) stammt (vgl. Tabelle 31). Für die eigenbetriebliche Kleegrassilage werden der Biogasanlage die zusätzlichen Kosten angerechnet, die durch den Schnitt anstatt dem Mulchen entstehen. Die restlichen Kosten werden weiterhin dem Ackerbau angerechnet und entsprechen damit den Kosten aus Phase 1 für den Anbau von Kleegras.

Die Kleegrassilage von Fremdbetrieben (ökologisch und konventionell) wird zugekauft bzw. selbst geerntet (Gegenleistung zum Teil: Bereitstellung von Saatgut und Gärrestlieferung, dementsprechend unterschiedliche Kosten in Höhe von 10 bis 32 € t⁻¹ zzgl. der Gegenleistung). Unter anderem wird in der Biogasanlage das Luzerne-Kleegras des Versuchsbetriebs Viehhausen vergoren und Gärreste zurück an den Versuch gegeben.

Die Ganzpflanzensilage stammt aus dem eigenen Betrieb, die Kosten des Anbaus werden der Biogasanlage vollständig angerechnet. Der Festmist stammt zum Teil aus dem eigenen Betrieb und zum Großteil wird er von einem benachbarten Betrieb (Gegenleistung: Gärreste) bezogen. Für den Festmist aus dem Fremdbetrieb werden Transportkosten angesetzt. Getreideschrot hat mengenmäßig eine untergeordnete Rolle und stammt als Ausschuss aus dem Eigenbetrieb.

Tabelle 31: Substratmix der Praxisbiogasanlage sowie Substratkosten

	Einheit	Kleegrassilage (eigen)	Kleegrassilage (fremd)	GPS	Festmist	Getreideschrot
Menge	t FM	1.846	3.457	1.277	3.408	302
Kosten	€ t ⁻¹ FM ⁻¹	16 ^{a)}	10-32 ^{b)}	64 ^{c)}	2 ^{d)}	16
Jahreskosten	€ a ⁻¹	29.536	131.824	81.728	5.794	4.832

Erläuterung: ^{a)} Nur die zusätzlichen Kosten für Schnitt und Einlagerung werden in dieser Arbeit der Biogasanlage angerechnet. Ermittlung gemäß Formel 4 (Kosten einer Fruchtart), ^{b)} zuzüglich der Kosten für Gärresttransport und Saatgut, ^{c)} Eigenbetriebliche Kosten, Ermittlung gemäß Formel 4 (Kosten einer Frucht), ^{d)} Transportkosten für 85 % des Festmist

Die Ermittlung des Unternehmergewinns der Biogasanlage wird nach der beschriebenen Methodik in Kapitel 3.1.3.3 durchgeführt. Für alle Zinsansätze bzw. Zinskostenberechnungen wird ein Zinssatz von 4 % angenommen.

3.2.2. Bewertungsmethodik

3.2.2.1. Ertragseffekte

Die mittleren Erträge über die beiden Betrachtungsphasen werden miteinander verglichen. Die Ertragseffekte werden als prozentuale Veränderung der beiden Phasen - vor und nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage - betrachtet und mit statistischen Erträgen des Landkreises verglichen.

3.2.2.2. Ökonomische Fallstudie

Für die ökonomische Bewertung wird das erarbeitete EXCEL-basierte Planungsmodell verwendet (vgl. Kapitel 3.1.3). Als ökonomische Kennzahl ist in dieser Untersuchung der in Kapitel 3.1.3.1 definierte „Mehr-/ Mindergewinn“ für Phase 2 dargestellt. Zunächst werden die „Mehr-

/ Mindergewinne“ der untersuchten Marktfrüchte ermittelt. Diese Ergebnisse gehen in die Kennzahl „Mehr-/ Mindergewinn“ des Ackerbaus, als arithmetische Mittel, bezogen auf die Ackerfläche, ein. Der gesamtbetriebliche „Mehr-/ Mindergewinn“ ergibt sich aus dem Mehrge-
 winn des Ackerbaus sowie dem Unternehmergewinn der Biogasanlage (ermittelt gemäß For-
 mel 6). Der Unternehmergewinn der Biogasanlage wird in € ha⁻¹ dargestellt. Diese Kennzahl
 bezieht sich auf die Fläche des Marktfruchtanbaus (vgl. Tabelle 28) sowie auf die Flächen des
 Anbaus von Klee gras und Ganzpflanzensilage (vgl. Tabelle 26), jeweils in Phase 2. Die Mehr-
 kosten durch die Ernte des Klee grasses sowie die gesamten Anbaukosten der Ganzpflanzens-
 ilage werden der Biogasanlage als Substratkosten angerechnet.

Darüber hinaus wird der „notwendige“ Strompreis (vgl. Formel 9) als Ergebnis dargestellt.

Die Bewertung der ökonomischen Auswirkungen der Biogasanlage erfolgt durch den Vergleich
 der betrieblichen Situation vor und nach der Inbetriebnahme, also anhand von unterschiedli-
 chen Zeiträumen. Diese Methodik führt dazu, dass auch andere Gründe für die Ertragsverän-
 derungen bzw. ökonomische Effekte nicht ausgeschlossen werden können. Der Vergleich der
 vom untersuchten Betrieb erzielten Marktpreise (vgl. Tabelle 28) mit bayerischen Marktdaten
 (LfL 2014) zeigt, dass der Preisanstieg in Phase 2 überproportional groß ausfiel.

Aus diesem Grund wird zunächst die ökonomische Betrachtung mit den vom Praxisbetrieb
 realisierten Ertragsveränderungen und Marktpreisen durchgeführt, als sogenannte „Basisvari-
 ante“ (vgl. Tabelle 32). Außerdem werden bei der Berechnung des Mehrgewinns in Phase 2
 die Marktpreise von Phase 1 verwendet, um den Effekt veränderter Marktpreise aus der Be-
 trachtung auszuschließen (= Variante 1).

Tabelle 32: Definition und Erklärung der betrachteten Varianten bei der ökonomischen Bewertung im Praxisbetrieb

	Marktfruchterträge		Marktfruchtpreise		Grund für Betrachtung
	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2	
Basisva- riante	tatsächliche Erträge	tatsächliche Erträge	tatsächliche Marktfrucht- preise	tatsächliche Marktfrucht- preise	Betrachtung der tatsächlichen Situation im Betrieb
Variante 1	tatsächliche Erträge	tatsächliche Erträge	tatsächliche Marktfrucht- preise	Marktfrucht- preise aus Phase 1	Berücksichtigung der realisiert- ten Ertragssteigerungen, ohne Auswirkungen durch Preis- schwankungen bei Marktfrüch- ten

3.2.2.3. Monte-Carlo-Simulation

Die Biogasanlage ist seit 2008 in Betrieb, so dass bereits viele Parameter kein Risiko mehr
 darstellen, die für eine Neuanlage noch nicht exakt eingeschätzt werden können, wie beispiels-
 weise der Eigenstrombedarf oder der Wirkungsgrad des BHKWs. Für den Betriebsleiter stellt
 sich dennoch die Frage nach dem unternehmerischen Risiko bei dem künftigen Betrieb seiner
 Biogasanlage, vor allem in Bezug auf den Ertragseffekt und die Erlöse durch den Marktfrucht-
 verkauf (Saatgut), aber auch bezüglich Risikofaktoren, die die Biogasanlage trotz mehrjähri-
 gem Betrieb mit sich bringt (Instandhaltungs- und Substratkosten, Strompreis für Eigenbedarf).

Im Folgenden werden die Risikoparameter (= Zufallsvariablen) definiert und deren Verteilung dargestellt. Es wurde angenommen, dass alle Zufallsvariablen dreiecksverteilt sind. Die Zusammenhänge der Risikoparameter im Planungsmodell zu der Zielgröße „Mehr-/Mindergewinn des Gesamtbetriebs“ werden graphisch dargestellt. Zur technischen Umsetzung der stochastischen Simulation wurde zu dem EXCEL-basierten Planungsmodell die Risiko- und Analysesoftware (= Simulationsprogramm) @RISK (PALISADE 2008) genutzt.

Ertragseffekte

Die Höhe der Mehrerträge in Phase 2 bestimmen einen möglichen „Mehr-/Mindergewinn des Gesamtbetriebs“ und damit das unternehmerische Risiko. Ein wichtiger Faktor, der dieses Risiko beeinflussen kann, ist die Düngermenge (Gärrest). Sollte es dem Betrieb künftig, aufgrund der Novellierung der Düngeverordnung oder anderen rechtlichen Grundlagen, nicht mehr möglich sein, die aktuelle Nährstoffmenge weiterhin auszubringen, so muss gegebenenfalls mit geringeren Ertragseffekten gerechnet werden. Für die Monte-Carlo-Simulation wurden deshalb die bereits erreichten Ertragseffekte als Dreiecksverteilungen formuliert. Die Minium-/Maximum-Werte sind die mittleren Erträge aus Phase 1 bzw. 2 (vgl. Tabelle 54). Der Modalwert ist der Mittelwert der Erträge der beiden Phasen.

Die Marktfruchterträge bestimmen die Gesamterlöse der Marktfrüchte und damit den Unternehmergeinn des Ackerbaus bzw. des Gesamtbetriebs sowie den Mehr-/ Mindergewinn (vgl. Abbildung 16).

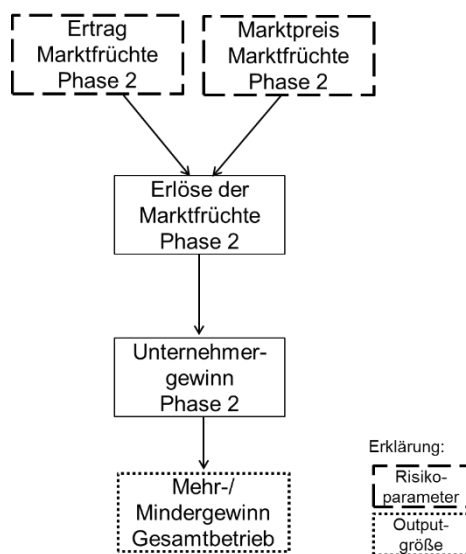


Abbildung 16: Zusammenhang von den Erträgen und Marktpreisen in Phase 2 und dem Mehr-/ Mindergewinn des Gesamtbetriebs in Phase 2

Preise für Marktfrüchte

Die Höhe der Preise für Marktfrüchte (Saatgut) stellen Quellen des Risikos für den Erfolg der wirtschaftlichen Tätigkeit dar. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Marktpreise werden mit den tatsächlich erzielten Preisen der beiden Betrachtungsphasen als Dreiecksverteilung beschrieben (vgl. Tabelle 33). Der Modalwert ist der mittlere Preis der jeweiligen Marktfrucht der beiden Phasen. Die Preise der Marktfrüchte bestimmen die Erlöse und damit den Mehr-/ Minderertrag des Gesamtbetriebs (vgl. Abbildung 16).

Tabelle 33: Dreiecksverteilungen für die Marktpreise (€ dt⁻¹ FM) von Marktfrüchten in Phase 2

Fruchtart	Minimum	Modalwert	Maximum
Wintergerste	33,3	39,5	45,7
Winterroggen	33,3	39,2	45,0
Wintertriticale	31,4	33,6	35,8
Dinkel	65,8	70,0	74,2
Winterweizen	37,0	40,1	43,2
Hafer	35,7	39,3	42,8
Sommergerste	34,1	42,6	51,1
Erbsen	38,0	48,5	59,0
Ackerbohne	37,5	44,0	50,5

Risikofaktoren der Biogasanlage

Ein Risikofaktor bei der Biogaserzeugung ist der Aufwand für die Instandhaltung durch außerplanmäßige Reparaturen oder einen erhöhten Verschleiß. Die Praxis hat gezeigt, dass insbesondere Biogasanlagen mit einem hohen Anteil faseriger Substrate störanfällig sind und höhere Instandhaltungskosten verursachen (vgl. Kapitel 2.4). In der Monte-Carlo-Simulation wird für die Biogasanlage folgende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Instandhaltungskosten der Technik angenommen (vgl. Tabelle 34).

Das größte Risiko für die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage stellen die Substratkosten dar. Der Betrieb erhält sowohl Festmist als auch Klee gras von anderen Betrieben (ökologisch und konventionell). Insbesondere der Festmist dient zur Stabilisierung des Gärprozesses. Die Unsicherheit dieser Biogasanlage besteht sowohl darin, dass der Anbauverband Naturland aktuell noch das Ziel verfolgt, bis zum Jahr 2020 nur noch ökologische Biogassubstrate zuzulassen, als auch darin, dass gegebenenfalls die Fremdbetriebe künftig keine / weniger Substrate zur Verfügung stellen. Alternativen wie beispielsweise ökologische Maissilage wären in der Produktion / im Zukauf wesentlich teurer als die aktuellen Substrate. In der Monte-Carlo-Simulation wird für die Biogasanlage dementsprechend die in Tabelle 34 angegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Substratkosten angenommen.

Tabelle 34: Dreiecksverteilung der Instandhaltungskosten Technik und den Substratkosten

	Minimum	Modalwert	Maximum
Veränderung der Instandhaltungskosten der Biogasanlage zum Planwert (= Modalwert,100%)	95 %	100 %	125 %
Veränderung der Substratkosten der Biogasanlage zum Planwert (= Modalwert,100%)	95 %	100 %	145 %

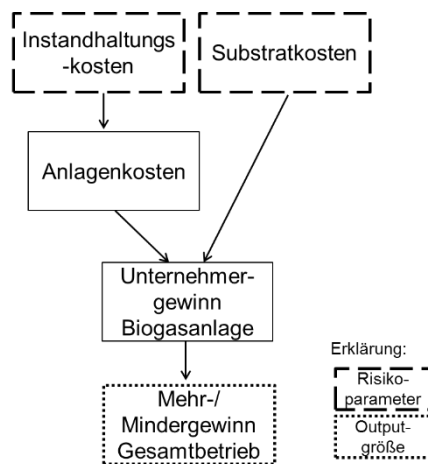


Abbildung 17: Zusammenhang von Instandhaltungskosten sowie Substratkosten der Biogasanlage und dem Mehr-/ Mindergebnis des Gesamtbetriebs in Phase 2

Preis für Stromeinkauf

Für den Eigenbedarf der Biogasanlage wird derzeit Strom zugekauft. Für die Dreiecksverteilung wird der mittlere Zukaufpreis des Untersuchungszeitraums als Minimalwert verwendet (vgl. Tabelle 35). Der Maximalwert beschreibt die EEG-Vergütung, die die Biogasanlage für ihren produzierten Strom erhalten würde. Sollte der Strompreis extrem ansteigen (höher als die aktuelle EEG-Vergütung in Höhe von 26,66 Cent kWh⁻¹), so würde die Biogasanlage Eigenstrom verwenden. Der Modalwert ist der Durchschnitt von Minimal- und Maximalwert.

Tabelle 35: Dreiecksverteilung vom Strompreis (Börse)

	Minimum	Modalwert	Maximum
Börsenpreis Strom in Cent kWh ⁻¹	15,68	21,17	26,66

Der Strompreis beeinflusst den Gewinn der Biogasanlage und damit den Mehr-/ Minderertrag in Phase 2 (vgl. Abbildung 18).

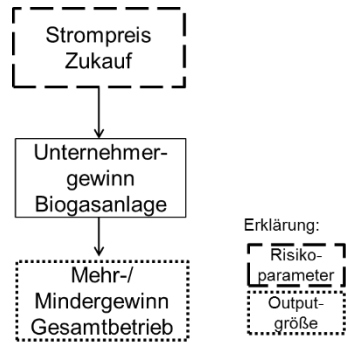


Abbildung 18: Zusammenhang von dem Strompreis (Zukauf) und dem Mehr-/ Minderertrag des Gesamtbetriebs in Phase 2

4. Ergebnisse der feldexperimentellen Untersuchungen

4.1. Ertragseffekte im Systemversuch Viehhausen

Die Getreideerträge (Winterweizen, Wintertriticale, Winterroggen) sind in den Untersuchungsjahren 2010 bis 2014 im Biogassystem im Vergleich zum Marktfruchtsystem überwiegend signifikant höher (t-Test, $p \leq 0,05$). Die Ertragsunterschiede bei Weizen und Triticale sind in jedem einzelnen Untersuchungsjahr, beim Roggen in zwei Untersuchungsjahren signifikant.

Das Ertragsverhältnis von Winterweizen (Ertrag Biogassystem / Ertrag Marktfruchtsystem) liegt im Mittel der Untersuchungsjahre bei 1,36, von Wintertriticale bei 1,47 und von Winterroggen bei 1,27 (vgl. Tabelle 36 bis Tabelle 38). Alle drei Getreidearten werden im Biogassystem mit Gärresten gedüngt. Es ist jedoch zu beachten, dass in den Untersuchungsjahren Triticale die höchste Menge bei der Gärrestdüngung erhalten hat (jährlich 125 kg Gesamt-N ha⁻¹), gefolgt von Winterweizen (jährlich 100 kg Gesamt-N ha⁻¹). Die geringste Gärrestmenge wurde zu Winterroggen appliziert (jährlich 75 kg Gesamt-N ha⁻¹).

Der Winterweizen im Marktfruchtsystem bringt nach der Schnittnutzung des Luzerne-Kleegras und der Gärrestdüngung im Biogassystem wesentlich höhere Erträge, als nach der Gründüngung mit Luzerne-Kleegras. Offenbar gelingt auf diesem Standort der N-Transfer vom Luzerne-Kleegras-Mulch zum nachfolgenden Winterweizen weniger gut, als die N-Versorgung durch Gärrestdüngung im Frühjahr.

Tabelle 36: Mittlere Winterweizenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha⁻¹

Jahr	Winterweizen				Ertragsverhältnis ^{a)}
	Marktfruchtsystem		Biogassystem		
	Mittel ^{c)}	Min – Max ^{c)}	Mittel ^{c)}	Min – Max ^{c)}	
2010	4,30	3,75 - 4,52	5,47*	5,03 - 5,85	1,27
2011	3,73	3,44 - 4,06 ^{b)}	4,64*	4,50 - 4,70	1,24
2012	3,18	2,08 - 3,70	4,62*	4,03 - 5,34	1,45
2013	3,97	3,74 - 4,75	5,70*	5,53 - 5,90	1,44
2014	4,20	3,62 - 5,35	6,01*	5,81 - 6,47	1,43
Mittel	3,88	2,08 - 5,35	5,29	4,02 - 6,47	1,36

Anmerkung: ^{a)} Ertragsverhältnis: TM-Ertrag Biogassystem / TM-Ertrag Marktfruchtsystem, ^{b)} Ertrag ist in diesem Jahr geschätzt auf der Basis von Sensordaten, da aufgrund von Zwergsteinbrandbefall eine vorzeitige Ernte notwendig war (Bryzinski 2015), ^{c)} n = 4, *signifikante Ertragsunterschiede zwischen dem Biogas- und Marktfruchtsystem (t-test, $p \leq 0,05$)

Tabelle 37: Mittlere Wintertriticaleerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha⁻¹

Wintertriticale						
Jahr	Marktfruchtssystem		Biogassystem		Ertragsverhältnis ^{a)}	
	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}		
2010	4,41	3,91 - 4,85	5,81*	5,65 - 5,99	1,32	
2011	4,52	3,61 - 5,07	7,20*	6,44 - 7,77	1,59	
2012	6,08	5,08 - 7,21	8,37*	8,05 - 8,88	1,38	
2013	3,22	2,29 - 3,82	5,11*	4,39 - 6,46	1,59	
2014	3,83	3,45 - 4,57	5,83*	5,48 - 6,20	1,52	
Mittel	4,41	2,29 - 7,21	6,46	4,39 - 8,88	1,47	

Anmerkung: ^{a)} Ertragsverhältnis: TM Ertrag Biogassystem / TM Ertrag Marktfruchtssystem, ^{b)} n = 4, *signifikante Ertragsunterschied zwischen dem Biogas- und Marktfruchtssystem (t-test, p ≤ 0,05)

Tabelle 38: Mittlere Winterroggenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha⁻¹

Winterroggen						
Jahr	Marktfruchtssystem		Biogassystem		Ertragsverhältnis ^{a)}	
	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}		
2010	7,44	6,40 - 8,57	7,53	5,86 - 8,70	1,01	
2011	6,11	5,21 - 6,86	7,02	6,29 - 7,73	1,15	
2012	5,08	4,35 - 5,71	9,00*	7,89 - 10,19	1,77	
2013	3,32	2,13 - 4,24	3,48	2,38 - 4,95	1,05	
2014	4,39	4,17 - 4,74	6,45*	5,82 - 7,29	1,46	
Mittel	5,27	2,21 - 8,57	6,70	2,38 - 10,19	1,27	

Anmerkung: ^{a)} Ertragsverhältnis: TM Ertrag Biogassystem / TM Ertrag Marktfruchtssystem, ^{b)} n = 4, *signifikante Ertragsunterschied zwischen dem Biogas- und Marktfruchtssystem (t-test, p ≤ 0,05)

Die Erträge der Ackerbohne sind in allen Untersuchungsjahren im Biogassystem höher als im Marktfruchtssystem. Beim Luzerne-Kleegras werden mit Ausnahme des ersten Untersuchungsjahres auch stets höhere Erträge beim Biogassystem gemessen. Das Ertragsverhältnis der Ackerbohne beträgt im Mittel der Untersuchungsjahre 1,13 und von LKG 1,07 (vgl. Tabelle 39 und Tabelle 40). Die Ertragsunterschiede zwischen dem Biogas- und Marktfruchtssystem beim Luzerne-Kleegras und der Ackerbohne sind gemäß den Ergebnissen der t-Tests jedoch - abweichend vom Getreide - nicht signifikant (p ≤ 0,05). Auch die Leguminosen im Biogassystem profitieren damit von der besseren Nährstoffversorgung in der Fruchtfolge (Nachwirkung der Gärrestdüngung) und höhere Erträge können dadurch erreicht werden.

Tabelle 39: Mittlere Ackerbohnenenerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha⁻¹

Ackerbohne						
Jahr	Marktfruchtsystem		Biogassystem		Ertragsverhältnis ^{a)}	
	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}		
2010	2,09	1,96 - 2,23	2,32	2,13 - 2,46	1,11	
2011	2,89	2,48 - 3,57	3,55	2,74 - 4,22	1,23	
2012	3,58	2,24 - 4,22	3,72	3,16 - 4,27	1,04	
2013	2,15	1,35 - 2,64	2,32	1,66 - 2,79	1,08	
2014	3,22	2,40 - 3,73	3,75	3,57 - 3,87	1,16	
Mittel	2,78	1,35 - 4,22	3,13	1,66 - 4,27	1,13	

Anmerkung: ^{a)} Ertragsverhältnis: TM Ertrag Biogassystem / TM Ertrag Marktfruchtsystem, ^{b)} n = 4, *signifikante Ertragsunterschied zwischen dem Biogas- und Marktfruchtsystem (t-test, p ≤ 0,05)

Tabelle 40: Mittlere Luzerne-Kleeerträge im Systemversuch Viehhausen (Marktfrucht- und Biogassystem) der Untersuchungsjahre 2010 - 2014 in t TM ha⁻¹

Luzerne-Kleeerträge						
Jahr	Marktfruchtsystem		Biogassystem		Ertragsverhältnis ^{a)}	
	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}	Mittel ^{b)}	Min – Max ^{b)}		
2010	9,32	8,24 - 10,85	8,64	6,00 - 11,35	0,93	
2011	12,68	10,79 - 14,74	13,83	12,94 - 14,30	1,09	
2012	12,50	11,45 - 13,00	12,74	10,87 - 14,77	1,02	
2013	16,75	13,08 - 19,00	19,25	16,74 - 21,33	1,15	
2014	15,43	12,09 - 17,60	16,89	16,29 - 18,23	1,09	
Mittel	13,34	8,24 – 19,00	14,27	6,00 - 21,33	1,07	

Anmerkung: ^{a)} Ertragsverhältnis: TM Ertrag Biogassystem / TM Ertrag Marktfruchtsystem, ^{b)} n = 4

Die Ertragsverhältnisse je Fruchtart und Jahr zeigen innerhalb des Untersuchungszeitraums (= Initialphase des Versuchs) keinen deutlich steigenden Trend. Es sind jedoch sehr deutliche (witterungsbedingte) Jahreseffekte erkennbar. Vor allem die geringeren Getreideerträge im Jahr 2013 sind auf die Witterung zurückzuführen (vgl. Kapitel 3.1.1; langer Winter, kühler Frühling, sehr warmer Sommer mit Trockenperiode im Juli).

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass unter den gegebenen Standort- und Versuchsbedingungen die Nährstoffzufuhr durch Gärrestgaben sehr effizient in Ertrag umgesetzt werden kann. Wesentliche Gründe für die deutlichen Ertragsteigerungen sind die hohe Pflanzenverfügbarkeit des zugeführten Stickstoffs und optimale Düngetermine (entsprechend dem Pflanzenbedarf). Die relativ hohen N-Gaben konnten von den Pflanzenbeständen gut verwertet werden; es kam weder zu zunehmendem Lagergetreide noch zu stärkerem Infektionsdruck durch pilzliche Krankheiten.

4.2. Ökonomische Bewertung der Integration einer Biogasanlage

Im folgenden Kapitel werden die ökonomischen Ergebnisse der Modellbiogasanlagen (Unternehmergewinn der Biogasanlage, Stromgestehungskosten) und die Ergebnisse der Bewertung der Gesamtbetriebe (Unternehmergewinn, „Mehrgewinn“) dargestellt. Außerdem werden für die Biogassysteme mit eigener Biogasanlage die jeweils „notwendigen“ Strompreise ausgewiesen, um im Vergleich zum Marktfruchtssystem einen „Mehrgewinn“ im Gesamtbetrieb zu erzielen.

4.2.1. Ökonomische Kennzahlen der Biogasanlagen

Die Kosten der Modellbiogasanlagen werden überwiegend von den Substratkosten dominiert (vgl. Tabelle 42). Bei den Anlagen 2 bis 7 nehmen die Substratkosten einen Anteil von ca. 43 bis 56 % ein. Dies entspricht spezifischen Substratkosten von 8,0 bis 15,5 Cent kWh⁻¹ (vgl. Tabelle 43). Das Risiko vor schwankenden Substratpreisen trifft künftig bzw. in der Praxis vor allem die Anlagen mit einem hohen Einsatz von zugekauften Substraten (Maissilage, Rindergülle, Rindermist). Dies sind in dieser Arbeit vor allem die Modellbiogasanlagen 6 bis 8. Der Anteil der Kosten für die zugekauften Substrate an den Gesamtsubstratkosten liegen bei diesen Modellbiogasanlagen zwischen 50 und 72 % (vgl. Abbildung 19). Der Anteil der Kosten für zugekaufte Substrate liegen bei den Modellbiogasanlagen 1 bis 4 dagegen bei unter 10 % (vgl. Abbildung 19).

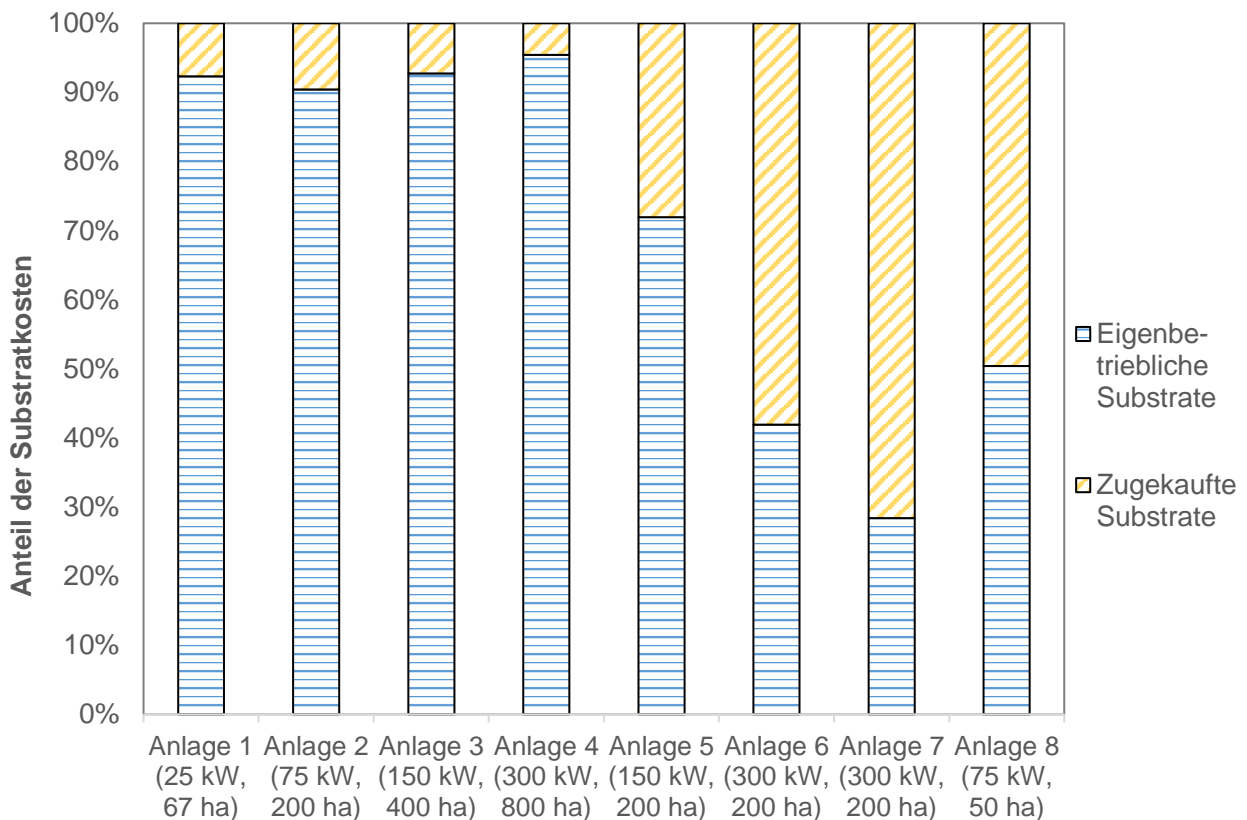


Abbildung 19: Zusammensetzung der Substratkosten aus den Kosten für die eigenbetrieblichen Substrate und die zugekauften Substratkosten (Untersuchungszeitraum 2010-2014)

Bei den Anlagen 1 und 8 haben die Substrate nur einen Anteil von ca. 24 bzw. 26 % an den Gesamtkosten. Bei der Anlage 1 (25 kW_{el}) dominieren die Anlagenkosten (Abschreibung, Zinsen und Instandhaltung), aufgrund der extrem hohen spezifischen Investitionskosten für die Biogasanlage in Höhe von 19.550 € kW_{el}⁻¹. Dennoch sind die spezifischen Substratkosten mit 15,6 Cent kWh⁻¹ die höchsten von allen Modellbiogasanlagen (vgl. Tabelle 43). Bei der Anlage 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage) ergeben sich vergleichsweise die geringsten spezifische Substratkosten mit 5,8 Cent kWh⁻¹ (vgl. Tabelle 43) aufgrund der angenommenen kostenfreien Rindergülle als Substrat (nur Transportkosten, Entfernung 10 km).

Die Stromproduktion aus Biogas ist deutlich günstiger mit steigender Anlagengröße (vgl. Tabelle 42 und Tabelle 43). Die Unterschiede bei gleichgroßen Anlagen ergeben sich vor allem aufgrund unterschiedlicher Substrate. Mit der Modellbiogasanlage 8 kann aufgrund ihrer geringen Substratkosten vergleichsweise günstig Strom produziert werden. Die Stromgestehungskosten der Anlage 8 liegen durchschnittlich bei 21,9 Cent kWh⁻¹ und damit im Bereich der 150 kW_{el} und der 300 kW_{el} Modellbiogasanlagen.

Tabelle 41: Mittlere Substratkosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)

Anlage	installierte Leistung	Gesamtanbaufläche	Luzerne-Kleegras ^{a)}	Rindergülle ^{b)}	Rindermist ^{b)}	Mais-silage ^{c)}	Gesamt
	kW _{el}			ha	€ a ⁻¹ (t FM)		
1	25	67	25.858 (478)		52 (29)	2.104 (55)	28.014
2	75	200	77.187 (1.435)		192 (108)	7.988 (203)	85.367
3	150	400	154.374 (2.870)		284 (159)	11.762 (298)	166.420
4	300	800	308.748 (5.740)		348 (196)	14.425 (366)	323.521
5	150	200	77.187 (1.435)	21.930 (9.430)	193 (108)	7.988 (203)	107.298
6	300	200	77.187 (1.435)	98.854 (27.249)	193 (108)	7.988 (203)	184.222
7	300	200	77.187 (1.435)			194.560 (4.305)	271.747
8	75	50	19.297 (359)	19.004 (8.172)			38.301

Anmerkung: ^{a)} Beinhaltet alle eigenbetrieblichen Kosten für Anbau / Schnitt / Einlagerung von Luzerne-Kleegras. ^{b)} Transportkosten für Rindergülle und Stallmist zzgl. Verzinsung Umlaufkapital (6 Monate, 4 %) ^{c)} Es wird angenommen, dass es sich um konventionell produzierte Maissilage handelt. Die Substratkosten beinhalten, die Kosten für den Zukauf von Mais inkl. Ernte / Transport / Einlagerung zzgl. Verzinsung Umlaufkapital (6 Monate, 4 %)

Tabelle 42: Mittlere Jahreskosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)

Anlage	Installierte Leistung	Gesamtanbaufläche	Abschreibung und Zinsen	Substratkosten	Instandhaltungskosten	Sonstiges ^{a)}	Gesamt
	kW _{el}						
1	25	67	52.473	28.014	19.267	16.450	116.204
2	75	200	64.726	85.367	26.804	20.726	197.623
3	150	400	90.288	166.420	32.253	27.335	316.296
4	300	800	156.107	323.521	59.872	34.388	573.888
5	150	200	81.452	107.298	32.253	23.097	244.100
6	300	200	135.818	184.222	52.796	33.051	405.887
7	300	200	140.781	271.747	53.505	33.406	499.439
8	75	50	54.390	38.301	23.925	27.340	143.956

Erläuterung: ^{a)} beinhaltet folgende Kosten: Betriebskosten (Versicherung, Gutachten, Analysen, Betriebsstoffe, bei Anlage 8: Stromkosten), Lohnkosten, Maschinenkosten, Allgemeine Kosten

Tabelle 43: Mittlere Stromgestehungskosten der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)

Anlage	Installierte Leistung	Gesamtanbaufläche	Abschreibung und Zinsen	Substratkosten	Instandhaltungskosten	Sonstiges ^{a)}	Stromgestehungskosten (Gesamt)
	kW _{el}						
1	25	67	29,3	15,6	10,8	9,2	64,9
2	75	200	11,7	15,5	4,9	3,7	35,8
3	150	400	8,1	14,9	2,9	2,5	28,4
4	300	800	7,0	14,5	2,7	1,6	25,8
5	150	200	7,0	9,3	2,8	2,0	21,1
6	300	200	5,9	8,0	2,3	1,4	17,6
7	300	200	6,1	11,9	2,3	1,5	21,8
8	75	50	8,3	5,8	3,6	4,2	21,9

Erläuterung: ^{a)} beinhaltet folgende Kosten: Betriebskosten (Versicherung, Gutachten, Analysen, Betriebsstoffe, bei Anlage 8: Stromkosten), Lohnkosten, Maschinenkosten, Allgemeine Kosten

Die Erlöse der Modellbiogasanlagen setzen sich aus den Wärmeerlöse und den Stromerlösen zusammen (vgl. Tabelle 44). Für die verkaufte Wärme wurde ein Preis von 20 € MWh⁻¹ angenommen, für den Strom die Erlöse gemäß EEG 2017 (mit Ausnahme Modellbiogasanlage 7: EEG-Vergütung ist aufgrund des hohen Anteils an Maissilage nicht möglich, Annahme: Direktvermarktung in Höhe eines durchschnittlichen Börsenpreises). Abzüglich der Gesamtkosten ergeben sich die Unternehmerrgewinne (bzw. Verluste) der Modellbiogasanlagen (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 44: Wärme- und Stromerlöse der Modellbiogasanlagen

Anlage	Installierte Leistung kW _{el}	Gesamtanbaufläche ha	Wärmeverkauf	Wärmeerlöse ^{a)}	Stromverkauf	Stromerlös (EEG 2017)	
			MWh _{th}	€ a ⁻¹	MWh _{el}	Cent kWh ⁻¹	€ a ⁻¹
1	25	67	99	1.989	176	13,32	23.443
2	75	200	426	8.523	528	13,32	70.330
3	150	400	799	15.978	1.056	9,44	99.642
4	300	800	1.479	29.581	2.112	10,30 ^{b)}	217.505
5	150	200	799	15.978	1.080	9,44	101.907
6	300	200	1.479	29.581	2.136	10,30 ^{b)}	219.977
7	300	200	1.479	29.581	2.160	3,50 ^{c)}	75.600
8	75	50	426	8.523	546	23,14	137.452

Anmerkung: ^{a)} Die Wärme wird für 20 € MWh⁻¹ verkauft (bzw. kalkulatorischer Preisansatz) ^{b)} Ermittlung mit dem Höchstwert des anzulegenden Wertes bei Ausschreibungsverfahren (14,88 Cent kWh⁻¹) ^{c)} Aufgrund des Substratmix nicht förderfähig gemäß EEG 2017 und deshalb nur die Stromerlöse aus der Direktvermarktung

Tabelle 45: Mittlere Gesamtkosten, Erlöse und Unternehmergewinne der Modellbiogasanlagen (Untersuchungszeitraum 2010-2014)

Anlage	Installierte Leistung kW _{el}	Gesamtanbaufläche ha	Gesamtkosten	Wärmeerlöse	Stromerlöse	Unternehmergeinn
				€ a ⁻¹		
1	25	67	116.204	1.989	23.443	-90.772
2	75	200	197.623	8.523	70.330	-118.770
3	150	400	316.296	15.978	99.642	-200.676
4	300	800	573.888	29.581	217.505	-326.802
5	150	200	244.100	15.978	101.907	-126.215
6	300	200	405.887	29.581	219.977	-156.329
7	300	200	499.439	29.581	75.600	-394.258
8	75	50	143.956	8.523	137.452	2.019

Einzig die Modellbiogasanlage 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage) kann unter den Bedingungen des EEG 2017 und mit den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen gerade über der Gewinnschwelle wirtschaften (vgl. Tabelle 45). Die Stromerlöse in Höhe von 137.452 € a⁻¹ resultieren aus der hohen EEG-Vergütung für diesen Anlagentyp (hier: 23,14 Cent kWh⁻¹, vgl. Tabelle 44); außerdem wird bei dieser Anlage angenommen, dass sie die Bruttostrommenge einspeist und für den Eigenstrombedarf der Fremdstrom eingekauft wird (Stromeinkaufspreis: 15,00 Cent kWh⁻¹).

Die höchsten Verluste erwirtschaftet die Anlage 7 (300 kW_{el}, 200 ha; v.a. zugekaufte Maissilage als Substrat, keine EEG-Förderung) in Höhe von -394.258 € a⁻¹ (vgl. Tabelle 45). Die Problematik bei Anlage 7 sind die geringen Stromerlöse aufgrund der fehlenden EEG-Förderung. Zwar erwirtschaftet die Anlage 4 (300 kW_{el}, 800 ha; überwiegend eigenbetriebliches Luzerne-Kleegras) auch hohe absolute Verluste (-326.802 € a⁻¹), dennoch müssen bei der Bewertung im Vergleich zu den kleineren Modelbiogasanlagen immer spezifische Kennzahlen hinzugezogen werden: Die Stromgestehungskosten der Anlage 4 in Höhe von 25,8 Cent kWh⁻¹ sind im Vergleich zu den Anlagen 1 bis 3 deutlich geringer.

4.2.2. Ökonomische Kennzahlen des Gesamtbetriebs

Der Betriebszweig Ackerbau des Marktfruchtensystems kann im Mittel der Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 keinen Unternehmergewinn erwirtschaften. Es ergibt sich ein Verlust von ca. -315 € ha⁻¹ (vgl. Tabelle 46). Beim Getreide (Winterweizen, Wintertriticale, Winterroggen) können zwar Unternehmergewinne erwirtschaftet werden, die jedoch nicht ausreichend sind, um die Kosten für den Anbau des Luzerne-Kleegras und der Zwischenfrucht sowie die Verluste der Ackerbohne auszugleichen.

Tabelle 46: Mittlere Erlöse, Kosten und Unternehmergewinne der einzelnen Fruchtarten und des Betriebszweigs Ackerbau in € ha⁻¹ des Marktfruchtensystems in den Untersuchungsjahren 2010-2014

	Luzerne- Kleegras	Winter- weizen	Wintertri- ticale	Zwischen- frucht	Acker- bohne	Winter- roggen
	€ ha ⁻¹					
Erlöse	0	1.726	1.504	0	1.311	1.770
Direktkosten	180	208	208	171	386	174
Arbeits erledigungskosten	523	509	484	124	609	487
Gebäudekosten	81	96	98	0	92	102
Flächenkosten	534	534	534	0	534	534
Sonstige Gemeinkosten	137	137	137	0	137	137
Unternehmergewinn	-1.455	242	43	-295	-447	336
Unternehmergewinn Fruchtfolge				-315		

Aufgrund der höheren Marktfruchterträge und damit höheren Erlöse im Biogassystem sowie der geringeren Kosten für den Anbau von Luzerne-Kleegras können im Mittel der Untersuchungsjahre 2010-2014 Unternehmergewinne im Ackerbau erwirtschaftet werden (vgl. Tabelle 47). Bei den Biogassystemen 1 bis 8 (eigene Biogasanlage) werden die Kosten des Anbaus von Luzerne-Kleegras bei der Biogasanlage mitberücksichtigt, dementsprechend liegt der Unternehmergewinn von Luzerne-Kleegras bei 0 € ha⁻¹. Damit ergibt sich ein Unternehmergewinn im Betriebszweig Ackerbau von 372 € ha⁻¹. Beim Biogassystem 9 (externe Biogasanlage) wird das Luzerne-Kleegras als Bestand zum Selbsternten an eine Biogasanlage abgegeben, dementsprechend fallen keine Erntekosten für das Luzerne-Kleegras an. Die Kosten des Anbaus

von Luzerne-Kleegras betragen daher 1.228 € ha⁻¹. Damit ergibt sich ein Unternehmergewinn für das Biogassystem 9 in Höhe von 127 € ha⁻¹.

Tabelle 47: Mittlere Erlöse, Kosten und Unternehmergewinne der einzelnen Fruchtarten und des Betriebszweigs Ackerbau in € ha⁻¹ des Biogassystems über die Untersuchungsjahre 2010-2014

	Luzerne- Kleegras	Winter- weizen	Winter- Triticale	Zwischen- frucht	Acker- bohne	Winter- roggen
	€ ha ⁻¹					
Erlöse	1.930 ^{a)} (0) ^{b)}	2.354	2.789	0	1.476	2.251
Direktkosten	180	238	258	171	400	200
Arbeits erledigungskosten	998 ^{a)} (296) ^{b)}	592	766	0	611	554
Gebäudekosten	81	102	107	124	93	108
Flächenkosten	534	534	534	0	534	534
Sonstige Gemeinkosten	137	137	137	0	137	137
Unternehmergewinn einzelne Früchte	0 ^{a)} (-1.228) ^{b)}	751	987	-295	-299	718
Unternehmergewinn Ackerbau ^{a)} (Biogassysteme 1 bis 8)			372			
Unternehmergewinn Ackerbau ^{b)} (Biogassystem 9)			127			

Erläuterung: ^{a)} In den Biogassystemen mit eigener Biogasanlage (Biogassysteme 1 bis 8) werden die Kosten des Luzerne-Kleegrasanbaus der Biogasanlage als Substratkosten verrechnet, ^{b)} Im Biogassystem 9 (Substratabgabe an externe Biogasanlage) übernimmt die Ernte des Luzerne-Kleegrases der externe Biogasanlagenbetreiber, dementsprechend sind die Arbeits erledigungskosten geringer.

Die Zusammenführung der Unternehmergewinne / Verluste der Biogasanlage und des Ackerbaus ergibt den Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs für die Biogassysteme 1 bis 8 (eigene Biogasanlage). Von diesen Biogassystemen kann nur das Biogassystem 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, EEG-Vergütung 23,13 Cent kWh⁻¹) im Mittel über die Untersuchungsjahre 2010-2014 einen Unternehmergewinn in Höhe von 412 € ha⁻¹ erwirtschaften (vgl. Tabelle 48). Die gesamtbetrieblichen Unternehmergewinne des Biogassystems 9 (externe Biogasanlage) des Marktfruchtsystems in Höhe von 127 € ha⁻¹ bzw. -315 € ha⁻¹ ergeben sich aus dem Unternehmergewinnen des Ackerbaus. Im Vergleich zum Marktfruchtsystem sind neben den Biogassystemen 8 und 9 zum Teil Biogassysteme mit eigener Anlage ökonomisch vorteilhaft, die gesamtbetrieblich jedoch Verluste erwirtschaften. Die Biogassysteme 2 bis 5 können gesamtbetrieblich einen höheren Unternehmergewinn erwirtschaften als das Marktfruchtsystem. Der höhere Unternehmergewinn im Ackerbau kann die Verluste der Biogasanlagen bei diesen Systemen ausgleichen. Die höheren Marktfruchterträge durch die Integration der Biogasanlagen führen damit zu einer gesamtbetrieblichen Verbesserung der ökonomischen Ergebnisse.

Tabelle 48: Unternehmergeinn der Betriebszweige Ackerbau und Biogasanlage sowie des Gesamtbetriebs in € ha⁻¹ (Basis: arithmetische Mittel der Ernteerträge über die Untersuchungsjahre 2010-2014)

	Installierte Leistung kW _{el}	Gesamtanbaufläche ha	Ackerbau	Biogasanlage € ha ⁻¹	Gesamtbetrieb
Biogassystem 1 (Hauptsubstrat: LKG)	25	67	372	-1.355	-983
Biogassystem 2 (Hauptsubstrat: LKG)	75	200	372	-594	-222
Biogassystem 3 (Hauptsubstrat: LKG)	150	400	372	-502	-130
Biogassystem 4 (Hauptsubstrat: LKG)	300	800	372	-409	-37
Biogassystem 5 (Hauptsubstrat: Rindergülle)	150	200	372	-631	-259
Biogassystem 6 (Hauptsubstrat: Rindergülle)	300	200	372	-782	-410
Biogassystem 7 (Hauptsubstrat: Maissilage, keine EEG-Vergütung)	300	200	372	-1.971	-1.599
Biogassystem 8 (Hauptsubstrat: Rindergülle, Kleine Gülleanlage)	75	50	372	40	412
Biogassystem 9 (extern)	-	200	127	-	127
Marktfruchtssystem	-	200	-315	-	-315

Bei Betrachtung der einzelnen Untersuchungsjahre werden die ertragsspezifischen Jahresunterschiede aller Systeme deutlich (vgl. Abbildung 20). In den ersten drei Untersuchungsjahren erhöhen sich die Unternehmergewinne der Biogassysteme aufgrund der steigenden Erträge. Im Jahr 2013 waren die Ernteerträge in beiden Betriebssystemen aufgrund der damaligen Witterungsbedingungen vergleichsweise gering. Dies spiegelt sich in den überwiegend negativen Unternehmergewinnen wider.

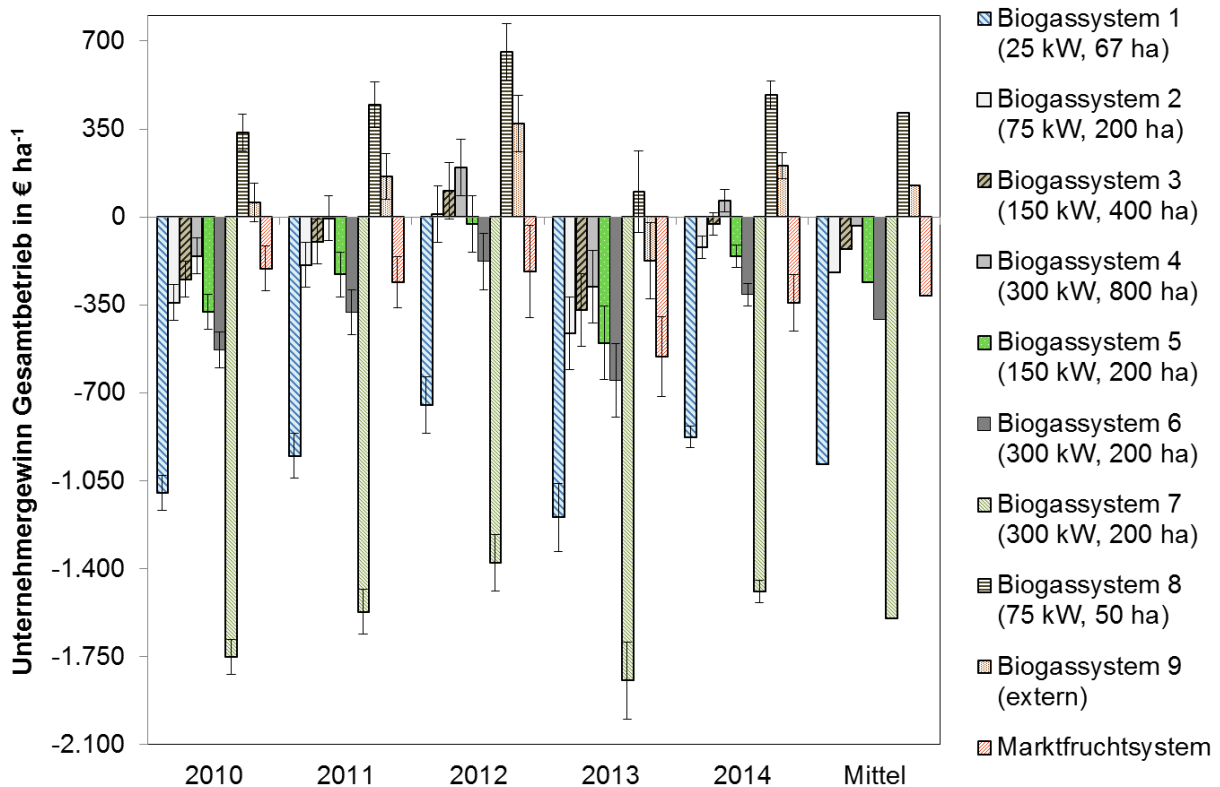


Abbildung 20: Unternehmergewinn der Betriebssysteme in € ha⁻¹
(Basis: arithmetisches Mittel und Standardabweichung, n = 4)

Die ökonomischen Vor- bzw. Nachteile der Biogassysteme lassen sich mit dem „Mehr- bzw. Mindergewinn“ bewerten (Abbildung 21). Ist der Unternehmergewinn des Biogassystems im jeweiligen Betrachtungsjahr größer als der des Marktfruchtsystems, so ergibt sich ein positiver Wert (= „Mehrgewinn“), andernfalls ist der Wert negativ (= „Mindergewinn“). Die Biogassysteme 4 (300 kW_{el}, 800 ha, Hauptsubstrat: eigenbetriebliches LKG) und 8 (Kleine Gülleanlage, 75 kW_{el}) sowie das Biogassystem 9 (extern) sind in allen Untersuchungsjahren ökonomisch vorteilhaft im Vergleich zum Marktfruchtsystem.

Das Biogassystem 8 zeigt den größten „Mehrgewinn“ in Höhe von 540 bis 872 € ha⁻¹ abhängig vom Untersuchungsjahr: Die Biogasanlage selbst kann aufgrund der hohen EEG-Vergütung für kleine Gülleanlagen Gewinne erwirtschaften (vgl. Tabelle 48), so dass sich der Mehrgewinn zwar vor allem aus den kompletten Mehrerlösen durch die Ertragssteigerung ergibt, aber auch zu einem kleinen Teil aus den Gewinnen der Biogasanlage.

Beim Biogassystem 4 fallen durch den Betrieb der Biogasanlage zwar hohe Verluste an (vgl. Tabelle 45; im Mittel des Untersuchungszeitraums: -326.802 € a⁻¹), jedoch steht die Größe der Biogasanlage (300 kW_{el}) optimal zur Gesamtanbaufläche (800 ha) und die Biogasanlage hat aufgrund ihrer Größe geringere spezifische Kosten (Skaleneffekt bei Investitionen und Betriebskosten; vgl. Tabelle 43). Dementsprechend kann das Biogassystem 4 vor allem im Vergleich zu den Biogassystemen 1 bis 3 (gleiches Verhältnis zwischen Anlagengröße und Anbaufläche und gleiche Substratverhältnisse) höhere Mehrgewinne im Gesamtbetrieb generieren.

Die Biogassysteme 2 (75 kW_{el}, 200 ha, Hauptsubstrat: LKG), 3 (150 kW_{el}, 400 ha, Hauptsubstrat: LKG) und 5 (150 kW_{el}, 200 ha, Hauptsubstrat: Rindergülle) können nur im ersten Betrachtungsjahr keinen „Mehrgewinn“ erwirtschaften. Mit dem höheren Ertragseffekt ab dem zweiten Betrachtungsjahr können auch diese Biogassysteme stets einen „Mehrgewinn“ erreichen.

Die stets negativen Werte von den Biogassystemen 1 (25 kW_{el}, 67 ha, Hauptsubstrat: LKG), und 7 (300 kW_{el}, 200 ha, Hauptsubstrat: Maissilage), zeigen die starken ökonomischen Nachteile dieser Systeme im Vergleich zum Marktfruchtssystem. Gleiches gilt für das Biogassystem 6 (300 kW_{el}, 200 ha, Hauptsubstrat: Rindergülle), mit überwiegend negativen Werten.

Das Biogassystem 1 kann aufgrund seiner hohen Verluste durch den Betrieb der Kleinst-Biogasanlage (25 kW_{el}) keinen „Mehrgewinn“ erwirtschaften. Bei den Biogassystemen 6 und 7 können aufgrund der zu großen Biogasanlagengrößen im Vergleich zu den Gesamtanbauflächen (300 kW_{el}, 200 ha) die Verluste des Betriebs der Biogasanlagen nicht durch die Mehrerlöse im Marktfruchtverkauf ausgeglichen werden, so dass keine bzw. nur vereinzelt „Mehrgewinne“ im Untersuchungszeitraum erreicht werden können. Hier ist jedoch anzumerken, dass bei diesen Biogassystemen angenommen wird, dass Gärreste nicht komplett genutzt werden und kostenfrei an die Substratlieferanten zurückgehen (vgl. Kapitel 3.1.4.3).

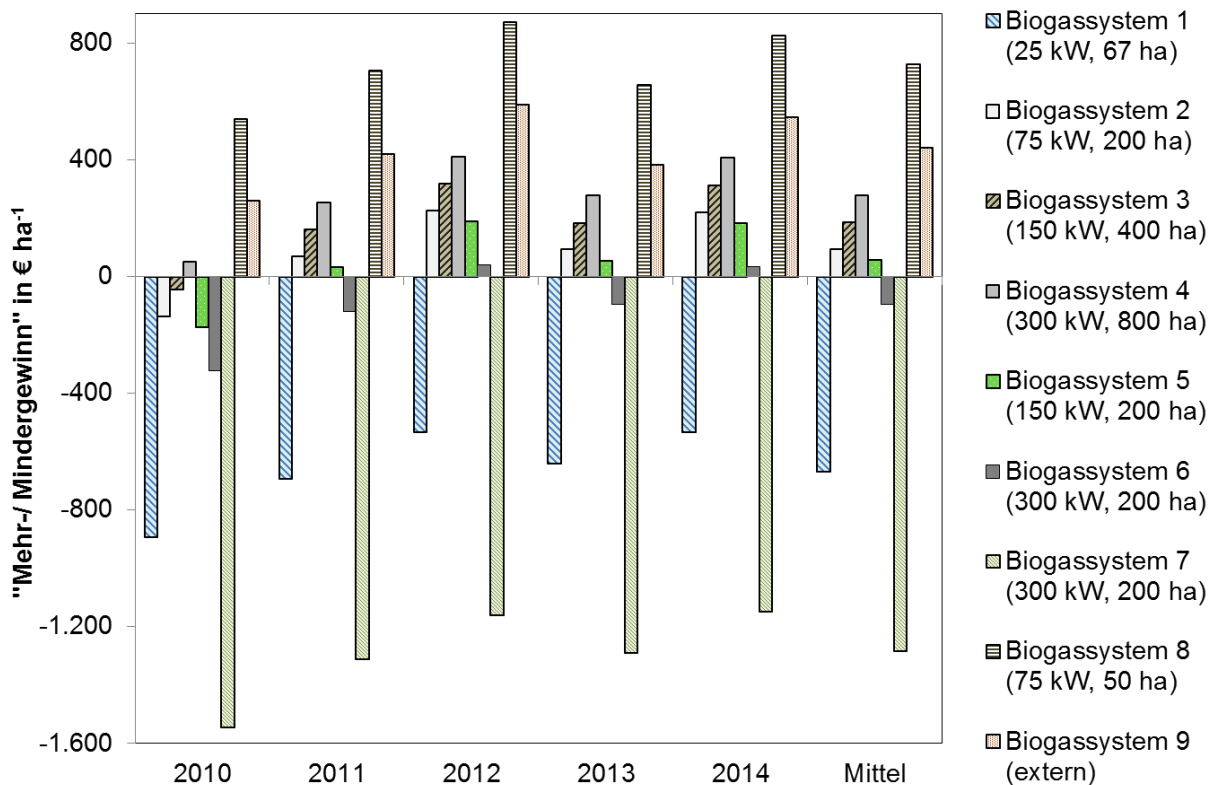


Abbildung 21: "Mehr-/ Minderertrag" der Biogassysteme in € ha⁻¹
(Basis: jährliche arithmetische Mittel der Ernteerträge)

4.2.3. Notwendiger Strompreis für die Vorteilhaftigkeit der Biogassysteme

Aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen bei der Förderung von Biogasanlagen durch das EEG (geringe Fördersätze, Ausschreibungen) sowie hinsichtlich möglicher künftiger Förderungen für Biogasanlagen in ökologisch wirtschaftenden Betrieben müssen die „notwendigen“ Strompreise der Biogassysteme betrachtet werden, die erzielt werden müssten, um im Vergleich zum Marktfruchtssystem einen identischen Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs zu erlangen (Abbildung 22 und Tabelle 49). Diese Strompreise sind für die Biogassysteme also mindestens notwendig, um einen „Mehrgewinn“ zu erzielen. In Tabelle 49 können die notwendigen Strompreise mit den durchschnittlichen Stromerlöse je kWh (Netto-Strommenge) gemäß EEG 2014 und EEG 2017 für die Modellbiogasanlagen verglichen werden.

Tabelle 49: „Notwendiger“ Strompreis im Mittel über die Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 und Erlös des verkauften Stroms mit EEG 2014 bzw. EEG 2017

	Installierte Leistung kW _{el}	Gesamtanbaufläche ha	„Notwendiger“ Strompreis ^b	Erlöse gemäß EEG 2014 ^{a), d)} Cent kWh ⁻¹	Erlöse gemäß EEG 2017 ^{a), d)}
Biogassystem 1 (Hauptsubstrat: LKG)	25	67	38,73	13,66	13,32
Biogassystem 2 (Hauptsubstrat: LKG)	75	200	9,78	13,66	13,32
Biogassystem 3 (Hauptsubstrat: LKG)	150	400	2,41	9,62	9,44
Biogassystem 4 (Hauptsubstrat: LKG)	300	800	-0,26	9,16	10,30
Biogassystem 5 (Hauptsubstrat: Rindergülle)	150	200	8,40	9,62	9,44
Biogassystem 6 (Hauptsubstrat: Rindergülle)	300	200	11,18	9,16	10,30
Biogassystem 7 (Hauptsubstrat: Maissilage, keine EEG-Vergütung)	300	200	15,39	9,16	- ^{c), d)}
Biogassystem 8 (Hauptsubstrat: Rindergülle, Kleine Gülleanlage)	75	50	15,56	23,73	23,14

Erläuterungen: ^{a)} vgl. Tabelle 15, ^{b)} Basis: arithmetische Mittel der Ernteerträge über Untersuchungsjahre 2010-2014, ^{c)} keine Förderung durch das EEG aufgrund des Substratmix möglich und dadurch nur Erlöse durch Stromverkauf möglich, Preis aus Direktvermarktung (Strompreis Börse) ^{d)} Annahme Strompreis Börse 3,5 Cent kWh⁻¹

Die Biogassysteme 2 bis 5 und das Biogassystem 8 können mit den Erlösen aus dem Stromverkauf nach EEG 2014 und EEG 2017 einen „Mehrgewinn“ im Vergleich zum Marktfruchtssystem erzielen. Die ermittelten „notwendigen“ Strompreise (vgl. Tabelle 49) wären im Untersuchungszeitraum niedriger gewesen, als die möglichen Erlöse.

Der „notwendige“ Strompreis vom Biogassystem 4 ist im Mittel des Untersuchungszeitraums mit $-0,26 \text{ Cent kWh}^{-1}$ negativ. Das bedeutet, dass für den „Mehrgewinn“ des Gesamtsystems die Erlöse des Stromverkaufs nicht notwendig sind. Allein die Mehrerlöse des Marktfruchtverkaufs zuzüglich der Wärmeerlöse überkompensieren die Kosten der Biogasanlage.

Die Modellbiogasanlage 8 (75 kW_{el} , kleine Gülleanlage) benötigt im Vergleich zu der gleichgroßen Modellbiogasanlage 2 einen circa doppelt so hohen Strompreis ($15,74 \text{ Cent kWh}^{-1}$), um eine Vorteilhaftigkeit zum Marktfruchtsystem zu erreichen. Der Grund hierfür ist die geringere Anbaufläche des Modellbetriebes 8 und damit ein geringerer Effekt der Ertragssteigerung auf die Ökonomie des Gesamtbetriebes (Annahme: kostenfreie Abgabe des Gärrestes).

Das Biogassystem 1 (25 kW_{el}) benötigt mit $38,78 \text{ Cent kWh}^{-1}$ im Mittel den höchsten Strompreis für einen mindestens vergleichbaren Unternehmergewinn mit dem Marktfruchtsystem (vgl. Tabelle 49). Dieser „notwendige“ Strompreis wäre weder mit der Förderung durch das EEG 2014 noch durch das EEG 2017 gedeckt. Auch die Biogassystem 6 und 7 (300 kW_{el}) benötigen im Untersuchungszeitraum höhere Strompreise für einen mindestens vergleichbaren Unternehmergewinn mit dem Marktfruchtsystem (vgl. Tabelle 49), als mit den Rahmenbedingungen des EEG 2014 und des EEG 2017 möglich ist. Die Modellbiogasanlage 7 (300 kW_{el}) kann nach dem EEG 2017 aufgrund des hohen Maiseinsatzes nicht gefördert werden. Daher können ausschließlich Stromerlöse am Markt generiert werden (Ansatz: Strompreise Börse $3,5 \text{ Cent kWh}^{-1}$), die zur Deckung des „notwendigen“ Strompreis nicht ausreichend sind. Aber auch mit dem EEG 2014 wäre es mit dieser Anlage nicht möglich gewesen „Mehrgewinne“ zu erreichen. Der notwendige Strompreis liegt bei $15,39 \text{ Cent kWh}^{-1}$, der Erlös nach EEG 2014 dagegen bei $9,16 \text{ Cent kWh}^{-1}$.

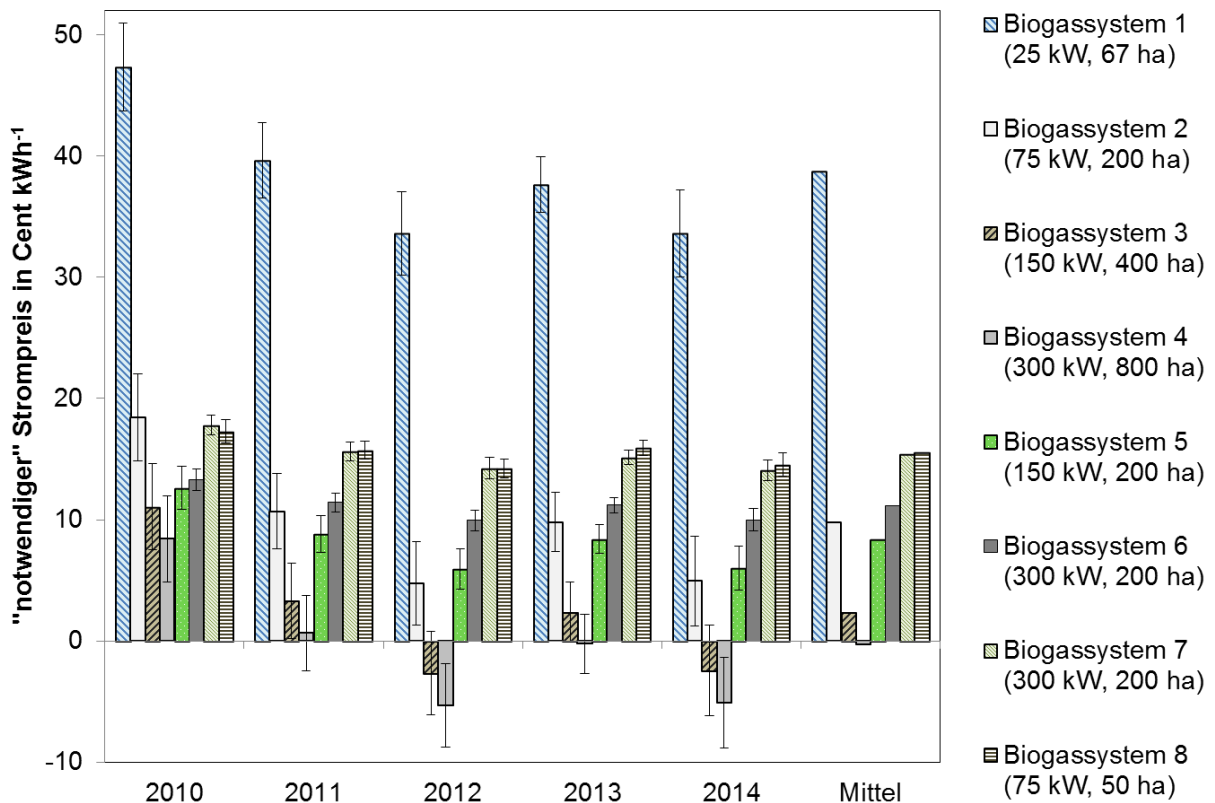


Abbildung 22: „Notwendiger“ Strompreis der Biogassysteme für einen „Mehrgewinn“ in Cent kWh^{-1} (Basis: jährliche arithmetische Mittel der Ernteerträge)

Durch die Betrachtung der jahresspezifischen „notwendigen“ Strompreise zeigt sich der Einfluss der Ertragseffekte auf diese Kennzahl (Abbildung 22). Im ersten Jahr – mit geringeren positiven Ertragseffekten beim Biogassystem (vgl. Tabelle 36 bis Tabelle 39) – sind höhere Strompreise notwendig, um einen „Mehrgewinn“ im Vergleich zum Marktfruchtsystem zu erwirtschaften. Je stärker der Ertragseffekt ist, desto geringer müssen die Strompreise sein, bei ansonsten gleichbleibenden Preisen (v.a. Marktfrüchte, Substrate).

4.2.4. Sensitivitätsanalysen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Biogasanlagen-Parameter Investitionskosten, Wärmepreis und -absatzmenge dargestellt (für die Biogassysteme 1 bis 8). Für die Analyse der Auswirkungen der Veränderungen der oben genannten Parameter auf den Unternehmensgewinn des Gesamtbetriebs sind die arithmetischen Mittelwerte der Ernteerträge des Systemversuchs Viehhausen für den Untersuchungszeitraum gewählt (Untersuchungsjahre 2010 bis 2014). Außerdem sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Ertragseffekte dargestellt (für die Biogassysteme 1 bis 9). Die Plan-Unternehmensgewinne sind zum Vergleich in Tabelle 48 ersichtlich.

Einfluss der Investitionskosten

Eine Abweichung der tatsächlichen Investitionskosten der Biogasanlagen von den geplanten Investitionskosten (vgl. Tabelle 15) beeinflusst die Ökonomie der Gesamtbetriebe erheblich (Abbildung 23). Eine Abweichung von den geplanten Investitionskosten der Biogasanlage wirkt sich besonders stark auf die Biogassysteme aus, die im Vergleich zu der installierten Leistung ihrer Biogasanlage über eine geringe Anbaufläche verfügen. Verstärkt wird die Sensitivität bei kleinen Biogasanlagen aufgrund der höheren spezifischen Investitionskosten. In dem dargestellten Abweichungsbereich von -25% bis +25% schwankt z.B. der Unternehmensgewinn vom Biogassystem 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, 50 ha) um ca. 826 € ha⁻¹. Am geringsten wirkt sich die Abweichung von den geplanten Investitionskosten auf Biogassysteme aus, die über eine größere Biogasanlage (geringere spezifische Kosten) und im Vergleich zu der installierten Leistung ihrer Biogasanlage über eine große Anbaufläche verfügen. In dem dargestellten Abweichungsbereich von -25% bis +25% schwankt z.B. der Unternehmensgewinn vom Biogassystem 4 (300 kW_{el}, 800 ha) um ca. 150 € ha⁻¹. Beim Biogassystem 4 schwankt das ökonomische Ergebnis zwischen Unternehmensgewinn und Verlust innerhalb des Abweichungsbereichs. Die Biogassysteme 2 (75kW_{el}, 200 ha), 5 (150 kW_{el}, 200 ha) und 6 (300 kW_{el}, 150 ha) waren innerhalb des Abweichungsbereichs der Investitionskosten hinsichtlich des Unternehmensgewinns des Gesamtbetriebs sowohl vorteilhaft als auch nachteilig im Vergleich zum Marktfruchtsystem (-315 € ha⁻¹; vgl. Tabelle 48).

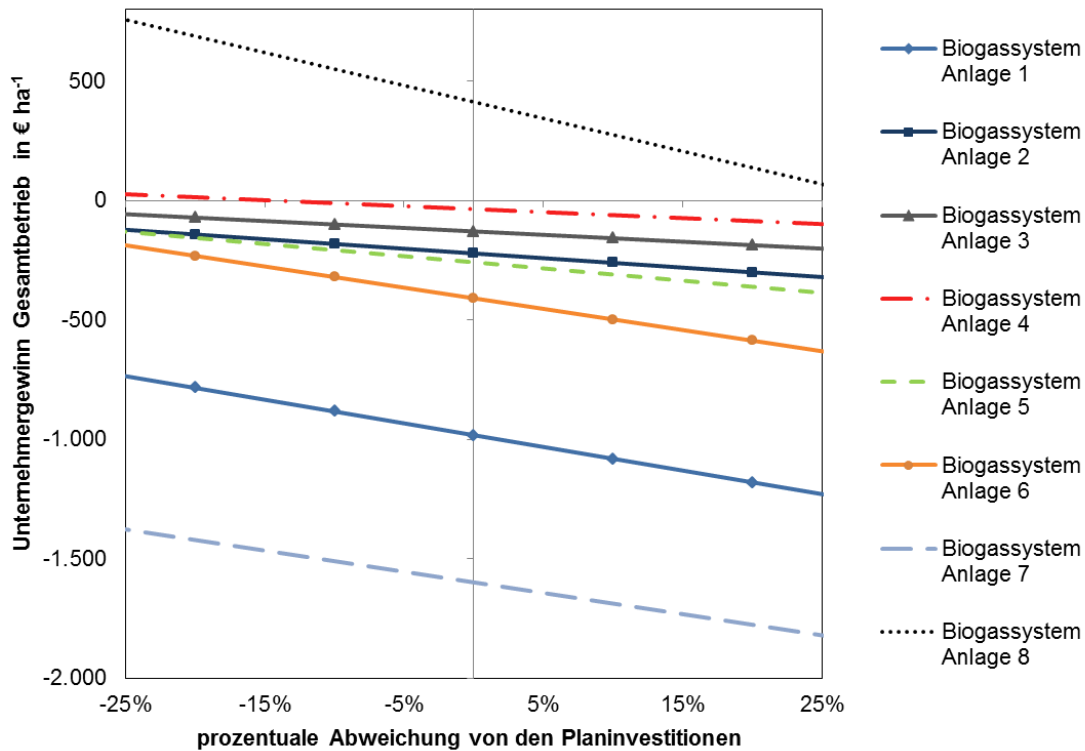


Abbildung 23: Einfluss der Investitionskosten auf die Unternehmergewinne

Einfluss der Wärmeabsatzmenge

Eine Veränderung der Wärmeabsatzmenge (Plan: 50 % der produzierten Wärmemenge) wirkt sich stärker bei den größeren Biogasanlagen (Anlage 6 und 7, jeweils 300 kW_{el}) mit einer größeren Wärmeproduktion aus bzw. bei Biogassystemen mit einer größeren Biogasanlage im Verhältnis zur Anbaufläche (z.B. Anlage 8; 75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, 50 ha) (Abbildung 24). In dem dargestellten Bereich von 0 % bis 60 % schwankt der Unternehmergewinn vom Biogassystem 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, 50 ha) um ca. 205 € ha⁻¹ und von den Biogassystemen 6 und 7 um ca. 178 € ha⁻¹. Das Biogassystem 1 (25 kW_{el}, 67 ha) hat die geringste Sensitivität gegenüber der Parameterveränderung Wärmeabsatzmenge. In dem Bereich von 0 % bis 60 % Wärmeabsatzmenge schwankt der Unternehmergewinn vom Biogassystem 1 lediglich um ca. 36 € ha⁻¹.

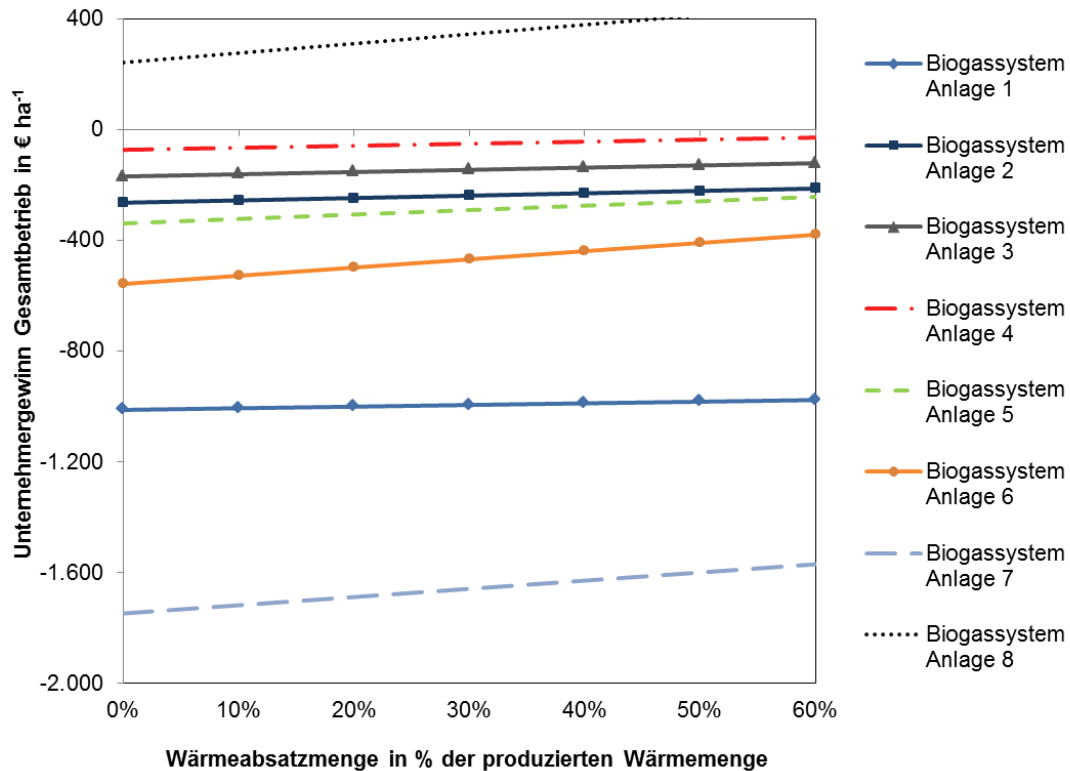


Abbildung 24: Einfluss der Wärmeabsatzmenge auf die Unternehmerrgewinne

Einfluss des Wärmepreises

Für die ökonomische Auswirkung der Veränderung des Wärmepreises auf die Biogassysteme (Abbildung 25) gelten die gleichen Zusammenhänge wie bei der Wärmeabsatzmenge. Je größer die Biogasanlage (größere Wärmeabsatzmenge) und je kleiner die Anbaufläche des Biogassystems ist, desto stärker wirkt sich die Veränderung des Wärmepreises aus. In dem betrachteten Bereich der Wärmepreisveränderung (0 bis 100 € MWh_{th}⁻¹, Plan: 20 € MWh_{th}⁻¹) sind die Biogassysteme 5 (150 kW_{el}, 200 ha) und 6 (300 kW_{el}, 150 ha) sowohl ökonomisch vorteilhaft wie auch nachteilig im Vergleich zum Marktfruchtssystem. Die stärkste Schwankung beim Unternehmerrgewinn zeigt das Biogassystem 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, 50 ha) in Höhe von ca. 852 € ha⁻¹. Die geringste Schwankung beim Unternehmerrgewinn zeigt das Biogassystem 1 (25 kW_{el}, 67 ha) in Höhe von ca. 148 € ha⁻¹.

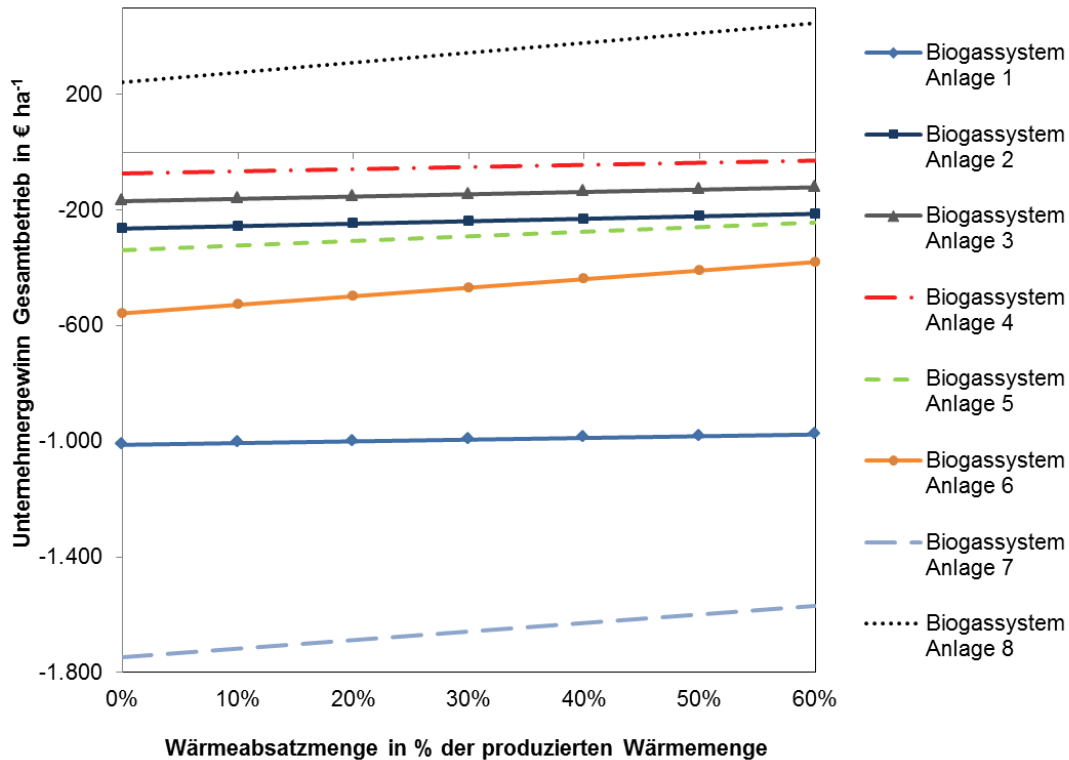


Abbildung 25: Einfluss des Wärmepreises auf die Unternehmergewinne

Alle drei Faktoren (Investitionskosten, Wärmeabsatzmenge und Wärmepreis) können zu einer deutlichen Veränderung des ökonomischen Ergebnisses des Gesamtbetriebes führen. Dementsprechend wichtig ist es, diese Faktoren vor der Entscheidung für oder gegen die Integration einer Biogasanlage in den Betrieb zu prüfen und abzusichern (z.B. verbindliches Angebot, Wärmelieferungsvertrag).

Einfluss des Ertragseffekts

Für die Sensitivitätsanalyse der Ertragseffekte auf den Unternehmergewinn der Biogassysteme werden die arithmetischen Mittel der Ernteerträge aus dem Systemversuch Viehhausen über den gesamten Untersuchungszeitraum (2010 bis 2014) als Datenbasis verwendet (vgl. Tabelle 17). Der Ertragseffekt wird zwischen 0 % und 140 % variiert, wobei 0 % die Erträge des Marktfruchtensystems darstellen und 100 % die Erträge des Biogassystems (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Annahmen zu Ernteerträgen im Biogassystem für die Sensitivitätsanalyse

	Ertragseffekt		
	0 % = Ertrag Marktfruchtssystem ^{a)}	100 % = Ertrag Biogassystem ^{b)}	140 %
	t TM ha ⁻¹		
Winterweizen	3,88	5,29	5,85
Wintertriticale	4,41	6,46	7,28
Ackerbohne	2,78	3,13	3,28
Winterroggen	5,27	6,70	7,27

Erläuterungen: ^{a)} Mittlere Erträge des Marktfrucht-systems im Untersuchungszeitraum 2010-2014, ^{b)} Mittlere Erträge des Biogassystems im Untersuchungszeitraum 2010-2014

Die Sensitivitätsanalyse der Ertragseffekte (vgl. Tabelle 51) zeigt, dass je nach Biogassystem unterschiedlich hohe Ertragseffekte notwendig sind, um einen Unternehmergewinn zu erwirtschaften bzw. vorteilhaft im Vergleich zum Marktfruchtssystem zu sein (-315 € ha⁻¹; vgl. Tabelle 48).

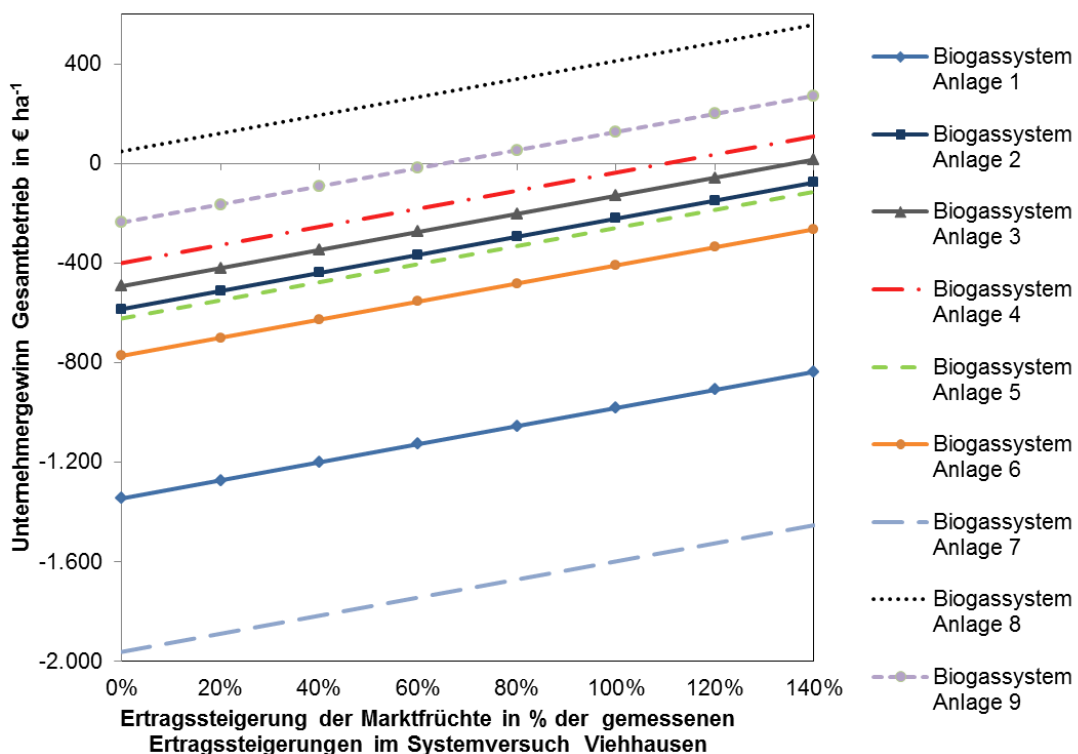


Abbildung 26: Einfluss der Ertragssteigerung auf die Unternehmergewinne

Tabelle 51: Notwendiger Ertragseffekt der Marktfrüchte zum Erreichen eines Unternehmergewins und eines Mehrgewinns im Vergleich zum Marktfruchtsystem

Biogassystem	Installierte Leistung	Gesamtanbaufläche	Notwendiger Ertragseffekt der Marktfrüchte [%] ^{a)}	
			Unternehmergeinn (> 0)	Mehrgewinn
	kW _{el}	ha		
1	25	67	- b)	- b)
2	75	200	-b)	74 %
3	150	400	136 %	49 %
4	300	800	110 %	23 %
5	150	200	- b)	85 %
6	300	200	- b)	126 %
7	300	200	- b)	- b)
8	75	50	0 %	0 %
9 (extern)	-	200	65 %	0 %

Erläuterung: ^{a)} Der notwendige Ertragseffekt bezieht sich auf die mittleren Ertragssteigerungen im Systemversuch Viehhausen über den Betrachtungszeitraum (2010-2014), 100 % entspricht den gemessenen Erträgen des Biogassystems und 0 % entspricht den Erträgen des Marktfruchtsystems, ^{b)} Auch bei 140 % Ertragssteigerung kann kein Unternehmergeinn bzw. Mehrgewinn erwirtschaftet werden

Das Biogassystem 8 (75 kW_{el}, kleine Gülleanlage, 50 ha) kann auch ohne eine Ertragssteigerung einen Unternehmergeinn im Gesamtbetrieb erwirtschaften. Das Biogassystem 9 (externe Biogasanlage) kann einen Unternehmergeinn bei ca. 65 % der im Systemversuch erreichten Ertragssteigerungen erwirtschaften und kann auch ohne Ertragssteigerungen einen Mehrgewinn im Vergleich zum Marktfruchtsystem erreichen. Der Grund hierfür sind die eingesparten Kosten beim Luzerne-Klee gras aufgrund der Schnittnutzung durch den externen Biogasanlagenbetreiber. Die Biogassysteme 2 bis 6 erreichen einen Mehrgewinn im Vergleich zum Marktfruchtsystem bei 23 % bis 126 % der gemessenen Ertragseffekte. Die Biogassysteme 1 und 7 können im betrachteten Abweichungsbereich der Ertragseffekte weder einen Mehrgewinn im Vergleich zum Marktfruchtsystem noch einen Unternehmergeinn erwirtschaften.

4.2.5. Monte-Carlo-Simulation

Die Risikobewertung von Parametern, die erst nach der Investitionsentscheidung für eine Biogasanlage eintreten, wird mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Zu diesen Parametern werden neben den technischen Risiken, der Eigenstrombedarf der Biogasanlagen sowie die Entwicklung von Marktpreisen und Erträgen gezählt. Auch wird bei der Risikoanalyse berücksichtigt, dass gegebenenfalls in Zukunft ein Einsatz konventioneller Maissilage aufgrund rechtlicher Vorgaben (bzw. durch Richtlinien der Anbauverbände) nicht mehr möglich

sein wird. Die Risikoparameter sowie deren Verteilung sind in Kapitel 3.1.5.2 beschrieben. Die Zielgrößen Unternehmensgewinn sowie Mehrgewinn sind in Kapitel 3.1.3.1. definiert. Die Berechnungen erfolgen mit der Software @RISK. Es werden jeweils 10.000 Simulationsläufe durchgeführt.

In Abbildung 27 sowie Abbildung A 1 bis Abbildung A 9 sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmensgewinne der Biogassysteme und des Marktfruchtsystems als Output der Software @RISK dargestellt. Hierfür werden alle in Kapitel 3.1.5.2 definierten Risikoparameter gleichzeitig simuliert. Aus den Abbildungen geht hervor, in welchem Bereich der simulierte Unternehmensgewinn häufiger vorliegt. Zusätzlich ist in den Graphiken der Wertebereich um den Median markiert (roter Balken), in welchem zu 90 % die erzielten Unternehmensgewinne liegen.

Die bereits statisch ermittelten Unternehmensgewinne (vgl. Kapitel 4.2.2) befinden sich bei allen Betriebssystemen mittig in ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung (vgl. Abbildung 27 sowie Abbildung A 1 bis Abbildung A 9). Damit kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der statisch ermittelten Unternehmensgewinne auch bei schwankenden Marktpreisen sowie bei praxisüblichen Schwankungen von Substratverlusten durch Lagerung bzw. Transport und beim Biogasanlagenbetrieb Gültigkeit haben.

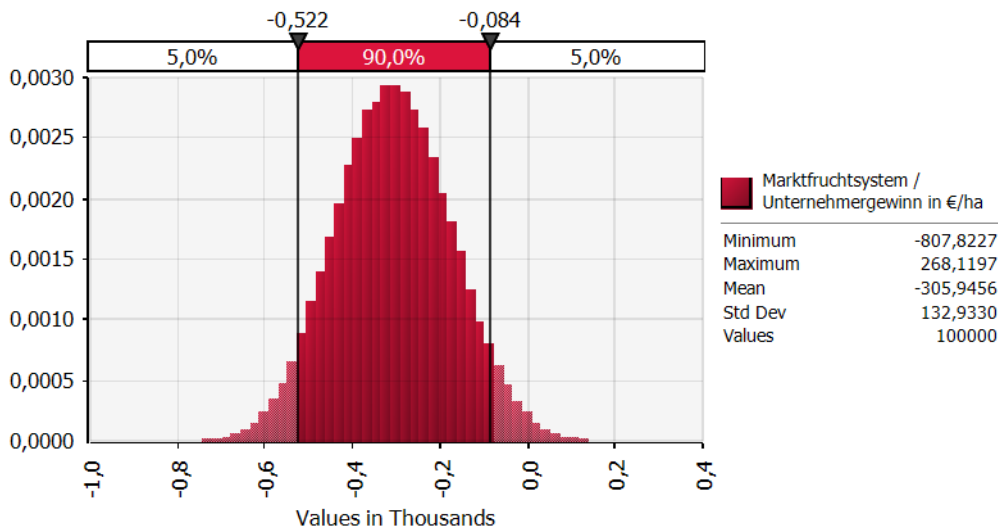


Abbildung 27: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmensgewinne in € ha⁻¹ des Marktfruchtsystems

Das Marktfruchtsystem zeigt bei der Simulation aller Risikoparameter (vgl. Kapitel 3.1.5.2) eine Schwankungsbreite von 1.076 € ha⁻¹ bei der Verteilung des Unternehmensgewinns. Die Schwankungsbreiten bei den Biogassystemen betragen 1.054 bis 1.521 € ha⁻¹ (vgl. Abbildung 27 sowie Abbildung A 1 bis Abbildung A 9). Die größten Schwankungen ergeben sich bei den Biogassystemen mit einer geringen Anbaufläche im Vergleich zur installierten elektrischen Leistung der Biogasanlage (Biogassysteme 6, 7 und 8). Je größer die Biogasanlage im Verhältnis zur Gesamtanbaufläche des Betriebes ist, desto größer ist der Schwankungsbereich des Unternehmensgewinns des Gesamtbetriebs. Das Biogassystem 7 hat mit 1.521 € ha⁻¹ den

größten Schwankungsbereich, nicht nur wegen der Anlagengröße im Vergleich zur Anbaufläche, sondern auch wegen des hohen Einsatzes von Maissilage als Substrat. Für die Maissilage wird in dieser Risikosimulation angenommen, dass künftig eventuell keine konventionelle Maissilage mehr eingesetzt werden darf und damit ein hohes Risiko im Einkaufspreis der Maissilage besteht.

In Abbildung 28 werden neben den Schwankungsbereichen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne bei der Simulation aller Parameter („Gesamt“) auch die Schwankungsbereiche gezeigt, die sich durch die alleinige Simulation der Risikoparameter „Marktfrüchte und Substrate“ (Erträge und Preise) sowie durch die Risikoparameter des Biogasprozesses (spezifischer Methanertrag der Substrate, Substratverluste bei Transport und Lagerung, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad, Verfügbarkeit in Volllaststunden, Eigenstrombedarf, Instandhaltungskosten, Abschreibung) bei den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Biogassystemen ergeben.

Die Schwankungsbereiche der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Unternehmergewinne, die durch die Simulation der Risikoparameter „Marktfrüchte und Substrate“ entstehen, weichen bei allen Betriebssystemen nur wenig von dem Schwankungsbereich aller Parameter (= Gesamt“) ab (vgl. Abbildung 28). Das bedeutet, dass sich Ertragsschwankungen stark auf die Unternehmergewinne auswirken. Stabile Erträge wirken sich demnach risikominimierend auf den Unternehmergewinn aus, schwankende Erträge erhöhen das Risiko für das Erreichen von Planzahlen.

Durch die alleinige Simulation der Risikoparameter des Biogasprozesses zeigt sich, dass Veränderungen bei diesen Risikoparametern weniger Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Unternehmergewinne der Biogassysteme haben als Veränderungen im Bereich „Marktfrüchte und Substrate“. Risikoparameter des Biogasprozesses wirken sich umso stärker auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Unternehmergewinne aus, je größer die Biogasanlage im Verhältnis zur Anbaufläche und damit zur Menge eigenbetrieblicher Substrate ist. Deutlich wird dies durch den Vergleich der Biogassysteme 6 und 7 (300 kW, 200 ha) sowie 8 (75 kW, 50 ha) mit den Biogassystemen 1 bis 4.

Das Biogassystem 7 zeigt bei identischer Anlagengröße und Gesamtanbaufläche eine leicht größere Schwankungsbreite, als das Biogassystem 6. Dies liegt an dem unterschiedlichen Substratmix. Die Anlage von Biogassystem 7 vergärt als Ko-Substrat ausschließlich zugekaufte Maissilage, die Anlage von Biogassystem 6 einen hohen Anteil an kostenfreier Rindergülle (nur Transportkosten). Eine Änderung im Biogasprozess bewirkt einen veränderten Substratmengenbedarf, der sich bei höheren Substratkosten stärker auf den Unternehmergewinn auswirkt.

Beim Biogassystem 8 wirkt sich außerdem die deutlich höhere EEG-Vergütung (kleine Gülleanlage) auf die Schwankungsbreite aus. Durch die hohe Stromvergütung wirken sich Verbesserungen und Verschlechterungen im Biogasprozess ökonomisch stärker aus.

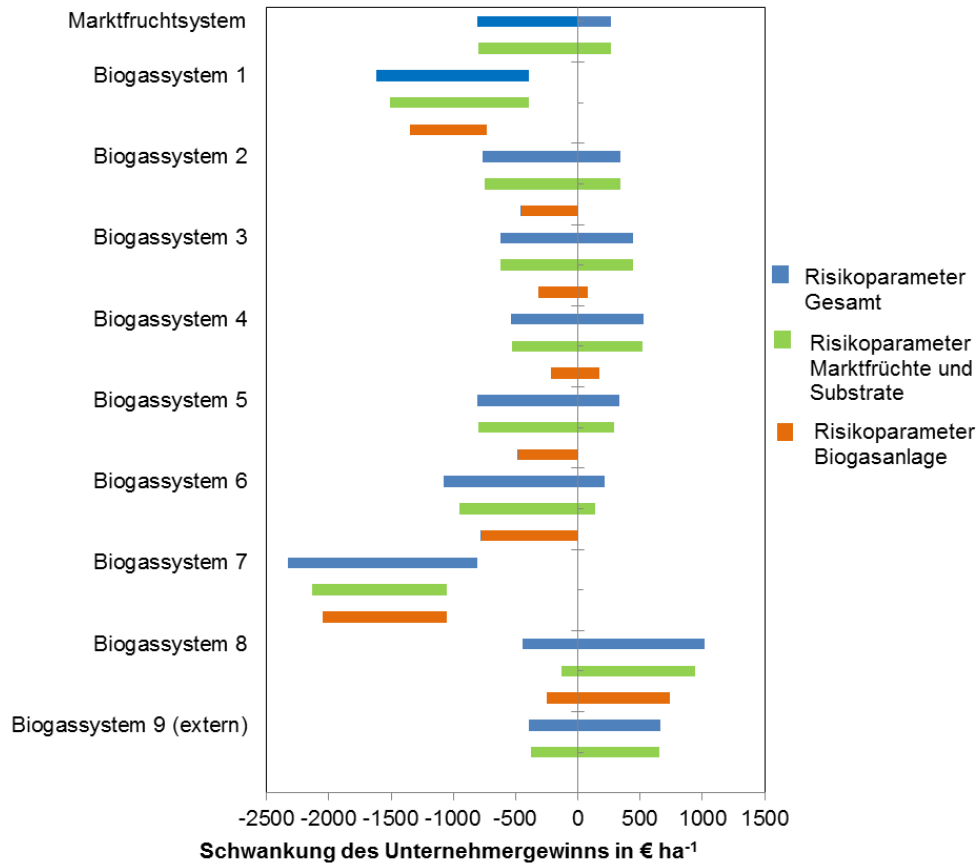


Abbildung 28: Schwankungsbereiche des Unternehmergewins der Biogassysteme aufgrund der Simulation aller Risikoparameter (Gesamt) sowie von einzelnen Parametergruppen (Marktfrüchte/ Substrate, Biogasanlage) in € ha⁻¹

Vor dem Hintergrund der Entscheidung eines Betriebsleiters zur Integration einer Biogasanlagen in einen viehlosen Marktfruchtbetrieb wurde zum einen die mit der Monte-Carlo-Simulation ermittelten Wahrscheinlichkeiten zusammengefasst, mit welchen die einzelnen Betriebssysteme einen positiven (größer oder gleich Null) Unternehmergeinn erzielen (Tabelle 52) und zum anderen die Wahrscheinlichkeiten eines „Mehrgewinns“ der Biogassysteme im Vergleich zum Marktfruchtsystem dargestellt (Tabelle 53).

Tabelle 52: Wahrscheinlichkeit eines Unternehmergewins der Biogassysteme und des Marktfruchtsystems (keine Berücksichtigung von landwirtschaftlichen Subventionen)

	Wahrscheinlichkeit in %
Marktfruchtsystem	1,1
Biogassystem 1	0,0
Biogassystem 2	4,4
Biogassystem 3	17,9
Biogassystem 4	39,4
Biogassystem 5	3,6
Biogassystem 6	0,4
Biogassystem 7	0,0
Biogassystem 8	94,8
Biogassystem 9 (extern)	79,7

Tabelle 53: Wahrscheinlichkeit eines „Mehrgewinns“ der Biogassysteme im Vergleich zum Marktfruchtsystem

	Wahrscheinlichkeit in %
Biogassystem 1	0,0
Biogassystem 2	63,0
Biogassystem 3	82,0
Biogassystem 4	92,1
Biogassystem 5	59,2
Biogassystem 6	28,9
Biogassystem 7	0,0
Biogassystem 8	95,0
Biogassystem 9 (extern)	98,9

Mit Ausnahme bei den Biogassystemen 1 und 7 ergeben sich bei allen Betriebssystemen Wahrscheinlichkeiten von größer 0,0 %, dass die jeweiligen Betriebssysteme einen positiven Unternehmergeinn erzielen (vgl. Tabelle 52). Das Marktfruchtsystem kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 1,1 % einen positiven Unternehmergeinn erwirtschaften. Die Biogassysteme 8 und 9 (extern) können mit Wahrscheinlichkeiten von 94,8 % bzw. 79,7 % einen positiven Unternehmergeinn erzielen.

Für Biogassystem 1 ergibt sich die Wahrscheinlichkeit einen „Mehrgewinn“ zu erlangen in Höhe von 0,0 % (vgl. Tabelle 53), gleiches gilt für das Biogassystem 7. Mit Wahrscheinlichkeiten über 80 % können dagegen das Biogassystem 3, 4, 8 sowie 9 (extern) einen „Mehrgewinn“ erzielen.

Ein angepasstes System aus Gesamtanbaufläche, Substratmix und Biogasanlagengröße ist also bestimmend für den ökonomischen Erfolg der Integration einer Biogasanlage in ein viehloses Marktfruchtsystem.

5. Ergebnisse der betrieblichen Fallstudie unter Praxisbedingungen

5.1. Ertragseffekte der Marktfrüchte durch die Gärrestedüngung

Im Praxisbetrieb wurden in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) – vier bis sechs Jahre nach Inbetriebnahme der Biogasanlage – im Mittel überwiegend höhere Marktfruchterträge gemessen als in Phase 1 (Untersuchungsjahre 2001- 2003, 2004-2006) (vgl. Tabelle 54). Die Datenbasis stellen die mittleren Erträge der beiden Untersuchungsphasen dar. Das Ertragsverhältnis (FM-Ertrag Phase 2 / FM-Ertrag Phase 1) beim Getreide als arithmetisches Mittel über alle Getreidearten beträgt 1,16. Starke Ertragszuwächse sind vor allem bei der Wintergerste (Ertragsverhältnis 1,53) und der Sommergerste (Ertragsverhältnis 1,31) zu verzeichnen.

Tabelle 54: Durchschnittlich gemessene Erträge in dt FM ha⁻¹ und Ertragsverhältnis im Praxisbetrieb

	Praxisbetrieb		
	Phase 1	Phase 2	Ertragsverhältnis ^{b)}
Getreide ^{a)}			1,20
Wintergerste	27,3	41,7	1,53
Winterroggen	34,7	34,2	0,99
Wintertriticale	34,0	40,0	1,18
Dinkel	37,5	38,6	1,03
Winterweizen	41,3	49,2	1,19
Hafer	36,1	43,3	1,20
Sommergerste	28,8	37,7	1,31
Erbsen	35,6	37,9	1,06
Ackerbohne	26,5	30,9	1,17

Anmerkung: ^{a)} arithmetisches Mittel in Bezug auf die Anbaufläche der Getreidearten im Praxisbetrieb, ^{b)} Ertragsverhältnis: FM-Ertrag Phase 2 / FM-Ertrag Phase 1

Trotz der höchsten Düngerapplikation bei den Marktfrüchten mit ca. 205 kg ha⁻¹ N hat Winterweizen mit einem weniger starken Ertragszuwachs (Ertragsverhältnis 1,19) in Phase 2 reagiert als z.B. Wintergerste (Düngung ca. 185 kg ha⁻¹ N) oder Sommergerste (Düngung ca. 135 kg ha⁻¹ N). Winterweizen wurde in den Untersuchungsjahren überwiegend nach Klee gras angebaut und stand damit in Phase 1 direkt nach der Grünbrache. In dieser Fruchtfolgestellung wurde Winterweizen in Phase 1 bevorzugt mit Nährstoffen versorgt.

Die Erträge von Winterroggen (Ertragsverhältnis 0,99) und Dinkel (Ertragsverhältnis 1,03) sind nahezu konstant. Beides sind Getreidearten zu denen eine vergleichsweise geringe Gärrestmenge appliziert wurde (Winterroggen ca. 70 kg ha⁻¹ N, Dinkel ca. 55 kg ha⁻¹ N).

Auch bei den leguminen Marktfrüchten Ackerbohne und Erbsen zeigen sich Ertragssteigerungen (Ertragsverhältnis 1,17 bzw. 1,06). Auch diese wurden mit Gärresten gedüngt: Zur Ackerbohne wurden im Mittel ca. 121 dt ha⁻¹ fester Gärrest ausgebracht und zu den Erbsen ca. 14 m³ ha⁻¹ flüssiger Gärrest und 240 dt ha⁻¹ fester Gärrest.

Neben der Stellung in der Fruchtfolge und der Höhe der Gärrestedüngung haben aber auch andere Faktoren die Ertragseffekte in Phase 2 beeinflusst. Vor allem jahresbedingte Ertragschwankungen durch Witterungseinflüsse sind hier zu nennen, die bei den unterschiedlichen Getreidearten abhängig vom Aussattermin und der Wachstumsdauer unterschiedliche Effekte verursacht haben.

5.2. Ökonomische Bewertung der Integration der Biogasanlage

Die Ertragssteigerungen bei den Marktfrüchten in Phase 2 (vgl. Tabelle 54) sowie die höheren Verkaufspreise (vgl. Tabelle 28) führten bei allen untersuchten Marktfrüchten zu Mehrgewinnen (vgl. Basisvariante, Abbildung 29). Die Mehrgewinne der Marktfrüchte fielen unterschiedlich aus, in einem Bereich von 131 € ha⁻¹ (Wintertriticale) bis 823 € ha⁻¹ (Erbsen). Werden für die Ermittlung des Mehrgewinns in Phase 2 die tatsächlichen Erträge, aber die Marktpreise aus Phase 1 angesetzt (Variante 1), so kann bei Winterroggen, Wintertriticale und Dinkel kein Mehrgewinn erzielt werden. Gründe sind die höheren Anbaukosten wegen der Düngung (Gärreste) und bei Winterroggen zudem ein etwas geringerer Ertrag (vgl. Tabelle 54).

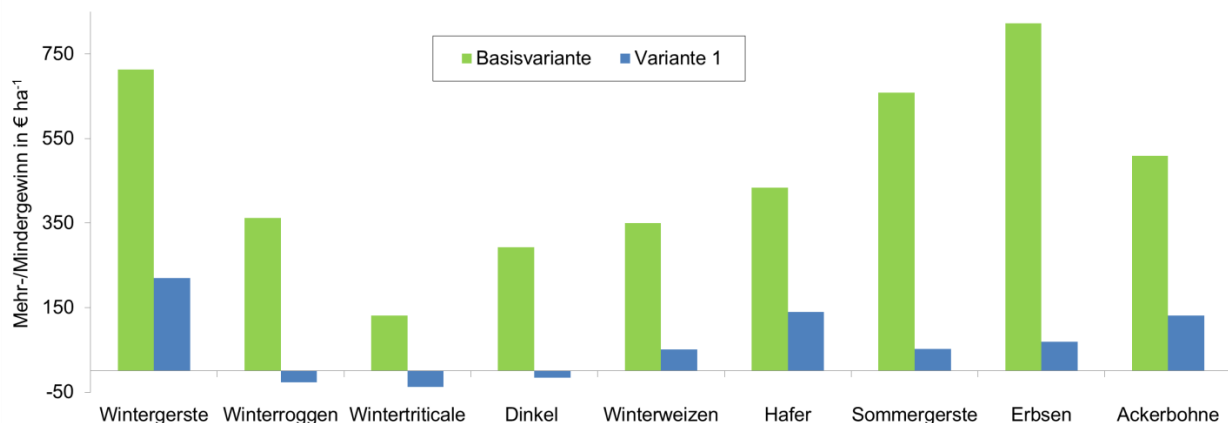


Abbildung 29: „Mehr-/Mindergewinn“ der untersuchten Marktfrüchte in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) in € ha⁻¹

Gesamtbetrieblich betrachtet konnte der untersuchte Betrieb in Phase 2 im Vergleich zu Phase 1 einen „Mehrgewinn“ in Höhe von ca. 1.850 € ha⁻¹ erzielen (vgl. Tabelle 55). Der Mehrgewinn ergab sich aus einem „Mehrgewinn“ im Ackerbau und aus dem Gewinn der Biogasanlage. Der Mehrgewinn des Ackerbaus in Höhe von ca. 529 € ha⁻¹ ergab sich aus den höheren Marktfruchterträgen in Phase 2, aber auch aufgrund der höheren erzielten Preise für die Marktfrüchte (vgl. Tabelle 28). Die hohe EEG-Einspeisevergütung, die für den Strom der Praxisbiogasanlage gilt (26,66 Cent kWh_{el}⁻¹), sowie der mengenmäßig hohe Wärmeverkauf zu marktüblichen Wärmepreisen (75 € MWh⁻¹) spiegelte sich im Unternehmergewinn der Biogasanlage in Höhe von rund 334.320 € a⁻¹ wider. Bezogen auf die betrachtete Anbaufläche in Phase 2 ergab sich ein Unternehmergewinn von ca. 1.320 € ha⁻¹ für die Biogasanlage.

Der „notwendige“ Strompreis für die Netto-Strommenge der Biogasanlage, so dass der Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs in Phase 1 und Phase 2 identisch gewesen wäre, betrug 12,56 Cent kWh_{el}⁻¹. Dieser Strompreis wäre mindestens notwendig gewesen, um durch die

Integration der Biogasanlage im Praxisbetrieb einen „Mehrgewinn“ im Untersuchungszeitraum zu erzielen. Mit der für diese Biogasanlage geltenden EEG-Förderung wird der eingespeiste Strom wesentlich höher vergütet als „notwendig“. Mit der aktuellen EEG-Förderung (2017) würde der Biogasanlage jedoch der „notwendige“ Strompreis nicht gezahlt werden (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 55: Ökonomische Ergebnisse des Betriebs in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014)

Parameter	Einheit	Wert
Stromerlöse	€ a ⁻¹	826.703
Wärmeerlöse	€ a ⁻¹	157.712
Gesamtkosten Biogasanlage	€ a ⁻¹	645.522
Unternehmergewinn Biogasanlage	€ a ⁻¹	341.893
Mehrgewinn im Ackerbau	€ ha ⁻¹	529
Mehrgewinn im Gesamtbetrieb	€ ha ⁻¹	1.850
„Notwendiger“ Strompreis	Cent kWh _{el} ⁻¹	12,56

Die Marktpreise, die in Phase 2 vom Praxisbetrieb erzielt wurden, lagen 13 % bis 55 % über den Preisen aus Phase 1 (vgl. Tabelle 28). Der realisierte „Mehrgewinn“ in Phase 2 (= Basisvariante) ergab sich also auch aufgrund der höheren Marktpreise. Werden für die Ermittlung des Mehrgewinns in Phase 2 zwar die tatsächlichen Erträge, jedoch die gleichen Marktpreise angesetzt wie in Phase 1 (Variante 1), zeigt sich ein Mehrgewinn für den Gesamtbetrieb in Höhe von ca. 1.464 € ha⁻¹ (vgl. Abbildung 30). Der Mehrgewinn des Ackerbaus in Höhe von ca. 144 € ha⁻¹ ergibt sich nun ausschließlich aus den höheren Marktfruchterträgen in Phase 2.

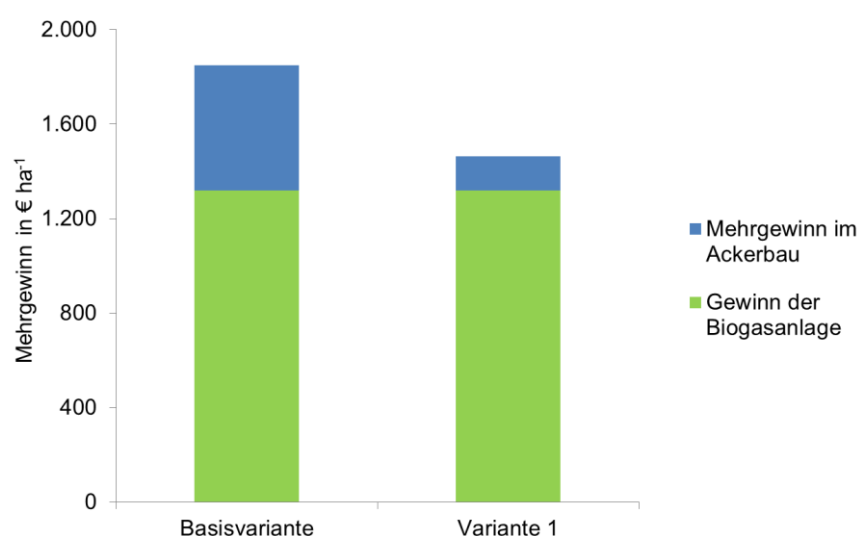


Abbildung 30: „Mehrgewinn“ des Betriebs in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) in € ha⁻¹

5.3. Monte-Carlo-Simulation

In Abbildung 31 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Mehr-/ Mindergewinns in Phase 2 (nach Inbetriebnahme der Biogasanlage) als Output der Software @RISK dargestellt. Hierfür werden zunächst nur die Risikoparameter der Biogasanlagen (vgl. Kapitel 3.2.2.3) gleichzeitig simuliert. Gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt der Mehrgewinn im Vergleich zu Phase 1 zwischen 1.267 € ha⁻¹ und 1.867 € ha⁻¹ (vgl. Abbildung 31). Damit wird die hohe Wahrscheinlichkeit für einen künftigen Mehrgewinn bestätigt. Der bereits statisch ermittelte Mehrgewinn des Gesamtbetriebs in Phase 2 in Höhe von 1.850 € ha⁻¹ (vgl. Kapitel 5.2) befindet sich innerhalb der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

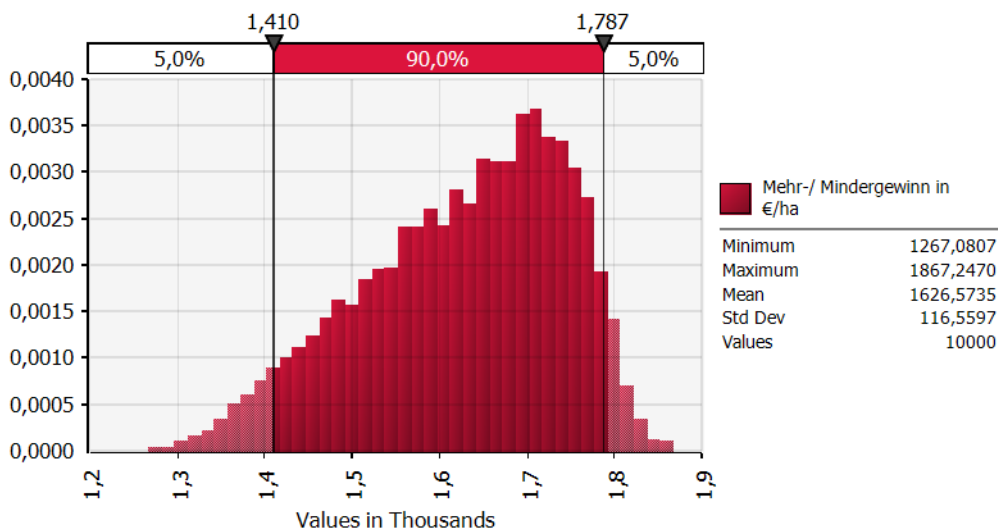


Abbildung 31: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Mehr-/ Mindergewinns in € ha⁻¹ in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) bei Simulation der Risikofaktoren der Biogasanlage

Das Ergebnis zeigt somit, dass künftig von einem stabilen Mehrgewinn durch die Biogasanlage ausgegangen werden kann, sogar wenn die Instandhaltungskosten sich um bis zu 25 % und / oder die Substratkosten sich um bis zu 45 % erhöhen. Die wirtschaftlich vorteilhafte und risikoarme Situation ergibt sich aufgrund der hohen gesicherten Erlöse durch die Biogasanlage (hohe EEG-Einspeisevergütung für 100% des Stroms und gesicherter Wärmeverkauf zu Marktpreisen). Diese Situation wird sich mit dem Ende des Förderzeitraums durch das EEG im Jahr 2028 für die Biogasanlage und den Betrieb ändern (20 Jahre Vergütungszeitraum zzgl. das Jahr der Inbetriebnahme). Zwar sieht das aktuelle EEG 2017 eine 10-jährige Förderung von Altanlagen vor, jedoch mit einem wesentlich geringeren Fördersatz (vgl. Kapitel 3.1.4.3).

In einem zweiten Schritt werden alle in Kapitel 3.2.2.3 definierten Risikoparameter gleichzeitig simuliert (Risikofaktoren: Biogasanlage, Ertragseffekte und Marktpreise). Gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung (vgl. Abbildung 32) liegt der Mehrgewinn im Vergleich zu Phase 1 zwischen 865 € ha⁻¹ und 1.568 € ha⁻¹.

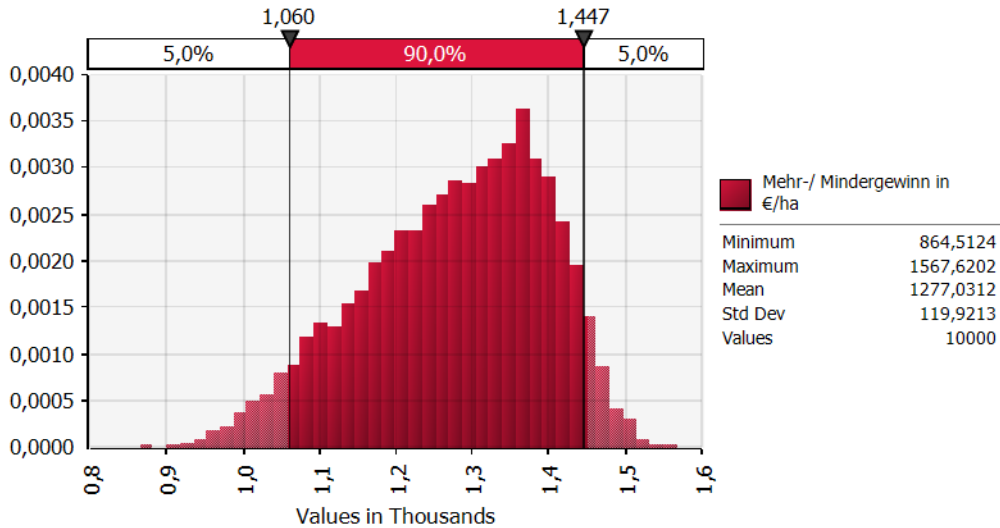


Abbildung 32: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Mehr-/ Minderertrags in € ha⁻¹ in Phase 2 (Untersuchungsjahre 2012-2014) bei Simulation aller Risikofaktoren

Damit wird nochmalig die hohe Wahrscheinlichkeit für einen künftigen Mehrertrag bestätigt, auch wenn künftig die Ertragseffekte geringer ausfallen würden als die bereits erreichten Ertragseffekte und die Marktpreise für Marktfrüchte auf einem ähnlichen Niveau wie in den Untersuchungsjahren (Phase 1 und 2) bleiben.

6. Diskussion

6.1. Methodik

6.1.1. Modellierung ökonomischer Effekte auf Grundlage experimenteller Daten

Um die Ertragseffekte sowie die ökonomischen Effekte durch die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem zu bestimmen, wurde in dieser Arbeit eine Methodik gewählt, die einen experimentellen Ansatz (Feldversuch) mit der Modellierung verbindet.

Die experimentellen Daten stammen aus dem Langzeitfeldversuch „Systemversuch“, der im Sommer 2009 in der Versuchsstation Viehhausen angelegt wurde. Die in dieser Arbeit analysierten Untersuchungsjahre 2010 bis 2014 fallen in die Initialphase des Versuchs. Die Versuchsflächen wurden bereits vor dem Anlegen des Systemversuchs als ökologische Betriebsflächen eines Marktfruchtbetriebs bewirtschaftet. Damit sind diese Versuchsflächen ideal geeignet, um die Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in ein bestehendes Marktfruchtssystem zu untersuchen. Der Großteil ökologischer Feldversuche wird auf zuvor konventionell bewirtschafteten Flächen angelegt. Seufert et al. (2012) zeigten, dass die Erträge in den ersten Jahren nach der Umstellung niedrig sind und im Laufe der Zeit, aufgrund der Verbesserungen der Bodenfruchtbarkeit und der Managementfähigkeiten, allmählich zunehmen. Diese Problematik besteht beim Systemversuch Viehhausen nicht. Dennoch konnten Langzeiteffekte mit dieser Arbeit noch nicht erfasst werden. Andere Studien zeigten, dass die positiven Ertragseffekte einer Gärrestedüngung über einen längeren Zeitraum ansteigen (Reents et al. 2011, Levin et al. 2015).

Der Ertragseffekt ist ein ausschlaggebender Parameter für die Frage, ob die Integration einer Biogasanlage positive oder negative Auswirkungen auf die Ökonomie des Gesamtbetriebs hat. Deshalb ist es unerlässlich, die Ertragseffekte möglichst exakt zu bestimmen. Der Hauptvorteil des in dieser Arbeit gewählten Untersuchungsansatzes liegt in der Verfügbarkeit von verlässlichen Ertragsdaten, die in den ökonomischen Analysen der unterschiedlichen Anbausysteme verwendet werden können. Jeweils vier Wiederholungen auf ortsstabilen Parzellen mit standardisierten Anbauverfahren bildeten die Datenbasis. Da durchaus größere Unterschiede zwischen (Parzellen-)Versuchen und Praxisbedingungen bei den Ertragseffekten bestehen können, wurden in dieser Arbeit zusätzlich Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die die Auswirkungen unterschiedlicher Ertragseffekte auf den Unternehmensgewinn darstellten.

Andere ökonomische Studien zu diesem Forschungsgegenstand (z.B. Blumenstein et al. 2015a, Michel et al. 2006b) basieren auf modellierten oder geschätzten Ertragseffekten mit zum Teil großen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Ertragseffekte. Teilweise wurden einfache Annahmen zu Ertragseffekten getroffen, aufgrund von fehlenden verwendbaren Messwerten (Michel et al. 2006b). Modelldaten zu Ertragseffekten aus Pflanzenwachstumsmodellen (z.B. GECROS, CERES, WOFOST) sind in ihrer Aussagekraft eingeschränkt. Oftmals sind die Wachstumsmodelle auf wenige Fruchtarten fokussiert (z.B. Weizen), nur wenige Modelle erlauben die Simulation von Fruchtfolgen (mit Leguminosen und Zwischenfrüchten); komplexe Kurz- und Langzeiteffekte der Düngung mit Gärresten auf verschiedene Ackerfrüchte und Fruchtfolgen können in den vorhandenen Modellen nicht abgebildet werden. Die meisten Pflanzenwachstumsmodelle sind für die Bedingungen des konventionellen Landbaus entwickelt und nicht ohne Modellanpassung und Validierung auf den ökologischen Landbau übertragbar. Aus diesen Gründen sind Pflanzenwachstumsmodelle für die Forschungsfragen

dieser Arbeit nicht anwendbar und es wurde daher der methodische Ansatz einer Modellierung auf der Grundlage von Versuchsdaten bevorzugt.

Als ökonomische Kalkulationsdaten wurden wissenschaftlich anerkannte Datenbanken des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) und der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft verwendet.

Dieser methodische Ansatz hat jedoch auch Schwachstellen und Aussagegrenzen. Zunächst stellt sich die Frage, inwieweit die experimentellen Ergebnisse auf praktische Bedingungen übertragen werden können. Es ist bekannt, dass Unterschiede zwischen den in Versuchen auf Versuchspartzen ermittelten Erträgen und den auf Feldebene in Praxisbetrieben erzielbaren Erträgen bestehen können. Kravchenko et al. (2017) zeigte Ertragsunterschiede zwischen dem Anbau in Partzen und in Feldversuchen bei „Low-Input-Systemen“ sowie bei ökologischen Anbausystemen. Gründe hierfür sind beispielsweise Randeﬀekte in Partzen, Trennung von Ertepartzen und Fahrspuren (dadurch kein Bodendruck auf Ertepartzen) sowie eine exakte Versuchsdurchführung (z.B. optimaler Zeitpunkt für Düngung). Reents et al. (2018) dagegen zeigte, dass die Ertragsdiﬀerenzen zwischen Versuch und Praxis nicht notwendigerweise auftreten müssen: In Feldversuchen (mit Partzen und Wiederholungen) wurden keine höheren Erträge erzielt als auf den Praxis schlägen (in Messpartzen) mit Betriebstechnik.

Mit zunehmender „Professionalisierung“ des ökologischen Landbaus, d.h. immer besserer Beherrschung der Produktionsverfahren, z.B. Unkrautmanagement, optimierter Düngungstechnik, etc. ist eher davon auszugehen, dass die Ertragsdiﬀerenzen (Versuch versus Praxis) abnehmen oder ganz verschwinden.

Im Systemversuch Viehhausen wird eine spezielle Versuchstechnik für die Bewirtschaftung der Partzen eingesetzt. Dies ist bei Versuchen mit Partzen aufgrund der Abmessungen notwendig und üblich (vgl. z.B. Hülsbergen et al. 2001). Insgesamt gibt es bisher nur wenige Feldversuche, die praxisübliche Technik einsetzen (z.B. Küstermann et al. 2013), weil dadurch die Versuchspartzen extrem groß werden würden (Flächenbedarf zur Versuchsdurchführung, Zunahme der Bodenheterogenität innerhalb eines Versuches und dadurch Schwierigkeiten bei der Versuchsauswertung und -interpretation). Für das ökonomische Modell dieser Arbeit waren deshalb Annahmen zu praxisüblichen Maschinen auf Basis der Arbeitsgänge im Versuch notwendig, z.B. um den Dieselbedarf, die Arbeitszeit oder die Maschinenkosten zu bestimmen. Für jede einzelne Partzenmaschine wurde eine praxisübliche (Größe, Leistung) Maschine unterstellt. Dieser Ansatz hat sich nicht nur bei ökonomischen Analysen bewährt (z.B. KTBL), sondern auch bei der energetischen Analyse von Anbausystemen verwendet (z.B. Böswirth 2017, Lin et al. 2017).

Die im Systemversuch ausgebrachten Gärreste stammten aus einer Biogasanlage eines nahegelegenen ökologischen Betriebes. Die Substrate dieser Biogasanlage entsprachen nahezu den Versuchsbedingungen (hauptsächlich Klee gras als Biogassubstrat), waren aber nicht völlig identisch. Die Einsatzmenge der Gärreste im Systemversuch wurde auf der Basis des Gesamtstickstoffgehaltes des geernteten Luzerne-Klee grasses bestimmt. Abhängig von den Substraten und dem Biogasprozess variieren jedoch die Gehalte anderer Makro- und Mikro nährstoffe (z.B. Phosphor, Kalium, Schwefel) und der Gehalt an organischer Substanz wesentlich (Wendland und Lichti 2012). Dementsprechend musste die Bestimmung der Gärrestmenge auf Basis der Gesamtstickstoffmenge als eine Vereinfachung bewertet werden, die jedoch für die Versuchsdurchführung notwendig ist. Außerdem musste berücksichtigt werden,

dass es eine Reihe von Verlustpotentialen für Stickstoff entlang der Prozesskette – von der Ernte des Luzerne-Kleegrases bis hin zur Düngung des Gärrestes – gibt. Die simulierten Bedingungen im Feldversuch (z.B. Qualität und Quantität der Gärreste, Düngetechnik, N-Verluste) sind deshalb nur als Annäherungen an die realen Bedingungen zu sehen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Gärrestmengen auf die Ertragseffekte wurden bisher im Systemversuch Viehhausen nicht untersucht.

Für das ökonomische Modell waren viele Annahmen zu treffen, z.B. die Investitions- und Betriebskosten der Biogasanlage, die Kosten der landwirtschaftlichen Betriebsmittel, die Preise für Marktfrüchte und Biogassubstrate. Solche Annahmen beeinflussen die ökonomischen Ergebnisse wesentlich. Deshalb ist es wichtig, dass zum einen die Annahmen die Verhältnisse der landwirtschaftlichen Praxis widerspiegeln und zum anderen die statischen Berechnungen durch Sensitivitätsanalysen und Risikoanalysen (z.B. Monte-Carlo-Simulationen) ergänzt werden, wie auch in dieser Arbeit geschehen ist.

Eine Alternative zu diesem Forschungsansatz sind Fallstudien in Landwirtschaftsbetrieben (auch Versuchsbetrieben) (Lin et al. 2017, Lin und Hülsbergen 2017, Lin et al. 2016, Möller et al. 2011, Küstermann et al. 2010). Dieser Ansatz wurde zusätzlich auch in dieser Arbeit verfolgt (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2, 6.1.2).

6.1.2. Betriebliche Fallstudie

Die experimentellen Analysen und Modellierungen wurden durch eine betriebliche Fallstudie ergänzt, um die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem zu bewerten. Die Aussagen beider methodischer Ansätze ergänzen sich.

Das Potential dieses Forschungsansatzes wird in der Literatur umfassend beschrieben und zahlreich verwendet, z.B. um die Umstellung eines konventionellen Betriebes auf ökologischen Landbau zu analysieren (Hülsbergen 2003), ökologische und konventionelle Betriebssysteme zu vergleichen (Küstermann et al. 2010) oder die Effekte der Etablierung von Agroforstsystemen in Ackerbausystemen zu beschreiben (vgl. z.B. Lin et al. 2017, Lin und Hülsbergen 2017, Lin et al. 2016,). Möller et al. (2011) untersuchten mit diesem methodischen Ansatz die Auswirkungen der Integration von Biogasanlagen in Betriebssystemen in Bezug auf Nährstoffkreisläufe.

Betriebliche Fallstudien zur Analyse verschiedenster betrieblicher Entwicklungsprozesse bieten Vorteile: Reale Systeme können sehr praxisnah hinsichtlich Management und Ertragseffekten untersucht werden. Reale betriebliche Stoffkreisläufe werden abgebildet (z.B. tatsächliche N-Verluste, Qualitäten Gärrestzusammensetzung). Alle Systemkomponenten sind vorhanden (in dieser Arbeit z.B. die Biogasanlage); im Feldexperiment bzw. beim experimentellen Ansatz müssen diese modelliert werden.

Der hauptsächliche Unterschied zur experimentellen Betrachtung in dieser Arbeit liegt darin, dass nicht zwei Anbausysteme verglichen wurden, sondern zwei Betrachtungszeiträume: Die Erträge sind damit von den Jahreseffekten beeinflusst, genauso wie die Marktpreise. Auch kann auf einem Betrieb nicht von „standardisierten“ Anbauverfahren und relativ homogenen Schlägen, wie in Feldversuchen ausgegangen werden. Damit kann zwar die ökonomische Situation im Betrieb vor und nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage bewertet werden, der

Einfluss der Biogasanlage auf die Veränderungen beim Marktfruchtertrag und der ökonomischen Situation kann jedoch nicht exakt bestimmt werden. Auch Effekte durch betriebliche Veränderungen (z.B. Maschinen, Fähigkeiten des Landwirtes, Pachtflächen) können im Praxisbetrieb nur schwer kontrolliert werden.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zur experimentellen Betrachtungen ist, dass es in den Fallstudien keine Wiederholungen gibt und daher keine statistische Auswertbarkeit von Varianten vorliegt. Jede Fallstudie kann nur einmal durchgeführt werden; die Ausgangsbedingungen sind nie wiederherstellbar.

Da auch bei praxisbetrieblichen Untersuchungen zum Teil Annahmen und Abgrenzungen getroffen werden müssen, ist eine Hinzunahme von Kalkulationsdaten meistens notwendig. In dieser Arbeit wurden beispielsweise die Arbeitserledigungskosten auf Basis von Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) ergänzt.

Der in dieser Arbeit untersuchte Praxisbetrieb wurde langjährig nach der Öko-Verordnung (EG) Nr. 834/2007 sowie deren Durchführungsverordnung (EG) Nr. 889/2008 und den Anbau-richtlinien von Naturland betrieben. Die Biogasanlage des Betriebs wurde im Jahr 2008 in Betrieb genommen. Die EEG-Vergütung dieser Anlage basiert also auf einer früheren EEG-Fassung. Diese Vergütung für Strom (26,66 Cent kWh⁻¹) ist für Biogasanlagen, die heute mit ihrem Betrieb starten, nicht mehr zu erlangen. Eine identische Anlage müsste heute an den Ausschreibungsverfahren teilnehmen, wobei die maximal erreichbaren Stromerlöse bei ca. 10,30 Cent kWh⁻¹ liegen würden. Dies muss bei der Diskussion der Ergebnisse vor allem im Vergleich mit den ökonomischen Ergebnissen aus dem Systemversuch Viehhausen beachtet werden. Eine neue Biogasanlage (mit Ausnahme der kleinen Gülleanlage) ist schwer ökonomisch rentabel zu betreiben. Die höheren Erlöse aufgrund positiver Ertragseffekte müssen deshalb gegebenenfalls sogar die Verluste der Biogasanlage ausgleichen.

6.2. Ertragseffekte durch die Gärrestedüngung

In mehreren wissenschaftlichen Untersuchungen wurden im ökologischen Landbau positive Ertrags- und Qualitätseffekte bei nicht-legumen Marktfrüchten durch die Gärrestdüngung experimentell nachgewiesen. In der Literatur sind Ertragssteigerungen bei Getreide von 15 % bis 47 % (z.B. Levin et al. 2015, Reents et al. 2011, Möller et al. 2006) genannt. Die starken Unterschiede bei den Ertragseffekten erklären sich aufgrund unterschiedlicher Fruchtarten und Fruchtfolgen, Standorte, Referenzsysteme, Düngung (Gärrestmenge, -qualität) sowie aufgrund von unterschiedlich langen Untersuchungszeiträumen. Die Ertragseffekte fielen in den Versuchen bei viehlosen Anbausystemen mit Biogas im Vergleich zu viehhaltenden Betrieben deutlich stärker aus (vgl. Kapitel 2.2.2).

Auch im Systemversuch Viehhausen wurden signifikant höhere Getreideerträge im Anbausystem mit Gärrestdüngung (Biogassystem) im Vergleich zum Anbausystem mit Gründüngung (Marktfruchtsystem) gemessen. Der positive Ertragseffekt im Systemversuch Viehhausen bei Getreide in Höhe von 27 % bis 47% stimmt mit den Literaturwerten überein. Auch wurden im Systemversuch Viehhausen tendenziell höhere Erträge bei Ackerbohnen (+13 %) und Luzerne-Kleegrass (+7 %) im Anbausystem mit Gärrestdüngung gemessen.

Von einer Vielzahl an Experimenten ist bekannt, dass die Schnittnutzung von Klee gras viele Vorteile im Vergleich zum Mulchen hat, insbesondere der Ertragsanstieg beim Klee gras sowie die Steigerung des Leguminosenanteils und der Stickstoff fixierung (z.B. Möller et al. 2008, Heuwinkel et al. 2005, Loges et al. 2000). Durch die Nutzung von Klee gras als Biogassubstrat werden Gärreste bereitgestellt. Die Gärreste enthalten erhebliche Mengen an Stickstoff (Ammoniumstickstoff und organisch gebundenem Stickstoff), aber auch weitere Mikro- und Makronährstoffe sowie organische Substanz. Deshalb ist der Ertragsanstieg beim Getreide im Biogassystem auf die direkte und indirekte Düngungswirkung der Gärreste zurückzuführen (Nährstoffversorgung, Verbesserung der Bodenstruktur, Humusaufbau, Anstieg der biologischen Aktivität). Die stickstoff fixierenden Leguminosen profitieren vom Input an Makro- und Mikronährstoffen über die Fruchtfolge.

Die Quantifizierung der Ertragszuwächse erfolgte in dieser Arbeit über die ersten fünf Jahre des Systemversuchs Viehhausen. Dieser Zeitraum ist als Initialphase zu werten. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Ertragsunterschiede zwischen dem Biogas- und dem Marktfruchtsystem in der Zukunft verändern. Vergleicht man die Ergebnisse von Reents et al. (2011) und Levin et al. (2015), so ist eine Steigerung der positiven Ertragseffekte beim Getreide durch die Schnittnutzung von Klee gras kombiniert mit der Gärrestdüngung des Getreides im Vergleich zur Gründüngung erkennbar. Diese Untersuchungen fanden anhand eines weiteren ökologischen Feldversuchs (Energiepflanzenversuch) in der Versuchsstation Viehhausen statt. Um Langzeiteffekte bei Pflanzen, Boden und Umwelt analysieren zu können, ist es dementsprechend notwendig, den Systemversuch Viehhausen langfristig weiterzuführen.

Bei der Frage nach der Übertragbarkeit der Ertragseffekte auf andere Standorte müssen zunächst die Ergebnisse von Reents et al. (2011) berücksichtigt werden. Reents et al. (2011) zeigte, dass Ertragswirkungen der Gärrestdüngung bei Fruchtfolgen mit niedrigeren Erträgen stärker ausfallen. Die Getreideerträge im Systemversuch Viehhausen waren in den Betrachtungsjahren für ökologische Bedingungen als hoch einzustufen. Im Systemversuch Viehhausen bleibt zu prüfen, wie sich die Düngung mit unterschiedlichen Gärrestmengen langfristig auf das Ertragsniveau und die Ertragseffekte auswirken. Weiterhin sind die Einflüsse unterschiedlicher Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen auf die Ertragseffekte zu prüfen, auch auf anderen Standorten.

Die Anbaubedingungen (vor allem Boden- und Klimabedingungen) können ausschlaggebend für die Ertragseffekte sein. Der Versuchsstandort Viehhausen zeichnet sich durch ein hohes Ertragspotenzial aus (Parabraunerde aus Löß, günstige klimatische Bedingungen). Bei anderen Böden (z.B. geringerer Bodenfruchtbarkeit) und / oder anderen klimatischen Bedingungen ist von anderen Ertragseffekten auszugehen, z.B. aufgrund geringerer Nährstoffeffizienz und höherer Nährstoffverluste sowie geringerer Wasserverfügbarkeit (vgl. Stinner 2009).

In dieser Arbeit wurden ergänzend zum Feldexperiment die Ertragseffekte durch die Integration einer Biogasanlage in ein viehloses ökologisches Anbausystem in einem Betrieb (Fallstudie) untersucht. Im analysierten Betrieb konnten nach Inbetriebnahme der Biogasanlage im Mittel aller Marktfrüchte deutliche Ertragszuwächse gemessen werden. Im Mittel aller Getreidearten (arithmetisches Mittel) wurde beim Vergleich der beiden Betrachtungszeiträume ein Ertragszuwachs von 16 % erreicht. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Untersuchungsergebnisse und Erhebungen in der Praxis. Der mittlere Ertragseffekt der Getreidearten lag im Praxisbetrieb deutlich unter den Ertragseffekten beim Getreide im Systemversuch Viehhausen.

sen (27 % bis 47 %). Dies bestätigt die unterschiedlichen Ertragseffekte beim Anbau in Parzellen und auf Feldebene in Praxisbetrieben, wie von Kravchenko et al. (2017) dargestellt. Die Düngungsintensität, das Düngungsmanagement (Zeitpunkt der Düngung) oder auch z.B. die Schadverdichtung durch häufigeres Überfahren der Ackerflächen (hohe Maschinenmasse und schlechte Tragfähigkeit der Böden führen zu Veränderungen in der Durchwurzelbarkeit, der biologischen Aktivität, dem Wasser-/Lufthaushalt, den Redoxbedingungen sowie in der Nährstoffverfügbarkeit), können Gründe dafür sein, warum im Praxisbetrieb überwiegend geringere Ertragssteigerungen beim Getreide realisiert wurden, als im Systemversuch. Aber auch der langjährige ökologische Marktfruchtbau kann ein Grund für verminderte Bodennährstoffgehalte sein, so dass zunächst eine Wiederanreicherung der Nährstoffe stattfinden muss, bis deutlichere Ertragseffekte auftreten. Wie im Systemversuch Viehhausen konnten auch im Praxisbetrieb Ertragssteigerungen bei den legumen Marktfrüchten (Ackerbohne: 17%, Erbsen: 6 %) gemessen werden.

Beim Vergleich der Ertragseffekte zwischen dem Praxisbetrieb und dem Systemversuch Viehhausen ist zusätzlich zu beachten, dass der gewählte Betrachtungszeitraum beim Praxisbetrieb erst vier Jahre nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage beginnt.

Die Bewertung der Ertragseffekte im Praxisbetrieb weist einige Unsicherheiten auf. Zwar wurde im Mittel der Getreidearten ein Ertragszuwachs von 16 % ermittelt, die Ertragszuwächse bei den einzelnen Getreidearten haben sich im Praxisbetrieb jedoch erheblich unterschieden. Der höchste Zuwachs beim Kornertrag in Höhe von 53 % wurde bei der Wintergerste festgestellt (Gärrestedüngung: $379 \text{ dt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), jedoch wurden zum Teil auch stagnierende Erträge, z.B. bei Winterroggen (Gärrestdüngung: $140 \text{ dt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ermittelt. Diese unterschiedliche Entwicklung der Erträge lässt sich durch unterschiedliche Fruchtfolgegestaltung der Getreidearten (unterschiedliche Vorfrüchte, unterschiedliche Gärrestdüngung), variierende Anbauverfahren, Unterschiede bei der Düngung mit Gärresten (Menge, flüssige und feste Gärrestdüngung), unterschiedliche Zeitpunkte der Düngung und inhomogene Anbauflächen erklären.

Aufgrund des methodischen Ansatzes, dem Vergleich von zwei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen zur Bestimmung von Ertragseffekten, kann in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden, welchen Beitrag die Gärrestdüngung zur realisierten Ertragssteigerung im Praxisbetrieb geleistet hat bzw. ob sogar einer Ertragsminderung durch die Gärrestdüngung entgegengewirkt werden konnte. Die Ertragssteigerungen in der hier festgestellten Größenordnung sind allerdings sehr plausibel und werden durch zahlreiche Untersuchungen gestützt (vgl. Kapitel 2.2.2). Sie sind das Resultat der Nährstoffzufuhr durch die Gärrestedüngung. Diese sind offenbar umso größer, je höher die zusätzliche Nährstoffzufuhr (im Vergleich zum Ausgangsniveau) ist. Nur selten wurden keine oder negative Ertragseffekte bestimmt (vgl. Kapitel 2.2.2). Mögliche Ursachen für Ertragsdepressionen (geringe Ertragssteigerungen) bei Gärrestanwendung können beispielsweise hohe Emissionen (Ammoniakverluste bei der Applikation), Bodenschadverdichtung durch Applikationstechnik oder eine Nährstoffverarmung (z.B. Phosphor) der Böden sein (Nährstoffe gehen in den Bodenpool, nicht in die Pflanze).

Beide methodischen Ansätze (Feldexperiment und Praxisbetrieb) zu Analyse der Ertragseffekte haben ihre Berechtigung und ergänzen sich in ihren Aussagen.

6.3. Ökonomische Effekte

Um die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer ökologischen Biogasanlage zu bewerten, ist es nicht ausreichend, den Biogasprozess isoliert zu analysieren (wie z.B. KTBL 2014). Eine gesamtbetriebliche Bewertung ist als Systemansatz notwendig, um die Wechselbeziehungen zwischen der Biogasanlage und dem Ackerbau zu berücksichtigen. Nur so können beispielsweise Stoffkreisläufe (Substrate, Gärreste), Ertragssteigerungen durch die Gärrestdüngung sowie die monetäre Veränderung durch die Integration einer Biogasanlage in einen ökologisch wirtschaftenden Betrieb exakt analysiert werden. Diese Arbeit hat anhand von Modellbetrieben sowie einem realen Betrieb gezeigt, dass durch die Integration einer den Bedingungen des ökologischen Landbaus angepassten Biogasanlage positive ökonomische Effekte aufgrund der Ertragssteigerung bei Getreide realisiert werden können, selbst wenn die Biogasanlage nicht rentabel betrieben werden kann. Dies gilt insbesondere für viehlose bzw. vieharme ökologische Betriebe. Bei den Modellbetrieben konnte durch die Integration der Biogasanlage Mehrgewinne von ca. 56 bis 728 € ha⁻¹ erreicht werden.

Das Biogasanlagenkonzept muss an den Bedarf von Gärresten sowie an die Situation der Substratbereitstellung angepasst sein. Solange Marktfruchterträge durch eine größere Menge an ausgebrachten Gärresten - im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben und Richtlinien - gesteigert werden können und dadurch Mehrerlöse generiert werden, die über den Verlusten der Stromproduktion liegen, ist eine steigende Anlagengröße ökonomisch sinnvoll. In erster Linie ist es ökonomisch vorteilhaft, als Substrate Nebenprodukte (z.B. Aufwüchse einer Grünbrache, Wirtschaftsdünger) zu wählen. Der Zukauf teurer Ko-Substrate (Substratpreis und Transportkosten) wäre unter den heutigen Förderbedingungen ökonomisch nur sinnvoll, wenn der Nährstoffinput zur Ertragssteigerung benötigt wird.

Dementsprechend kann ein Biogasanlagenkonzept, das nicht an die Bedingungen des Gesamtbetriebs angepasst ist, auch zu negativen ökonomischen Auswirkungen für den Gesamtbetrieb führen. In diesem Fall sind die Verluste der Biogasanlage zu hoch, um von den Mehrerträgen der Marktfrüchte ausgeglichen zu werden. Negative ökonomische Effekte für den Gesamtbetrieb treten ein, wenn die Biogasanlage nicht passend zur Anbaufläche, zur notwendigen Gärrestmenge bzw. zu den eigenbetrieblichen Substraten gewählt wird. Eine gesamtbetriebliche Optimierung wäre hier notwendig. Auch für sehr kleine Biogasanlagen (in dieser Arbeit: 25 kW_{el}) mit hohen spezifischen Investitions- und Betriebskosten ist es schwierig, gesamtbetrieblich positive ökonomische Effekte zu erreichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit, also die ökonomische Verbesserung im Gesamtbetrieb aufgrund der Ertragssteigerungen durch die Gärrestdüngung, bestätigen die Aussagen von Blumenstein et al. (2015a), der vergleichbare Auswirkungen auf Basis von modellierten Ertragsdaten darstellte. Allerdings widersprechen die Ergebnisse dieser Arbeit den Aussagen von Michel et al. (2006). Die Ergebnisse von Michel et al. (2006) zeigen durch die Integration einer Biogasanlage ökonomische Nachteile, aufgrund der zusätzlichen Kosten für die Substraternte (Zwischenfrüchte und Erntereste) und der Ausbringung von Gärresten. Gründe für diese Abweichung von den Ergebnissen dieser Arbeit sind die niedrigeren Ertragseffekte (Getreide 15 %) und andere Marktfrüchte (Kartoffel) innerhalb der Fruchtfolge (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3). Weitere Gründe sind niedrigere Preise für die Marktfrüchte sowie höhere Anbaukosten im Vergleich zu den Annahmen in dieser Arbeit.

Die von Reents et al. (2011) dargestellten Qualitätsverbesserungen durch die gezielte Gärrestdüngung könnten noch zu einer weiteren Erhöhung der Marktleistung führen und sollten in

weiteren ökonomischen Untersuchungen Berücksichtigung finden. Laut der Datensammlung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL 2018) unterscheidet sich der Marktpreis für Winterweizen (Backweizen) um ca. 4 bis 5 € dt⁻¹ FM⁻¹ je nach Qualität (v.a. Proteingehalt). Der Preis für Futterweizen um ca. 5 bis 10 € dt⁻¹ FM⁻¹ unter dem Preis für Backweizen angesetzt werden (LFL 2018).

Der Verkauf von Gärresten könnte, wenn die Nachfrage besteht und im eigenen Betrieb nicht die gesamte Menge ausgebracht wird, die ökonomische Situation verbessern. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass die Modellanlagen 5 / 6 / 7 / 8 ihre nicht innerbetrieblich verwendeten Gärreste kostenlos an die Substratlieferanten abgeben. Ein Verkauf könnte vor allem für die Biogassysteme lohnenswert sein, die über eine hohe Anlagenleistung bei geringer Anbaufläche verfügen und damit in ihrer Ausbringung und Möglichkeit der Ertragssteigerung begrenzt sind. Hier muss jedoch der Zukauf der notwendigen Fremdsubstrate gesichert sein. Eine Möglichkeit der monetären Bewertung von Gärresten, wäre der Ansatz von Reinnährstoffkosten (z.B. von Stickstoff, Phosphat und Kali) im ökologischen Landbau. Laut der Datensammlung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL 2018) ist für Stickstoff aktuell 4,80 € kg⁻¹ als Kosten anzusetzen, für Phosphat 1,06 € kg⁻¹ und für Kalium 1,18 € kg⁻¹.

In dieser Arbeit wurde mit dem Biogassystem 9 (extern) eine Möglichkeit aufgezeigt, wie durch eine Kooperation mit einer Biogasanlage ein viehloser Marktfruchtbetrieb einen „eigenen“ Gärrest zur Düngung erhält. Durch die kostenlose Abgabe der Aufwüchse der Rotationsbrache (Klee gras) an eine Biogasanlage und die kostenfreie Rücknahme von Gärresten können durch die Düngung die positiven Ertragseffekte erzielt werden, wie bei den Biogassystemen mit eigener Anlage. Der Unterschied zur eigenen Biogasanlage besteht vor allem darin, dass keine Erlöse durch den Strom- / Wärmeverkauf erzielt werden, aber auch keine Verluste beim Betrieb der Biogasanlage hingenommen werden müssen. Auch die Bindung von Kapital durch den Bau der Biogasanlage entfällt. Insbesondere das Biogassystem 1 zeigte, dass Kleinst-Biogasanlagen aufgrund der hohen spezifischen Investitionskosten bzw. der hohen Fixkosten höchst unrentabel sind. Die Wahl einer größeren Biogasanlage würde jedoch bedeuten, dass der Betrieb unter Umständen seine Fruchtfolge ändern müsste (mehr Biogassubstrate), vermehrt Substrate zukaufen müsste oder eine Gemeinschaftsanlage mit anderen Landwirten betreiben müsste. Dies ist nicht immer möglich oder gewollt. Mit der Lieferung von Substraten an eine externe Biogasanlage können Landwirte bisherige Betriebsstrukturen beibehalten. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen bzw. Richtlinien für den ökologischen Landbau (Restriktionen hinsichtlich des Gärresteinsatz, insbesondere aus konventionellen Biogasanlagen) müssen dabei eingehalten werden.

Für Biogasanlagenbetreiber bietet dieses Modell der Substratlieferung im Gegenzug die Möglichkeit ihre Substratkosten zu senken, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen und insbesondere bei den im EEG 2017 verankerten Ausschreibungsverfahren (auch für Altanlagen) erfolgreich bieten zu können.

Die betriebliche Fallstudie zeigte eine Verbesserung des ökonomischen Gesamtergebnisses durch den Betrieb der Biogasanlage. Im Ackerbau konnte in der Phase nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage sowohl durch die Ertragssteigerung, aber auch durch höhere Marktfruchtpreise ein Mehrgewinn erzielt werden. Allerdings zeigte sich im Praxisbetrieb eine andere Situation, als bei den Modellrechnungen zum Systemversuch Viehhausen. Der deutliche Mehrgewinn im Praxisbetrieb wurde hauptsächlich über den Gewinn der Biogasanlage realisiert, die aufgrund der Inbetriebnahme im Jahr 2008 über eine hohe EEG-Vergütung

verfügt. Auch konnte die Wärme zu marktüblichen Wärmepreisen vermarktet werden. Aufgrund dieser hohen garantierten Einspeiseverfügung war für die Investitionsentscheidung zum Bau der Biogasanlage im untersuchten Praxisbetrieb die Ertrags- und Qualitätssteigerung der Marktfrüchte weniger bedeutsam.

Dennoch wurde die Investitionsentscheidung zum Bau der Biogasanlage vom Betriebsleiter nicht allein wegen der Strom- und Wärmeerzeugung getroffen, sondern auch zur Intensivierung der Nährstoffkreisläufe (u.a. durch den Zukauf von Nährstoffen in Biogassubstraten), um die Nährstoffversorgung von Böden und Pflanzen und letztlich die Erträge zu steigern zu verbessern. Das Ziel des Betriebsleiters war, durch die Integration der Biogasanlage deutliche Ertragssteigerungen vor allem bei Getreide zu erreichen. Direkt nach der Umstellung waren die Ertragseffekte noch relativ gering. Dies liegt aber möglicherweise auch an den niedrigen Bodennährstoffgehalten nach langjährigem ökologischen Marktfruchtbau. Mit steigenden Bodennährstoffgehalten sind auch steigende Erträge und damit (stärkere) positive ökonomische Effekte zu erzielen.

In der gesamten Arbeit wurden zur künftigen Vergleichbarkeit mit Studien aus anderen mitteleuropäischen Ländern keine landwirtschaftlichen Fördermittel (z.B. Basisprämie, KULAP) eingerechnet. Dies ist stets im Vergleich mit Studien zu berücksichtigen, die diese Fördermittel bei der Bewertung von Betriebssystemen hinzurechnen. Für den ökologischen Landbau gelten in Bayern die KULAP-Richtlinien. Die ökologische Bewirtschaftung von Acker- und Grünland wird aktuell mit einer Prämie von 273 € ha⁻¹ gefördert, zuzüglich eines Zuschusses für Kontrollmaßnahmen (StMELF 2017). Außerdem ist auch die EU-Basisprämie zu berücksichtigen, die aktuell in Bayern bei rund 184 € ha⁻¹ liegt, sowie die Greeningprämie mit 86 € ha⁻¹ (StMELF 2017).

6.4. Betriebliche Risikobewertung

Mit der Inbetriebnahme einer Biogasanlage entstehen zusätzliche Risiken im Landwirtschaftsbetrieb. Neben den technischen Risiken (z.B. Eigenstrombedarf, Wirkungsgrad, Wartungs-/Reparaturaufwand) der Biogasanlage müssen Preisrisiken am Energiemarkt (Erlösseite nach dem EEG-Förderzeitraum, Kostenseite: Zukauf von Fremdstrom) und Risiken bei der Substratbereitstellung bzw. beim Substratzukauf berücksichtigt werden. Auch die Änderung von gesetzlichen Regelungen, wie zuletzt beispielsweise die Novellierung der Düngeverordnung, kann zu unvorhergesehenen Mehrkosten führen (z.B. Investitionen in größere Gärrestbehälter, zusätzliche Transportkosten für die Gärreste). Auf der anderen Seite kann die Biogasanlage als Diversifizierung im landwirtschaftlichen Betrieb betrachtet werden und damit zur Minimierung des gesamtbetrieblichen Risikos beitragen. Mit einer Biogasanlage fließen zusätzliche Erlöse aus dem Strom- und Wärmeverkauf in den Betrieb.

Der Betrieb einer Biogasanlage gibt aufgrund des EEGs die Chance, einen Teil der Betriebserlöse über einen Zeitraum von 20 Jahren zu sichern. Anlagen unter 100 kW_{el} Leistung erhalten auch im EEG 2014 und EEG 2017 noch immer für die gesamte Strommenge eine gesicherte Einspeisevergütung. Mit der mengenmäßig deutlich geringeren gesicherten Vergütung für Biogasanlagen über 100 kW_{el} im EEG 2014 und EEG 2017 im Vergleich zum EEG 2012 ist das Risiko höher, dass die Stromerlöse des nicht geförderten Stromanteils nicht planmäßig eintreten. Steigende Strompreise (Börse) bzw. Zusatzzahlungen (z.B. für die Bereitstellung

von Regelenergie) verbessern die Vorteilhaftigkeit der Biogassysteme mit Biogasanlagen, deren installierte Leistungen über 100 kW_{el} liegen. Sinkende Strompreise haben die gegenteilige Auswirkung. Alternative Vermarktungsmöglichkeiten neben der Strombörse sind möglich, wie z.B. die sogenannte regionale Direktvermarktung, um evtl. höhere Erlöse zu erzielen und weniger abhängig von den Schwankungen an der Börse zu sein.

Der Bau einer Biogasanlage bedeutet jedoch derzeit überwiegend eine Investition in ein – ohne Betrachtung des Gesamtbetriebs – unrentables Projekt. Nur kleine Gülleanlagen (Biogassystem 8) können aufgrund der speziellen EEG-Vergütung nahezu verlustfrei wirtschaften. Erst über die gesamtbetriebliche Betrachtung zeigen auch andere Biogasanlagen, aufgrund von Mehrerträgen bei Marktfrüchten, ökonomische Vorteile.

Die größten Auswirkungen auf die Stabilität der Betriebsergebnisse von Marktfrucht- und Biogassystem haben insbesondere die pflanzenbaulichen Erträge und die Marktpreise. In dieser Arbeit sind die Schwankungsbereiche der technischen Risikoparameter der Biogasanlage so definiert, wie sie für Praxisverhältnisse zutreffend und erreichbar sind. Extreme können davon abweichen, beispielsweise, wenn notwendige Reparaturen / Instandsetzungen nicht ausgeführt werden und daher hohe Ausfallraten bei Anlagentechnik eintreten. Das Ausmaß der Beeinflussung durch die Risikoparameter der Biogasanlage hängt vor allem von dem Verhältnis von Anlagengröße zu Anbaufläche bzw. zur Menge eigenbetrieblicher Substrate ab. Nur bei Anlagen mit einer hohen installierten Leistung im Verhältnis zur Anbaufläche wirken sich die Risikoparameter des Biogasprozesses stärker aus. Folglich bedeutet dies: Je höher die Leistung der Biogasanlage im Verhältnis zur eigenen Anbaufläche gewählt wird, desto wichtiger ist es, den Biogasprozess zu optimieren und zu stabilisieren.

Generell sind die Biogassysteme aufgrund des höheren Ertragsniveaus, Nährstoff- und Energieinputs im Pflanzenbau als intensivere Anbausysteme im Vergleich zu Marktfruchtbetrieben zu bewerten. Die höheren Erträge führen bei schwankenden Preisen für Marktfrüchte zu einem größeren Schwankungsbereich des Betriebsergebnisses. Dennoch kann hier nicht von einem erhöhten Risiko aufgrund der Ertragsteigerungen gesprochen werden. Im Gegenteil, die Düngung mit Gärresten kann als Risikominimierung vor sinkenden Getreideerträgen betrachtet werden.

Mit welcher Wahrscheinlichkeit muss ein „Mehrgewinn“ möglich sein, so dass sich ein Landwirt für die Investition in eine Biogasanlage entscheidet? Sechs der neun untersuchten Biogassysteme konnten laut der Monte-Carlo-Simulation mit über 50 % Wahrscheinlichkeit „Mehrgewinne“ im Vergleich zum Marktfruchtssystem erzielen. Von diesen sechs Biogassystemen erreichten drei sogar eine Wahrscheinlichkeit von über 90 % (vgl. Kapitel 4.2.5). Im Falle einer Fremdfinanzierung des Baus einer Biogasanlage ist es trotz einer hohen Wahrscheinlichkeit eines Mehrgewinns dennoch fraglich, wie die Banken das Kreditausfallrisiko bewerten, wenn schon die Planrechnungen ein unrentables Biogasprojekt zeigen. Nur das Konzept Biogassystem 9 (extern) wäre dann für Landwirte eine Möglichkeit: Substrate einer Biogasanlage bereitstellen und Gärreste dafür erhalten, ohne die eventuellen Verluste des Betriebs einer Biogasanlage ausgleichen zu müssen.

6.5. Chancen der Biogaserzeugung im und für den ökologischen Landbau

Das Idealbild des ökologischen Landbaus ist der Gemischtbetrieb mit möglichst geschlossenen Stoffkreisläufen. Doch viele Ökobetriebe haben sich von diesem Idealbild (teilweise) entfernt. Der wachsende Markt ökologischer Lebensmittel verlangt von den Landwirten zunehmend größere, einheitliche Partien von Produkten hoher Qualität. Die Spezialisierung von Ökobetrieben auf Marktfruchtbetriebe greift um sich. Gerade in viehlos wirtschaftenden ökologischen Betrieben fallen große Mengen pflanzlicher Biomassen an, für die neben der Nutzung als Gründünger keine direkte Nutzungsmöglichkeit besteht. Vor allem betrifft dies die Aufwüchse legumer Feldfutterpflanzen einer Grünbrache, die nicht nur aufgrund der N-Versorgung eine zentrale Rolle in der ökologischen Fruchtfolge haben, sondern auch wegen ihrer unkrautunterdrückenden und bodenverbessernden Wirkung. Eine Vergärung dieser Biomasse, unter Umständen unter Hinzunahme von Ko-Substraten, in einer Biogasanlage und das Ausbringen von Gärresten kann über den Effekt der Ertragssteigerung bei den Marktfrüchten zu einer Verbesserung des ökonomischen Ergebnisses führen (Kapitel 4.2.2). Die Sicherung einer bedarfsgerechten Nährstoffversorgung der Pflanzen und damit von Erträgen und wirtschaftlichem Erfolg ist für den Landwirt besser steuerbar.

In der Vergangenheit sind auf ökologischen Betrieben auch Großbiogasanlagen entstanden mit einem hohen Einsatz konventioneller Substrate, wie z.B. Maissilage (Kapitel 2.3). Diese Arbeit zeigt jedoch, dass unter den aktuellen Förderbedingungen für Biogasstrom und mit den Substratpreisen der jüngsten Vergangenheit insbesondere die Biogasanlagenkonzepte ökonomisch vorteilhaft sein können, deren Substratbasis auf Abfall- bzw. Nebenprodukten (z.B. Aufwüchse der Grünbrache) basiert. Biogasanlagen mit einem hohen Substratzukauf sind unter den aktuellen Rahmenbedingungen schwer rentabel zu betreiben. Damit steigen die Chancen für eine nachhaltige ökologische Biogasproduktion und das befürchtete Risiko, die massenhafte bzw. überwiegende Verwendung konventioneller Biogassubstrate in ökologischen Biogasanlagen, sinkt. Im aktuellen EEG 2017 ist zudem als Fördervoraussetzung eine Begrenzung von Getreidekorn und Mais als Biogassubstrate verankert.

Die Biogasanlage ist jedoch nicht nur für den ökologischen Landbau interessant. Auch der ökologische Landbau bietet für die Biogasanlagenbranche eine Nische, in der der Betrieb einer Biogasanlage trotz schwieriger Förderbedingungen ökonomisch interessant sein kann. Der Systemversuch hat deutliche Mehrerlöse aus dem Marktfruchtverkauf aufgrund höherer Marktfruchterträge gezeigt und damit geringere „notwendige“ Strompreise. Dies könnte ökologischen Biogasanlagen Vorteile bei der Angebotsabgabe im Zuge der Ausschreibungsverfahren des EEGs 2017 geben. Die Zukunft der Biogasbranche wird allgemein in der Bereitstellung von Regelenergie gesehen. Dies bedeutet ökonomisch betrachtet, dass bevorzugt Strom in hochpreisigen Phasen produziert wird anstatt eines Dauerbetriebs. Somit ist dieses Konzept auch für ökologische Betriebe mit kleineren Substratmengen interessant. Zur Realisierung solcher ökologischen Biogasanlagen wären insbesondere Investitionsförderungen notwendig, da ein rentabler Betrieb der ökologischen Biogasanlagen unter den aktuellen Förderbedingungen (bei Dauerbetrieb) nahezu unmöglich ist. Eine Fremdfinanzierung gestaltet sich unter diesen Voraussetzungen als schwierig.

Wird gleichzeitig von der Nahrungsmittel- und der Energieproduktion gesprochen, so handelt es sich gewöhnlich um eine Diskussion über die Konkurrenzbeziehung dieser beiden Sektoren. Diese Arbeit hat jedoch gezeigt, dass sich unter den Bedingungen des Systemversuchs

Viehhausen und bei dem untersuchten Praxisbetrieb keine Konkurrenz zwischen der Biogasproduktion und dem Marktfruchtbau ergibt, sondern Synergieeffekte entstehen. Dies sollte als größte Chance für die Biogasproduktion und den ökologischen Landbau gesehen werden, vor allem vor dem Hintergrund knapper Fläche, steigender Nachfrage nach (regionalen) ökologisch produzierten Lebensmitteln und der Forderung zu einer nachhaltigen Intensivierung der Landwirtschaft. Importe von Lebensmitteln und Energie können reduziert werden und damit die regionale Wertschöpfung unterstützt werden.

6.6. Empfehlungen

Der Ertragseffekt durch die Gärrestedüngung ist der Haupteinflussfaktor dafür, ob die Integration einer Biogasanlage positive oder negative Auswirkungen auf die Ökonomie des Gesamtbetriebs hat. In dieser Arbeit wurden auf Basis eines Anbauversuchs sowie eines landwirtschaftlichen Betriebes die Ertragseffekte quantifiziert. In beiden Fällen konnten jedoch noch keine Langzeiteffekte erfasst werden. Um Langzeiteffekte bei Pflanzen, Boden und Umwelt durch die Gärrestedüngung analysieren zu können, besteht demnach weiterhin Forschungsbedarf, sowohl auf betrieblicher Ebene (Fallstudien) als auch auf experimenteller Ebene.

Landwirte mit viehlosen bzw. -armen ökologischen Betrieben, die noch keine Biogasanlage betreiben und eine Gärrestedüngung anstreben, sollten unter den derzeitigen Rahmenbedingungen den Fokus auf eine Kooperation mit einer bestehenden Biogasanlage legen.

Für die Zukunft der Biogasbranche muss die Politik neben der Stromerzeugung weitere Einkommensmöglichkeiten für die Betreiber schaffen, so dass die Anlagen den gewünschten Beitrag zur Bereitstellung von Regelenergie erbringen können und auch Altanlagen Perspektiven für einen wirtschaftlich rentablen Weiterbetrieb nach dem Ende der EEG-Förderzeit haben. Im Zusammenhang mit der Integration einer Biogasproduktion in ökologische Betriebssysteme kann dies zum einen eine Investitionsförderung für Biogasanlagen für ökologisch wirtschaftende Betrieben sein, aber auch die Rechtssicherheit (EEG-Vergütung, EU-Öko-Verordnung, Richtlinien der Anbauverbände) bei der Kooperation mit bestehenden Anlagen, z.B. in Form von Substrat-/ Gärrestaustausch, Zubau eines separaten Fermenters bis hin zur Pacht der Gesamtanlage.

Das Schaffen einer langfristigen Rechtssicherheit (EU-Öko-Verordnung und Richtlinien der Anbauverbände) bezüglich des Einsatzes konventioneller Substrate in Biogasanlagen von ökologisch wirtschaftenden Betrieben wird künftig eine Schlüsselrolle bei der weiteren Entwicklung der Biogasproduktion im ökologischen Landbau darstellen. Ob ein (teilweiser) Einsatz von konventionellen Substraten erlaubt sein wird, wird über die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlagen sowie die Konkurrenzkraft dieser Betriebe (Nährstoffinput) bestimmen und damit auch über das Risiko, Investitionen in diesen Bereich zu tätigen.

Im Bereich der Energieversorgung liegt aktuell der Fokus auf der Sektorenkopplung: Synergieeffekte nutzen, um ein leistungsstarkes Gesamtsystem zu entwickeln. Dieser Ansatz sollte auf die Biogasproduktion im ökologischen Landbau übertragen werden und die Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass die möglichen Synergieeffekte zwischen dem ökologischen Marktfruchtbau und der Biogasproduktion genutzt werden können.

7. Zusammenfassung

Ökologisch wirtschaftende Betriebe mit Kleinst-Biogasanlagen zur energetischen Eigenversorgung zählen zu den Pionieren der Biogasproduktion. Die staatliche Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat auch im ökologischen Landbau zu einem Ausbau der Biogasproduktion geführt. In Deutschland gibt es derzeit mehr als 150 Biogasanlagen auf ökologischen Betrieben. Die Anbaubedingungen im ökologischen Landbau sind aufgrund systembedingter Restriktionen und begrenztem Ertragspotenzial für intensive Biogassysteme (z.B. auf der Basis von Silomais) jedoch ungeeignet. Zwischen der ökologischen und der konventionellen Biogasproduktion bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Biomasseproduktionssystems (z.B. Klee gras anstatt Mais) und der Einbindung von Biogasanlagen in betriebliche und überbetriebliche Nährstoffkreisläufe. Dies führt zu unterschiedlichen Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, die Ernteerträge und die Umwelt.

Das Idealbild im ökologischen Landbau ist der Gemischtbetrieb mit möglichst geschlossenen Stoffkreisläufen. Doch viele Ökobetriebe haben sich spezialisiert und sich von einem ökologisch wirtschaftenden Gemischtbetrieb zu einem viehlosen Marktfruchtbetrieb entwickelt. Damit entfällt die Nutzungsmöglichkeit von legumen Feldfutterpflanzen und damit der betriebseigene Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung zur gezielten Düngung von nicht-legumen Feldfrüchten. Mit dem Betrieb einer Biogasanlage in einem ökologischen Marktfruchtbetrieb können nicht nur Erlöse aus dem Energieverkauf (Strom, Wärme) generiert werden, sondern auch die legumen Feldfutterpflanzen (Aufwüchse aus der Brache) als Substrate verwendet werden und damit Gärrest als Düngemittel produziert werden. Durch Biogasanlagen können Stoffströme inner- und überbetrieblich intensiviert und präziser gesteuert werden. Zusätzlich können weitere Substrate zum Nährstoffinput über die Biogasanlage in den Betrieb einfließen.

Chancen und Potenziale der Biogasproduktion im ökologischen Landbau werden erst seit wenigen Jahren erforscht. In Feldversuchen hat sich gezeigt, dass die Gärrestdüngung positive Ertrags- und Qualitätseffekte bewirken kann. Auch Praxisbetriebe haben bei Befragungen positive Ertragseffekte durch die Gärrestdüngung bestätigt sowie teilweise ökonomische Vorteile für den Gesamtbetrieb durch die Biogasanlage genannt. Zu den ökonomischen Effekten der Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen ökologischen Marktfruchtbetrieb bestehen in der Literatur bisher Unstimmigkeiten. Die vorhandenen Studien sind nicht ausreichend, um die ökonomischen Potenziale der Biogaserzeugung unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus hinreichend genau zu quantifizieren. Die größten Defizite der bisherigen Studien bestehen in der unzureichenden Quantifizierung von Ertragseffekten sowie der nur teilweisen Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Biogas- und Nahrungsmittelerzeugung. Auch können die bisherigen Studien nicht auf die derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen übertragen werden. Insbesondere durch die mehrmalige Novellierung des EEG haben sich die Bedingungen für Biogasanlagen stark verändert. Ergebnisse, die noch vor wenigen Jahren Gültigkeit hatten, können heute nicht mehr zur Bewertung der Biogaserzeugung in Deutschland verwendet werden.

Diese Arbeit quantifiziert die ökonomischen Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage in einen viehlosen ökologischen Marktfruchtbetrieb auf der Grundlage experimenteller und betrieblich erhobener Daten zu den Ertragseffekten. Nur mit diesem Wissen kann bewertet werden, ob der Ökolandbau aktuell und künftig nachhaltige Ertrags- und Rentabilitätssteigerungen mit einer Biogasanlage erreichen kann. Diese Arbeit stützt sich zum einen auf Ergebnisse aus

einem Feldexperiment (gemessene Ertragseffekte bei Gärrestdüngung im Vergleich zum ökologischen Marktfruchtbau) und zum anderen auf Ertragsdaten aus der landwirtschaftlichen Praxis.

In einem Dauerfeldversuch am Standort Viehhausen der Technischen Universität München werden die Langzeitwirkungen ökologischer und konventioneller Anbau- und Betriebssysteme auf Boden, Pflanzen und Umwelt untersucht. Es handelt sich um einen Systemversuch, bei dem die Fruchtfolgen, die Ertragsverwendung (Ernte, Stroh- und Gründüngung) sowie die Menge und Qualität der Dünger systemkonform sind. In dieser Arbeit werden die Ertragseffekte und die ökonomische Leistung von zwei Anbausystemen des Versuchs analysiert: Das „Marktfruchtssystem“ (ohne Biogasanlage) wird mit dem „Biogassystem“ (Marktfruchtssystem mit Biogasanlage) verglichen, um die Ertragseffekte durch die Integration einer Biogasanlage zu bestimmen. Beide Anbausysteme haben die gleiche Fruchtfolge (Luzerne-Klee gras, Winterweizen, Wintertriticale, Ackerbohne, Winterroggen) und die produzierten Marktfrüchte werden in beiden Systemen identisch verkauft. Im Marktfruchtssystem wird das Luzerne-Klee gras gemulcht und als Gründünger auf der Fläche belassen. Im Biogassystem wird das Luzerne-Klee gras geschnitten und als Biogassubstrat verwendet; damit wird Strom, Wärme und Gärreste zur Düngung der Marktfrüchte hergestellt.

Die Versuchsdaten fließen zusammen mit Kalkulationsdaten in ein ökonomisches EXCEL-Planungsmodell, welches das Marktfruchtssystem, acht unterschiedliche Biogassysteme mit betriebseigenen Biogasanlagen (Unterschiede: Größe der Biogasanlage, Anbaufläche, Substratmix) sowie ein Biogassystem ohne eigene Biogasanlage (Substratlieferung an Fremdanlage und Gärrestrücknahme) abbildet. Aufgrund der vielfältigen innerbetrieblichen Systemwirkungen eines ökologischen Betriebs wird bei der ökonomischen Bewertung ein gesamtbetrieblicher Modellansatz gewählt. Für die ökonomische Bewertung der Biogasanlage und des Gesamtsystems werden die aktuellen Förderbedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2017 verwendet. Als ökonomische Kennzahlen dienen der Unternehmergewinn des Gesamtbetriebs und der „Mehrgewinn“ durch die Integration einer Biogasanlage. Als weitere Kennzahlen werden die Stromgestehungskosten sowie der „notwendige“ Strompreis ermittelt, der nötig wäre, damit die Integration einer Biogasanlage aktuell und künftig positive ökonomische Effekte mit sich bringt.

Im Untersuchungszeitraum (2010-2014) waren im Systemversuch Viehhausen die Getreideerträge des Biogassystems signifikant höher (27% - 47%) als die des Marktfrucht systems. Auch die Erträge der (ungedüngten) Ackerbohne waren im Systemversuch Viehhausen in allen Betrachtungsjahren im Biogassystem höher als im Marktfruchtssystem aufgrund der Nachwirkung der Düngung. Beim Luzerne-Klee gras wurden mit Ausnahme des ersten Erntejahres auch stets höhere Erträge beim Biogassystem gemessen. Der Ertragsanstieg beim Getreide im Biogassystem ist auf die direkte und indirekte Düngungswirkung der Gärreste zurückzuführen (Nähstoffversorgung, Verbesserung der Bodenstruktur, Humusaufbau, Anstieg der biologischen Aktivität). Die stickstofffixierenden Leguminosen profitierten von dem Input an Makro- und Mikronährstoffen über die Fruchtfolge. Die Quantifizierung der Ertragszuwächse erfolgte in dieser Arbeit über die ersten fünf Jahre des Systemversuchs Viehhausen. Dieser Zeitraum ist als Initialphase zu werten.

Die ökonomischen Modellrechnungen auf der Basis der experimentellen Daten des Systemversuchs Viehhausen und ökonomischen Kalkulationsdaten zeigten, dass angepasste ökolo-

gische Biogaskonzepte zu positiven ökonomischen Effekten für den Gesamtbetrieb im Vergleich zu einem Marktfruchtsystem führen können. Bei diesen Modellbetrieben konnten durch die Integration der Biogasanlage „Mehrgewinne“ von ca. 50 bis 590 € ha⁻¹ erreicht werden. Der Unternehmergeinn des Ackerbaus lag in den Biogassystemen um circa 300 € ha⁻¹ höher als im Marktfruchtsystem. Die höheren Erlöse aus dem Marktfruchtverkauf kompensierten sogar die finanziellen Verluste der Biogasanlagen, die sich vor allem durch die Betrachtung von Kleinanlagen in dieser Arbeit sowie aufgrund der derzeitigen schlechten Fördersituation durch das EEG 2017 ergaben.

Das Biogasanlagenkonzept muss an den Bedarf von Gärresten sowie die Situation der Substratbereitstellung angepasst sein. Insbesondere ist es ökonomisch sinnvoll, Nebenprodukte (z.B. Aufwüchse eine Grünbrache, Wirtschaftsdünger) als Substrate zu wählen. Der Zukauf teurer Ko-Substrate (Substratpreis und Transportkosten) kann unter den heutigen Förderbedingungen ökonomisch nur sinnvoll sein, wenn der Nährstoffinput zur Ertragssteigerung benötigt wird. Dementsprechend kann ein Biogasanlagenkonzept, das nicht an die Bedingungen des Gesamtbetriebs angepasst ist, auch zu negativen ökonomischen Auswirkungen für den Gesamtbetrieb führen. In diesem Fall sind die Verluste der Biogasanlage zu hoch, um von den Mehrerträgen der Marktfrüchte ausgeglichen zu werden. Dies gilt auch für sehr kleine Biogasanlagen (z. B. 25 kW_{el}) mit sehr hohen spezifischen Investitions- und Betriebskosten.

In dieser Arbeit wurde auch aufgezeigt, wie ein viehloser Marktfruchtbetrieb durch eine Kooperation mit einer Biogasanlage einen „eigenen“ Gärrest zur Düngung erhält. Durch die kostenlose Abgabe der Aufwüchse der Rotationsbrache an eine Biogasanlage und die Rücknahme von Gärresten können durch die Düngung positive Ertragseffekte erzielt werden. Der Unterschied zur eigenen Biogasanlage besteht vor allem darin, dass keine Erlöse durch den Strom- und Wärmeverkauf erzielt werden, aber auch keine Verluste beim Betrieb der Biogasanlage hingenommen werden müssen. Auch die Bindung von Kapital durch den Bau der Biogasanlage entfällt. Für Biogasanlagenbetreiber bietet dieses Modell der Substratlieferung im Gegenzug die Möglichkeit, ihre Substratkosten zu senken, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen und insbesondere bei den im EEG 2017 verankerten Ausschreibungsverfahren (auch für Altanlagen) erfolgreich bieten zu können.

Mit Hilfe des EXEL-Planungsmodells wurden anhand einer Risikoanalyse (Sensitivitätsanalyse und Monte-Carlo-Simulation) die Stabilität der Unternehmergeinne sowie die Wahrscheinlichkeit eines „Mehrgewinns“ überprüft. Die Sensitivitätsanalyse zeigte bei den untersuchten Parametern (Investitionskosten für die Biogasanlage, Wärmeabsatzmenge, Wärmepreis), dass eine Abweichung vom Plan bei allen Biogassystemen zu entscheidungsrelevanten Ergebnisveränderungen führen kann. Dementsprechend ist es wichtig, während der Planungsphase das Investitionsbudget zu beachten. Beim Wärmekonzept ist vor der Investitionsentscheidung nicht nur auf die abgesetzte Wärmemenge zu achten, sondern insbesondere auch auf den erzielbaren Wärmepreis. Für Risikoparameter, die zeitlich nach einer Entscheidung für oder gegen eine Biogasanlage eintreten, wurde eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die zuvor statisch ermittelten Unternehmergeinne der Anbausysteme auch bei schwankenden Marktpreisen, Erträgen sowie bei praxisüblichen Schwankungen von Substratverlusten durch Lagerung bzw. Transport und beim Biogasanlagenbetrieb Gültigkeit haben. Zum anderen zeigte sich, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von über 85 % einzelne Biogassysteme mit eigener Anlage sowie das Biogassystem ohne eigene Anlage „Mehrgewinne“ im Vergleich zum Marktfruchtsystem erzielen können.

Der zweite Forschungsansatz in dieser Arbeit stützte sich auf Daten eines ökologisch bewirtschafteten Betriebs (betriebliche Fallstudie). Die Basis hierfür bildeten Ertrags- und Anbaudaten vor Inbetriebnahme (Erntejahre 2001, 2002, 2004-2006) und nach Inbetriebnahme der Biogasanlage (Erntejahre 2012-2014) sowie die Betriebsdaten der Biogasanlage. Nach der Inbetriebnahme der Biogasanlage konnten im Vergleich zur der Phase vor der Inbetriebnahme überwiegend höhere Marktfruchterträge ermittelt werden. Die Getreideerträge als arithmetisches Mittel über alle Getreidearten waren nach der Inbetriebnahme um ca. 16 % höher. Vor allem bei Wintergerste (+ 53 %) und bei Sommergerste (+ 31 %) konnten enorme Ertragssteigerungen gemessen werden. Bei Winterweizen wurde eine Ertragssteigerung von 19 % erreicht. Wie im Systemversuch Viehhausen konnten auch auf dem Praxisbetrieb Ertragssteigerungen bei den legumen Marktfrüchten ermittelt werden (Ackerbohne: 17 %, Erbsen: 6 %). Die Ergebnisse bestätigen prinzipiell die experimentellen Ertragseffekte, liegen jedoch (im Mittel des Betriebes) im unteren bis mittleren Bereich der möglichen Ertragsteigerung. Die Düngungsintensität, das Düngungsmanagement (Zeitpunkt der Düngung, Menge und Qualität der flüssigen und festen Gärrestdünger), aber auch mögliche Bodengefügeschäden und Schädverdichtung durch häufigeres Überfahren der Ackerflächen bei der Gärrestapplikation, sind Gründe dafür, warum in Praxisbetrieben zum Teil geringere Ertragssteigerungen beim Getreide realisiert werden, als im Systemversuch. Zusätzlich machen es Jahreseffekte sowie Standort- und Managementeinflüsse schwierig, die Auswirkungen der Biogasanlage auf die Ertragseffekte bzw. die wirtschaftlichen Effekte in betrieblichen Fallstudien exakt abzuschätzen.

Der Praxisbetrieb konnte durch die Inbetriebnahme der Biogasanlage einen „Mehrgewinn“ in Höhe von ca. 1.850 € ha⁻¹ erzielen. Der Mehrgewinn ergab sich aus einem „Mehrgewinn“ im Ackerbau und dem Gewinn der Biogasanlage. Die hohe EEG-Einspeisevergütung, die für den Strom der Praxisbiogasanlage gilt (26,66 Cent kWh_{el}⁻¹), sowie der hohe Wärmeverkauf zu marktüblichen Wärmepreisen (75 € MWh⁻¹) spiegelten sich im Unternehmerngewinn der Biogasanlage wider (1.320 € ha⁻¹). Der Mehrgewinn des Ackerbaus in Höhe von ca. 529 € ha⁻¹ ergab sich aus den höheren Marktfruchterträgen, aber auch aufgrund von höheren erzielten Preisen für die Marktfrüchte. Auch die praxisbetriebliche Untersuchung zeigt damit eine Verbesserung des ökonomischen Gesamtergebnisses durch den Betrieb der Biogasanlage. Aufgrund der ökonomisch vorteilhaften Erlössituation der Biogasanlage, trägt hier im Vergleich zu den Modellberechnungen im Systemversuch Viehhausen auch die Biogasanlage selbst zur Erhöhung des Unternehmerngewinns bei.

Diese Arbeit zeigt, dass eine gesamtbetriebliche Bewertung notwendig ist, um die Wechselbeziehungen zwischen der Biogasanlage und dem Ackerbau vollständig zu berücksichtigen und die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer ökologischen Biogasanlage bewerten zu können. Durch die Integration einer Biogasanlage können positive ökonomische Effekte aufgrund der Ertragssteigerung realisiert werden können, selbst wenn die Biogasanlage nicht rentabel betrieben werden kann. Dies gilt insbesondere für viehlose bzw. vieharme ökologische Betriebe. In der Vergangenheit sind auf ökologischen Betrieben auch Großbiogasanlagen entstanden mit einem hohen Einsatz konventioneller Substrate, wie z.B. Maissilage. Diese Arbeit zeigt jedoch, dass unter den aktuellen Förderbedingungen für Biogasstrom und mit den Substratpreisen der jüngsten Vergangenheit insbesondere die Biogasanlagenkonzepte ökonomisch vorteilhaft sein können, deren Substratbasis auf Abfall- bzw. Nebenprodukten (z.B. Aufwüchse der Grünbrache) basiert. Biogasanlagen mit einem hohen Substratzukauf sind unter den aktuellen Rahmenbedingungen kaum rentabel zu betreiben. Damit steigen die Chancen für eine

nachhaltige ökologische Biogasproduktion und das befürchtete Risiko, die massenhafte Verwendung konventioneller Biogassubstrate in ökologischen Biogasanlagen, sinkt. Im aktuellen EEG 2017 ist zudem als Fördervoraussetzung eine Begrenzung von Getreidekorn und Mais verankert.

Die Biogasanlage ist jedoch nicht nur für den ökologischen Landbau interessant. Auch der ökologische Landbau bietet für die Biogasanlagenbranche eine Nische, in der der Betrieb von Biogasanlagen trotz schwieriger Förderbedingungen ökonomisch interessant sein kann. Der Systemversuch hat deutliche Mehrerlöse aus dem Marktfruchtverkauf aufgrund höherer Marktfruchterträge gezeigt und damit geringere „notwendige“ Strompreise für den Strom aus der Biogasanlage. Dies könnte ökologischen Biogasanlagen Vorteile bei der Angebotsabgabe im Zuge der Ausschreibungsverfahren des EEG 2017 geben.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich keine Konkurrenz zwischen der Biogasproduktion und dem ökologischen Marktfruchtbau ergibt, sondern vielmehr Synergieeffekte entstehen können. Diese Chance für die Biogasproduktion und den ökologischen Landbau sollte genutzt werden, insbesondere vor dem Hintergrund knapper Fläche, steigender Nachfrage nach (regionalen) ökologisch produzierten Lebensmitteln, dem Ziel einer nachhaltigen Intensivierung der Landwirtschaft sowie der Notwendigkeit, Biogasanlagen im Energiemix zur Bereitstellung von Regelenergie zu nutzen.

8. Summary

The pioneers of biogas production in Germany are organic farmers with small biogas plants for energy self-supply. The support through the Renewable Energy Act has led to an expansion of biogas production, also in organic farming. There are currently more than 150 biogas plants on organic farms in Germany. But the growing conditions for intensive biogas systems are unsuitable due to system-related restrictions and limited yield potential in organic farming. There are several important differences between organic and conventional biogas production. One difference concerns the biomass production system, e.g. grass-legume mixture (GLM) instead of maize. Another difference is the way in which biogas plants are integrated into nutrient cycles, which results in different effects on soil fertility, crop yields, and the environment.

The ideal of an organic farm is the mixed farm with closed material cycles. However, many organic farms have specialized and have developed from an organic mixed farm to a stockless farm. In this case, there is no intended use for leguminous field crops anymore and no farm manure for the targeted fertilization of non-legume crops available. With the integration of a biogas plant in a stockless organic farming system not only energy is produced (electricity, heat), but also the legume field crops can be used as substrates and biogas slurry is available for the fertilization. With a biogas plant in the farming system, material flows can be intensified and controlled more precisely in and between farms. Also additional substrates for nutrient input can be used in the biogas plant.

This study quantifies the economic impacts of the integration of a biogas plant into a stockless organic farming system, based on experimental and operational data on yield effects. Only with this knowledge it is possible to determine whether organic farming systems can achieve sustained increases in yield and profitability with a biogas plant. On the one hand, this work is based on results from a field experiment (measured yield effects in the case of the fertilization with biogas slurry in comparison to organic market crop production) and, on the other hand, on yield data from an organic farm.

The long-term „farming systems“ field experiment was established in 2009 at the Viehhausen experimental station of the Technical University of Munich. Here, the yield effects in the crop rotations of different farming systems (e.g., arable farming vs. biogas systems) can be measured under comparable site and management conditions. The experimental data of the field experiment and the recorded field operations served as the input data for an economic model. This economic model comprises a whole farm concept for the “biogas system” and the “reference system” (arable farming without biogas). The economic model can be used to calculate costs, revenues, and profits depending on the biogas system (size of the biogas plant and its integration into the operating system). In case studies and model calculations on the basis of the experimental data, different biogas system designs were investigated: biogas systems wherein biogas plants were integrated into organic arable farming systems, and one biogas system with co-operation of a stockless organic farm and a biogas plant. In the „reference system“ the biomass of the GLM is mulched and left as green manure on the field. In the „biogas system“ the biomass of the GLM is used as a biogas substrate, and the produced biogas slurry is applied to the cereals. The research focus is on two crucial parameters that determine the economic impact of integration of a biogas plant into a stockless farm: the yield effects and the biogas plant design (size and integration into the organic farming system).

Within the investigated period (2010–2014), the cereal yields of the biogas system were significantly higher (27% - 47%) than those of the reference system. The wheat yields of the biogas system were substantially higher than those of the reference system, although wheat followed mulched GLM (green manure) in the crop rotation of the reference system. The non-fertilized legumes (GLM and faba beans) showed smaller, nonsignificant yield effects. The increase of the cereal yield in the biogas system is due to the direct and indirect fertilizing effect of the digestate (nutrient supply, improvement of soil structure, humus, increase in biological activity). The nitrogen-fixing legumes benefit from the input of macro- and micronutrients. It should be noted that the investigated period of the analysis of the yield effects in this study is the initial phase of the field experiment.

The results of the calculations with the economic model show that the integration of a biogas plant in an organic farming system can lead to economic advantages for the farm in comparison to a stockless organic farming system. By integrating the biogas plant in the farming system, additional profits of approximately 50 to 590 € ha⁻¹ can be achieved. The entrepreneurial profit of arable farming in the „biogas systems“ is around 300 € ha⁻¹ higher than in the „reference system“. The results show that the higher revenues for the cash crops compensated for the financial losses of the model biogas plants. The dimensions of the biogas plant play an important role in any improvement in the overall profit of the farm. The size of the biogas plant must be adapted to the quantity of substrates produced on-site and the needs for biogas slurry. Diverging from our model biogas plants, which required minimal purchasing of additional substrates, one strategy that a farmer could employ might be inputting a higher level of purchased substrates. This nutrient input could lead to higher yield effects. However, there can be also the case that the losses of the biogas plant cannot be compensated by the higher yields of the cereals. E.g., this applies to very small biogas plants (in this study: 25 kW_{el}) with very high specific investment and operating costs.

This study shows that a stockless cropping farm without a biogas plant can profit by a cooperation with a separate biogas plant. This farm supplies the GLM to a biogas plant and receives the biogas slurry once produced without investment in a biogas plant.

The stability of the entrepreneurial profits were checked with a risk analysis (sensitivity analysis and Monte Carlo simulation). The sensitivity analysis shows that a variance in the investment costs for the biogas plant, the quantity of purchased heat, and the sales price for the heat can lead to decision-relevant changes in results in all biogas systems. For risk parameters that occur after a decision for or against the investment in a biogas plant, the Monte Carlo simulation has been made. The results shows that the entrepreneurial profits of the farming systems, determined with the economic model, are valid even in the case of varying market prices, yields and changes in substrate losses due to storage or transport or in technical parameters of the biogas plant. It was shown that some of the modeled biogas systems could achieve their entrepreneurial profits with a probability of more than 85 % by integration a biogas plant in the farming system.

The second research approach in this study based on data from an organic farm. The data were analyzed before (investigated years: 2001, 2002, 2004-2006) and after the beginning of operation (investigated years 2012-2014) of the biogas plant. After the integration of the biogas plant in the farming system mainly higher cereal yields could be determined (+ 16 %). Enormous increases in yield could be measured especially by winter barley (+ 53%) and summer barley (+ 31%). For winter wheat a yield increase of 19% was achieved. Yield increases in the

legumes were also measured on the farm (field bean: 17%, peas: 6%). The results confirm the yield effects of the field experiment but are in the lower range. The fertilization intensity, fertilization management (time of fertilization / liquid and solid biogas slurry), soil texture damage and compaction by frequent crossing the arable land may be reasons why lower yield increases are realized in practice than field experiment. In addition, the annual effects as well as location and management influences make it difficult to accurately estimate the effects of the biogas plant on the yield effects or the economic effects in case studies.

The farm was able to achieve a higher entrepreneurial profit of approximately 976 € ha⁻¹ after the integration of the biogas plant. The additional profit results from the yield effects and the profit of the biogas plant. The high EEG feed-in tariff of this biogas plant (26.66 Cent kWh_{el}⁻¹), as well as the heat sales with market prices (75 € MWh⁻¹) is reflected in the entrepreneurial profit of the biogas plant (€ 500 ha⁻¹). The additional profit of arable farming in the amount of approximately € 476 ha⁻¹ results from higher crop yields, but also from higher prices for the market crops.

This study shows that it is insufficient to analyze the biogas process in isolation assessing the profitability of an organic biogas plant. A system approach is necessary to investigate the interactions between the biogas plant and the arable farming system. It is quite possible that operating a biogas plant is not profitable alone, but it may result in overall positive economic effects for the farm due to significant increases in cereal yields. This statement is especially true for organic farming systems, as the yield effects due to fertilization with biogas slurry have greater relevance in low-input farming systems than they do in conventional high-input systems with a fertilization approach based on mineral fertilizer. The effect is greater in stockless farming systems. Also large-scale biogas plants have been developed on organic farms with a high use of conventional substrates, such as e.g. corn silage, as nutrient input.

Under the current conditions for biogas production (e.g. EEG, energy and substrate prices) biogas plant concepts with substrates based on waste or byproducts (e.g. green fallow) can be economically advantageous. Biogas plants with a high substrate purchase are hardly profitable to operate under the current conditions. This situation automatically leads to a sustainable biogas production and minimizes the risk of the mass use of conventional biogas substrates in organic farming systems. In addition, in the current EEG 2017, a restriction of cereals and corn is determined. However, the biogas production is not only interesting for organic farming. Organic farming also offers a possibility for the biogas plant sector: Operating a biogas plant can be economically interesting in organic farming systems, despite difficult conditions (EEG).

The results of this work show that there is no competition between biogas production and organic arable farming, rather synergy effects can arise. This opportunity for biogas production and organic farming should be exploited, especially because of the increasing demand for (regional) organically produced food, the demand for sustainable intensification of agriculture and the need for biogas plants in the energy mix.

9. Literaturverzeichnis

AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (2015): Fernwärme Preisübersicht (Stichtag 01.01.2015), Frankfurt, 16 S.

Amigun B., Musango J. K., Stafford W. (2011): Biofuels and sustainability in Africa. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, p. 1360-1372

Altireri M. A. (2009): The ecological impacts of large-scale agrofuel monoculture production systems in the Americas. In: *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 29, p. 236-244

Alluvione F., Bertora C., Zavattaro L., Grignani C. (2010): Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn. In: *Soil Science Society of America*, Vol. 74, p. 384-395

Andreae B. (1959): *Wirtschaftslehre des Ackerbaus*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 274 S.

Anspach V. (2010): Status quo, Perspektiven und wirtschaftliche Potenziale der Biogaserzeugung auf landwirtschaftlichen Betrieben im ökologischen Landbau. Dissertation Universität Kassel, Kassel University Press, 205 S.

Anspach V., Möller D. (2009): Konzepte und Strategien der Biogaserzeugung im Ökologischen Landbau – Ergebnisse des Bio-Biogas-Monitoring 2007. In: Mayer, J.; Alföldi, T.; Leiber, F.; Dubois, D.; Fried, P.; Heckendorn, F.; Hillmann, E.; Klocke, P.; Lüscher, A.; Riedel, S.; Stolze, M.; Strasser, F.; van der Heijden, M. und Willer, H. (Hrsg.): *Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel* Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, ETH Zürich, 11.-13. Februar 2009, S. 390-393

Anspach V., Möller D. (2008): Biogas and Organic Farming - Empirical evidence on production structure and economics in Germany. In: Neuhoﬀ, D. et al. (Hrsg.): *Cultivating the future based on science*, Vol. 2, *Livestock, Socio-Economy and Cross Disciplinary Research in Organic Agriculture*, p. 604-607

Anspach V., Möller D. (2007): Biogasproduktion im ökologischen Landbau – Chancen und Herausforderungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht. In: Kuhlmann, Friedrich und Schmitz, Michael (Hrsg.): *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Good Governance in der Agrar- und Ernährungswirtschaft*, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 42, *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Nr. 42*, S. 485-486

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) (2015): *BHKW-Kenn-daten 2014/2015*. 68 S.

Baresel J.P., Zimmermann G., Reents H.J. (2008): Effects of genotype and environment on N uptake and N partition in organically grown winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Germany. In: *Euphytica*, Vol. 163, p. 347-354

Báth B., Malgeryd J., Stintzing A.R., Åkerhielm H. (2006): Surface Mulching with Red Clover in White Cabbage Production - Nitrogen Uptake, Ammonia Losses and the Residual Fertility on Ryegrass. In: *Biological Agriculture & Horticulture*, Vol. 23, p. 287-304

Bellon S., Penvern S. (2014) *Organic Food and Farming as a Prototype for Sustainable Agricultures*. In: Bellon S., Penvern S. (Hrsg.): *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer Verlag, S. 1-19

Berenz S., Bochmann G., Heißenhuber A. (2008): Strategien zur Risikominimierung beim Betrieb von Biogasanlagen. In: *Risikomanagement in der Landwirtschaft. Schriftenreihe Band 23*. Rentenbank. Frankfurt am Main, S. 185-223

Berenz S., Heißenhuber A. (2007): Ökonomische Aspekte zur energetischen Nutzung von Biomasse. In: *Berichte über Landwirtschaft*. Band 85, Heft 2, Landwirtschaftsverlag, Münster, S. 165-177

Bioland (2016): *Bioland-Richtlinien - Fassung vom 16. März 2016*.

Bioland (2013): *Bioland-Richtlinien - Fassung vom 18. März 2013*

- Bioökonomierat (2012): Nachhaltige Nutzung von Bioenergie, Forschungs- und Technologierat Bioökonomie, Berlin, 35 S.
- BLS - Bayerisches Landesamt für Statistik (2017a): Durchschnittliche Hektarerträge, Landkreis Freising, Genesis-Online-Datenbank
- BLS - Bayerisches Landesamt für Statistik (2017b): Pressemitteilung vom 21. Juni 2017. https://www.statistik.bayern.de/presse/archiv/142_2017.php (Abrufdatum 09.08.2017)
- Blumenstein B., Siegmeier T., Hofmann F., Gerlach F., Zerger U., Möller D. (2015a): Auswirkungen einer integrierter Biogaserzeugung auf ökologische Betriebssysteme: Monetäre Bewertung. In: Häring A. M., Hörning B., Hoffmann-Bahnsen R., Luley H., Luthardt V., Pape J., Trei G. (Hrsg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, 17.-20. März 2015, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 626-629
- Blumenstein B., Möller D., Hoffmann F., Weddige U., Jaensch V., Hartmann K. (2015b): Ökonomische Analyse. In: Biogasanlagen im Ökolandbau - Projektbericht im Auftrag der FNR, S. 122-168
- Blumenstein B., Siegmeier T., Möller D. (2014): Biogas in Organic Agriculture: Utopia, Dead-End or Role Model? – A Synopsis. In: RAHMANN G & AKSOY U (Eds.), Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference. 'Building Organic Bridges', at the Organic World Congress 2014, 13-15 Oct., Istanbul / Turkey, p. 399-402
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Ökologischer Landbau in Deutschland. URL: http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Oekolandbau/_Texte/Oekologischer_Landbau-Deutschland.html#doc377838bodyText6 (Abrufdatum: 24.03.2015)
- Böswirth T. (2017): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Energie- und Treibhausgasbilanzierung landwirtschaftlicher Biogassysteme, Verlag Dr. Köster, Berlin, 210 S.
- Böswirth T., Hülsbergen K.-J. (2016): Landwirtschaftliche Biogassubstraterzeugung – Betriebliche Ebene. In: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen, Abschlussbericht "Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern - ExpResBio", Straubing, S. 137-146
- Bryzinski T. (2015): Unveröffentlichte Ertragsabschätzungen anhand von Sensordaten, Systemversuch Viehhausen, Lehrstuhls für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, TU München, persönliche Mitteilung
- Bryzinski T., Hülsbergen K.-J. (2015): Energiebilanzen und Erträge ökologischer und konventioneller Anbausysteme: erste Analyseergebnisse eines Dauerfeldversuchs in Süddeutschland. In: Häring A. M., Hörning B., Hoffmann-Bahnsen R., Luley H., Luthardt V., Pape J., Trei G. (Hrsg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, 17.-20. März 2015, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 248-251
- BSH - Bauernverband Schleswig-Holstein (2014): Tarifverträge. URL: <http://www.bauernverbandsh.de> (Abrufdatum: 28.12.2014)
- Bulson H.A.J., Welsh J.P., Stopes C.E., Woodward L. (1996): Stockless organic farming in the UK: Potential and limits, 1988-1995. In: Kristensen N.H., Høgh-Jensen, H. (eds.): New Research in Organic Agriculture. IFOAM, Ökozentrum Imsbach, Tholey-Theley, p. 17-22
- Castell A., Eckl T., Schmidt M., Beck R., Heiles E., Salzeder G., Urbatzka P. (2016): Fruchtfolgen im ökologischen Landbau - Pflanzenbaulicher Systemvergleich in Viehhausen und Puch. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Nr. 9/2016
- Cornelissen S., Koper M., Deng Y.Y. (2012): The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. Biomass & Bioenergy, Vol. 41, p. 21-33
- Crutzen P. J., Mosier A. R., Smith K. A., Winiwarter W. (2008): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. In: Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 8, p. 389-395

David C. Jeuffroy M. H., Laurent F., Mangin M., Meynard J. M. (2005a): The assessment of a decision making tool for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. In: European Journal of Agronomy, Vol. 23, p. 225-242

David C. Jeuffroy M.H., Henning J., Meynard J. M. (2005a): Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. In: Agronomy of Sustainable Development, Vol. 25, p. 213-223

Demeter (2015): Richtlinien für die Zertifizierung „Demeter“ und „Biodynamisch“ (Erzeugung), Stand Oktober 2015, 1. Auflage

Demeter (2013): Richtlinien für die Zertifizierung der Demeter-Qualität (Erzeugung), Stand Dezember 2013, 1. Auflage

Deng Y., Klaus S., Cornelissen S., Leun van der K., Blok K. (2011): Pathway to a fully sustainable global energy system by 2050. In: Conference transcript of World Renewable Energy Congress 2011, Schweden / Linköping, 8-13 May 2011, p. 3492-3499

Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) (2011): Die neue Betriebszweigabrechnung. DLG-Verlag, Frankfurt, 124 S.

Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) (2006): Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen, DLG-Verlag, Frankfurt, 68 S.

Döhler H., Wulf S. (2009): Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung. In: Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F+E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche, Band 30, S. 15-28

EEG - Erneuerbare-Energien-Gesetz (2017): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

EEG - Erneuerbare-Energien-Gesetz (2014): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 15 des Gesetzes vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2034) geändert worden ist, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

European Energy Exchange (EEX) (2016): EPEX-Spot (PHELIX). URL: <http://www.eex.com> (Abrufdatum 10.06.2016)

Europäische Gemeinschaft (2007): Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91

Europäische Gemeinschaft (2008): Durchführungsbestimmungen – Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle

Finke R. (2005): Grundlagen des Risikomanagements – Quantitative Risikomanagement-Methoden für Einsteiger und Praktiker. WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 232 S.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2015): Mediathek Biogas – Massebezogener Substrateinsatz in Biogasanlagen (Abb. 88 und 90). URL: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas.html> (Abrufdatum 06.04.2015).

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2013): Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow, 244 S.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009): Biogas-Messprogramm II. Gülzow, 168 S.

- Freyer B., Pietsch G., Hrbek R., Winter S. (2005): Futter-und Körnerleguminosen im biologischen Landbau. 1. Auflage, Österreichischer Agrarverlag
- Frøseth R. B., Bakken A. K., Bleken M. A., Riley H., Thorup-Kristensen K., Hansen S. (2012): Improving N efficiency in barley through green manure management and biogas slurry. In: Richards K. G., Fenton O., Watson C. J. (Eds.) Proceedings of the 17th Nitrogen Workshop - Innovations for sustainable use of nitrogen resources., The Irish Agriculture Food and Development Authority -Teagasc , Ireland, p. 124-125
- Garnett T., Appleby M. C., Balmford A., Bateman I. J., Benton T. G., Bloomer P., Burlingame B., Dawkins M., Dolan L., Fraser D., Herrero M., Hoffmann I., Smith P., Thornton P. K., Toulmin C., Vermeulen S. J., Godfray H. C. J. (2013): Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. In: Science, Vol. 341, Issue 6141, p. 33-34
- Gollnow S., Bahrs E. (2012): Treibhausgasbilanzierung und –vermeidungskosten verschiedener Biogasanlagenorientierungen anhand eines Fallbeispiels. In: Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie 2012, Band 21(1), S. 157-166
- Heißenhuber A.; Berenz S. (2006): Energieproduktion in landwirtschaftlichen Unternehmen. In: Darnhofer, I.; Wyrtrzens, H. K.; Walla, C.: Alternative Strategien in der Landwirtschaft, Facultas Verlags- und Buchhandel AG, Wien, S. 135-144
- Heuwinkel H., Gutser R., Schmidhalter U. (2005): Auswirkung einer Mulch- statt Schnittnutzung von Klee gras auf die N-Flüsse in einer Fruchtfolge. In: Tagungsband zur Ökolandbautag am 16.02.2005 in Weihenstephan -Forschung für den Ökologischen Landbau in Bayern, S. 71-79
- Hertz D. B. (1964): Risk Analysis in Capital Investment. In: Harvard Business Review, Vol. 42, p. 95-106
- Hildebrand K. (1988): Systemorientierte Risikoanalyse in der Investitionsplanung. Duncker & Humblot Verlag, 264 S.
- Hülsbergen K.-J., Schmid H. (2018): Nährstoffkreisläufe eines ökologischen Marktfruchtbetriebs, unveröffentlichtes Datenmaterial des Lehrstuhls für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, TU München, persönliche Mitteilung am 29.03.2018
- Hülsbergen K.-J. (2015): Nachhaltige Ertragssteigerung im Öko-Landbau – Grundlage für eine erfolgreiche Entwicklung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Bayerische Agrarprodukte im Spannungsfeld neuer Märkte, S. 18-29
- Hülsbergen K.-J (2007): Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Biogaserzeugung im ökologischen Landbau, KTBL-Heft 65, Darmstadt, S. 7-9
- Hülsbergen K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Berichte aus der Agrarwirtschaft. Shaker Verlag Aachen
- Hülsbergen K.-J., Feil B., Biermann S., Rathke G. W., Kalk W. D., Diepenbrock W. (2001): A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. In: Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol 86, p. 303-321
- IFOAM – International Federation of Organic Agriculture Movements (2017): Prinzipien des Öko-Landbaus – Präambel. https://www.ifoam.bio/sites/default/files/poa_german_web.pdf (Abrufdatum 09.08.2017)
- Jäger P., Döhler H., Hartmann S. (2007): Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Biogaserzeugung im ökologischen Landbau, KTBL-Heft 65, Darmstadt, S. 40-45
- Jahn G. (2004): Konsumverhalten beim Kauf ökologischer Lebensmittel. In: Kärcher A., Reiter K., Wierbinski (Bearb.), Ökologischer Landbau – Quo Vadis? Zwischen Ideologie und Markt, Bundesamt für Naturschutz (BfN), BfN-Skripten 105, S. 63-78

- Kost C., Mayer J. N., Thomsen J., Hartmann N., Philipps S., Nold S., Lude S., Schlegl T. (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Studie des Fraunhofer-Instituts für solare Energiesystem (ISE), Version November 2013
- Kravchenko A. N., Snapp S. S., Robertson G. P. (2017): Field-scale experiments reveal persistent yield gaps in low-input and organic cropping systems. In: PNAS, Vol. 114, p. 926-931
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2016a): Feldarbeitsrechner. URL: <http://daten.ktbl.de> (Abrufdatum 25.05.2016)
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2016b): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Darmstadt, 768 S.
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2014): Biogasrechner URL: <http://daten.ktbl.de> (Abrufdatum 9.11.2014).
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2013): Faustzahlen Biogas. Darmstadt, 360 S.
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2012a): Energiepflanzen. Darmstadt, 368 S.
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2012b): Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/13. Darmstadt, 824 S.
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2010): Ökologischer Landbau – Daten für die Betriebsplanung. Darmstadt, 824 S.
- Kuhnert H., Behrens G., Hamm U., Müller H., Nieberg H., Sanders J., Strohm R (2013) Ausstiege aus dem ökologischen Landbau: Umfang – Gründe – Handlungsoptionen. Thünen Rep 3, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 319 S.
- Küstermann B., Munch C. H., Hülsbergen K.-J. (2013): Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany. In: European Journal of Agronomy, Vol. 49, p. 61-73
- Küstermann B., Christen O., Hülsbergen K.-J. (2010): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. In; Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 135, p. 70–80
- Laschewski L., Pessier H.-J. (2008): Risikorechnung in landwirtschaftlichen Großbetrieben in den Neuen Bundesländern. Schriftenreihe Band 23. Rentenbank. Frankfurt am Main, S. 91-134
- Läpple D. (2007): Investitionsverhalten in der Landwirtschaft – eine empirische Untersuchung bayerische Betriebe. In: Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie, Nr. 01/07
- Leopoldina (2012): Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften), Halle (Saale), 238 S.
- Levin K., Schießl A., Kimmelman S., Reents H. J., Hülsbergen K.-J. (2015): Effekte von Energiepflanzen-Fruchtfolgen und Gärrestdüngung auf den Weizenertrag. In: Häring A. M., Hörning B., Hoffmann-Bahnsen R., Luley H., Luthardt V., Pape J., Trei G. (Hrsg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, 17.-20. März 2015, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 75-78
- LFL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2018): Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. URL: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html> (Abrufdatum: 10.05.2018)
- LFL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2014): Internet Deckungsbeitragsrechner. URL: <https://www.stmelf.bayern.de> (Abrufdatum: 26.05.2014)

- LFL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2011a): Nutzung von Grünland zur Biogasproduktion. URL: <http://www.lfl.bayern.de> (Abrufdatum: 04.02.2015)
- LFL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2011b): Agrarstrukturentwicklung in Bayern. URL: <http://www.lfl.bayern.de/> (Abrufdatum: 04.05.2015)
- LFL Wetter - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Agrarmeteorologie (2018): Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur am Standort Düren (2009 bis 2014). URL: <http://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesBAM.nsf/bamweb/89952241408487f9c12573920045299b?OpenDocument&TableRow=3.1.2%2C3.5#3.1>. (Abrufdatum 30.03.2018)
- Lin H. C., Hülsbergen K.-J. (2017): A new method for analyzing agricultural land-use efficiency, and its application in organic and conventional farming systems in southern Germany. In: *European Journal of Agronomy* Vol. 83, p.15-27
- Lin H. C., Huber J., Gerl G., Hülsbergen K.-J. (2017): Effects of changing farm management and farm structure on energy balance and energy-use efficiency – a case study of organic and conventional farming systems in southern Germany. In: *European Journal of Agronomy* Vol. 82, p. 242-253
- Lin H. C., Huber J., Gerl G., Hülsbergen K.-J. (2016): Nitrogen balances and nitrogen-use efficiency of different organic and conventional farming systems. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol 105, p. 1-23
- Loges R., Ingwersen K., Kaske A., Taube F. (2000): Methodological aspects of determining nitrogen fixation of different forage legumes. In: Alföldi T., Lockeretz W.: *Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference IFOAM 2000 - The World Grows Organic*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 92 S.
- Lynch D.H., Sumner J., Martin R. C. (2014): Framing the Social, Ecological and Economic Goods and Services Derived from Organic Agriculture in the Canadian Context. In: Bellon S., Penvern S. (Hrsg.): *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer Verlag, p. 347- 365
- Lynch D. H., MacRae R., Martin R. C. (2011): The carbon and global warming potential impacts of organic farming: does it have a significant role in an energy constrained world? In: *Sustainability*, Vol. 3, p. 322-362
- Maeder P., Fliessbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U. (2002): Soil fertility and biodiversity in organic farming. In: *Science*, Vol 296, p. 1694-1697
- MAIS - Ministerium für Arbeit, Integration und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (2014): Tarifregister Nordrhein-Westfalen Landwirtschaft. URL: http://www.tarifregister.nrw.de/material/landwirtschaft_westfalen-lippe.pdf (Abrufdatum 21.8.2014)
- Marcato C.-E., Mohtar R., Revel J.-C., Pouech P., Hafidi M., Guisresse M. (2009): Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. In: *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 63, p. 260-266
- Meyer R., Priefer C. (2012): *Ökologischer Landbau und Bioenergieerzeugung - Zielkonflikte und Lösungsansätze*. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, 232 S.
- Michel J., Möller K., Weiske A. (2006a): Auswirkungen der Biogasproduktion auf Umwelteffekte landwirtschaftlicher Betriebe. In: Möller K., Leithold G., Michel J., Schnell S., Stinner W., Weiske A. (Hrsg.): *Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe*, S. 7-25
- Michel J., Weiske A., Kaltschmitt M. (2006b): Ökologische und ökonomische Bilanzierung. In: Möller K., Leithold G., Michel J., Schnell S., Stinner W., Weiske A. (Hrsg.): *Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe*, S. 241-374
- Möller K., Schulz R., Müller T. (2011): Effects of setup of Centralized biogas plants on crop acreage and balances of nutrients and soil humus. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol. 89, p. 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. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol. 82, p. 209–232
- Möller K., Stinner W., Leithold G. (2006a): Biogas im ökologisch wirtschaftenden Pflanzenbau mit Viehhaltung. In: Möller K., Leithold G., Michel J., Schnell S., Stinner W., Weiske A. (Hrsg.): *Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe*, Endbericht, S. 35-121
- Möller K., Stinner W., Leithold G. (2006b): Biogas im ökologisch wirtschaftenden Pflanzenbau ohne Viehhaltung. In: Möller K., Leithold G., Michel J., Schnell S., Stinner W., Weiske A. (Hrsg.): *Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe*, Endbericht, S. 121-167
- Möller K. (2002): Systemwirkungen einer "Biogaswirtschaft" im ökologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf die Spurengasemissionen, Gießen, 14 S.
- Muller A., Aubert C. (2014): The Potential of Organic Agriculture to Mitigate the Influence of Agriculture on Global Warming – A Review. In: Bellon S., Penvern S. (Hrsg.): *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer Verlag, p. 239-259
- Mußhoff O., Hirschauer N. (2016): *Modernes Agrarmanagement - Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren*. 4.Auflage, Vahlen Verlag, München, 610 S.
- Naturland (2016): *Naturland Richtlinien – Erzeugung*, Fassung 5/2016
- Niggli U. (2014): Preface. In: Bellon S., Penvern S. (Hrsg.): *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer Verlag, S. 7-8
- Niggli U., Slabe A., Schmid O., Halberg N. & Schlüter M. (2008): *Technology Platform Organics - Vision Research Agenda to 2025*, 45 S.
- PALISADE (2018): @RISK 5.0 for EXCEL
- Pennings J.M.E., Isengildina-Massa O., Irwin S.H., Garcia P., Good D.L. (2008): Producers` Complex Risk Management Choices. In: *Agribusiness*, Vol. 24, Issue 1, p.31-54
- Petersen S. Regina K. Pöllinger A., Rigler E., Valli L., Yamulki S., Esala M., Fabbri C., Syväsalo E., Vinther F. (2006): Nitrous oxide emissions from organic and conventional crop rotations in five European countries. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 112, p. 200-206
- Ponisio L. C., M'Gonigle L. K., Mace K. C., Palomino J., Valpine de P., Kremen C. (2015): Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. In: *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 282, Issue 1799
- Precht M., Kraft R., M. Bachmaier (2005): *Angewandte Statistik 1*, Oldenbourg Verlag, 7. Auflage, München, 361 S.
- Råberg T., Carlsson G., Jensen E. S. (2014): Management of biomass resources within the crop rotation for eco-functional intensification on stockless organic farms. In: Rahmann G., Aksoy U. (Eds.): *Building Organic Bridges*, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Germany, 4, Thuenen Report, Vol. 20, p. 1011-1014
- Ragauskas A. J., Williams C. K., Davison B. H., Britovsek G., Cairney J., Eckert C. A., Frederick W. J., Hallett J. P., Leak D. J., Liotta C. L., Mielenz J. R., Murphy R., Templer R, Tschaplinski T. (2006): The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. In: *Science*, Vol. 311, p. 484-489
- Rauh S., Berenz S., Heißenhuber A. (2007): Abschätzung des unternehmerischen Risikos beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode. In: *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.* Band 43, S. 507-516

- Reents H. J., Simon A., Levin K., Kimmelman S., Brandhuber R., Beck R. (2018): Wirkungen von Biogassystemen auf Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Produktqualität unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus. Projektbericht, 112 S.
- Reents H. J., Kimmelman S., Kainz M., Hülsbergen K. J. (2011): Biogas-Fruchtfolge Viehhausen – Versuchsanlage sowie Ertrags- und Qualitätseffekte bei Winterweizen. In: Leithold G., Becker K., Brock C., Fischinger S., Spiegel A.-K., Spory K., Wilbois K.-P., Williges, U. (Hrsg.): Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis, Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Justus-Liebig-Universität Gießen, 15.-18. März 2011, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 76-80
- Reinhold G. (2007): Auswirkungen der Biogaserzeugung auf den gesamten Betrieb. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Biogaserzeugung im ökologischen Landbau, KTBL-Heft 65, Darmstadt, S. 36-39
- Riessen C. (2010): Modellgestützte Risikoanalysen einer Biogasanlageninvestition als Grundlage einer ganzheitlichen Risikobetrachtung und des strategischen Risikomanagements. Dissertation, Rostock, S. 226
- Righaletto R., Spracklen D.V. (2007): Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests. In Science, Vol. 317, p. 902
- Schindel V. (1977): Risikoanalyse - Darstellung und Bewertung von Risikorechnungen am Beispiel von Investitionsentscheidungen. Verlag V. Florentz, München, 313 S.
- Schlesinger M., Lindenberger D., Lutz C., Hofer P., Kemmler A., Kirchner A., Koziel S., Ley A., Piégsa A., Seefeldt F., Straßburg S., Weinert K., Knaut A., Malischek R., Nick S., Panke T., Paulus S., Tode C., Wagner J., Lehr U., Ulrich P. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Endbericht, Projekt Nr. 57/12 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 553 S.
- Schmidt H. (2004): Viehloser Öko-Ackerbau: Beiträge, Beispiele, Kommentare. Köster Verlag, Berlin, 212 S.
- Schneider R., Salzeder G., Schmidt M., Wiesinger K., Urbatzka P. (2013): Einfluss verschiedener Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser Systeme auf Ertrag und Produktivität: Ergebnisse eines Dauerfeldversuches. In: Neuhoff D., Stumm C., Ziegler S., Rahmann G., Hamm U., Köpke U. (Hrsg.): Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 54-57
- Schneider R., Heiles E., Salzeder G., Wiesinger K., Schmidt M., Urbatzka P. (2012): Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolgen im ökologischen Landbau auf den Ertrag und die Produktivität. In: Wiesinger K., Cais K. (Hrsg.): Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, Tagungsband - Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Nr. 4/2012, S. 87-93
- Schulz F., Brock C., Leithold G. (2013): Viehhaltung im Ökologischen Landbau - ja oder nein? Effekte auf Bodenfruchtbarkeit, N-Bilanzen und Erträge. In: Neuhoff D., Stumm C., Ziegler S., Rahmann G., Hamm U., Köpke U. (Hrsg.): Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 20-23
- Seufert V., Ramankutty N., Foley J. A. (2012): Comparing the yields of organic and conventional agriculture. In: Nature, Vol. 485, p. 229–232
- Siegmeier T., Blumenstein B., Möller D. (2013): Biogas und Ökologische Landwirtschaft: Strukturen, Substrate, Wirtschaftlichkeit - Ergebnisse des BioBiogas-Monitorings 2011, Arbeitsbericht aus dem Fachgebiet Betriebswirtschaft, Ökologische Agrarwissenschaften, Uni Kassel Witzenhausen, 12 S.
- Spatz A., Kissel R., Effenberger M. (2011): Bauliche und technische Konzepte für die Biogasanlagen. In: Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung, Machbarkeitsstudie, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Nr. 4/2011, S. 66-99
- Steinhauser H., Langbehn C., Peters U. (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre Band 1, 5. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart, 339 S.

- Steinhauser H. (1963): Beiträge zur Quantifizierung innerbetrieblicher Werte im landwirtschaftlichen Betrieb Teil II. In: Berichte über Landwirtschaft Heft 4, Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin, S. 693-740
- Stinner W. (2009): Auswirkungen der Biogaserzeugung in einem ökologischen Marktfruchtbetrieb auf Ertragsbildung und Umweltparameter. Dissertation am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen, 204 S.
- Stinner W., Möller K., Leithold G. (2008): Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *European Journal of Agronomy*, Vol. 29, p 125–134
- Stinner W., Möller K., Leithold G. (2005): Biogaserzeugung im viehlosen Betrieb: Effekte auf Stickstoffmanagement, Erträge und Qualität. In: Heß J. und Rahmann G. (Hrsg.): Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, kassel university press GmbH, Kassel, S. 185-188
- Stinner W., Möller K., Leithold G. (2003): Auswirkungen der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im ökologischen Landbau bei viehloser Wirtschaftsweise. In: Freyer, Bernhard (Hrsg.): Beiträge zur 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau "Ökologischer Landbau der Zukunft" 24.-26. Februar 2003 in Wien, Institut für ökologischen Landbau (iföl), Universität für Bodenkultur (Boku), Wien, S. 523-524
- StMELF - Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2017): Förderung. URL: <http://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/index.php> (Abrufdatum, 19.9.2017)
- Taramarcas J., Clere M. (2013): Viehloser Bio-Ackerbau: Resultate aus zwölf Beobachtungsjahren des Versuchsbetriebs Mapraz. In: *Agrarforschung Schweiz*, Heft 3, S. 124-131
- Teil G. (2014): Is organic farming unsustainable? Analysis of the debate about the conventionalization of the organic label. In: Bellon S., Penvern S. (Hrsg.): *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer Verlag, S. 325-344
- Tersbøl M., Malm L. (2014): Financial Performance of Organic Biogas Production. *SUSTAININGAS Report D3.1*, 30 S.
- Tilman D., Socolow R., Foley J. A., Hill J., Larson E., Lynd L., Pacala S., Reilly J., Searchinger T., Somerville C., Williams R. (2009): Beneficial Biofuels - The Food, Energy, and Environment Trilemma. In: *Science*, Vol. 325, p. 270-271
- Tilman D., Hill J., Lehmann C. (2006): Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. In: *Science*, Vol. 314, p. 1598-1600
- Tuomisto, H.L; Hodge, I.D; Riordan, P.; Macdonald, D.W (2012): Comparing energy balances, greenhouse gas balances and biodiversity impacts of contrasting farming systems with alternative land uses. In: *Agricultural Systems*, Vol. 108, p. 42–49
- Vockinger F (2013): Analyse der Flächenentwicklung, Anbaustrukturen und Fruchtfolgen ökologisch bewirtschafteter Ackerflächen Bayerns auf der Basis agrarstruktureller Daten. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Technische Universität München
- Wank S., Keymer U. (2011): Betriebswirtschaftliche Bewertung. In: *Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung – Machbarkeitsstudie; LfL-Schriftenreihe 4/2011; S. 137-170*
- WBA - Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (2016): Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung, Gutachten, Berlin, 410 S.
- Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B. (1991): *Biogas Handbuch*. Wirz-Verlag, Aarau, Schweiz, 200 S.

Wendland M., Lichti F. (2012): Biogasgärreste- Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Biogas Forum Bayern, Nr. 1 – 3/2012, 14 S.

Wieseler F., Hund-Rinke K. Gäth S., Goerge E., Greef J. M., Hölzle L. E., Holz F., Hülsbergen K.-J., Pfeil R., Severin K., Frede H.-G., Blum B., Schenkel H., Horst W., Dittert K., Ebertseder T., Osterburg B. Philipp W. Pietsch M. (2016): Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft. In: Berichte über Landwirtschaft, Band 94, Ausgabe, S. 1-25

Zander K., Plagge J., Strohm-Lömpcke R. (2008): Diversifizierung, Spezialisierung, Kooperation im ökologischen Landbau: Konzepte und Strategien zur Verbesserung des Betriebsmanagements und der Arbeitsorganisation. Braunschweig und Augsburg, 105 S.

Zengel Martina (2015): Verpflichtungserklärung - Gärrestabnahme von Bio-Betrieben aus Biogasanlagen mit konventionellen Gärsubstraten. Biogas Forum Bayern, Nr. 1 - 17/2015

10. Anhang

Tabelle A 1: Arbeitsverfahren für Luzerne-Klee gras (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
01.08.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
01.08.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
17.08.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.08.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (LKG 55): 30 kg/ha
18.05.2012	Mähen (1. Schnitt)	Schlepper 67 kW + Rotationsmäherwerk	
20.05.2012	Wenden	Schlepper 67 kW + Kreiselzettwender	
22.05.2012	Schwaden	Schlepper 67 kW + Kreiselschwader	
22.05.2012	Futterbergung ^{b)}	Schlepper 83 kW + Ladewagen	
22.05.2012	Festfahren ^{b)}	Radlader 205 kW	
22.06.2012	Mähen (2. Schnitt)	Schlepper 67 kW + Rotationsmäherwerk	
24.06.2012	Wenden	Schlepper 67 kW + Kreiselzettwender	
26.06.2012	Schwaden	Schlepper 67 kW + Kreiselschwader	
26.06.2012	Futterbergung ^{b)}	Schlepper 83 kW + Ladewagen	
26.06.2012	Festfahren ^{a)}	Radlader 205 kW	
11.07.2012	Schwefel Düngung	Schlepper 67 kW + Anhängeschleuderstreuer	Kieserit: 100 kg/ha
30.07.2012	Mähen (3. Schnitt)	Schlepper 67 kW + Rotationsmäherwerk	
01.08.2012	Wenden	Schlepper 67 kW + Kreiselzettwender	
03.08.2012	Schwaden	Schlepper 67 kW + Kreiselschwader	
03.08.2012	Futterbergung ^{b)}	Schlepper 83 kW + Ladewagen	
03.08.2012	Festfahren ^v	Radlader 205 kW	
26.09.2012	Mähen (4. Schnitt)	Schlepper 67 kW + Rotationsmäherwerk	
28.09.2012	Wenden	Schlepper 67 kW + Kreiselzettwender	
30.09.2012	Schwaden	Schlepper 67 kW + Kreiselschwader	
30.09.2012	Futterbergung ^{b)}	Schlepper 83 kW + Ladewagen	
30.09.2012	Festfahren ^{b)}	Radlader 205 kW	

Erläuterung: ^{a)} Stoppelbearbeitung erfolgte im Versuch als ein Arbeitsgang (Fräsen), ^{b)} Futterbergung erfolgte im Versuch als Ballen

Tabelle A 2: Arbeitsverfahren für Luzerne-Kleegras (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtssystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
01.08.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
01.08.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
17.08.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.08.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (LKG 55): 30 kg/ha
18.05.2012	Mulchen	Schlepper 67 kW + Mulcher	
22.06.2012	Mulchen	Schlepper 67 kW + Mulcher	
11.07.2012	Schwefel Düngung	Schlepper 67 kW + Anhängeschleuderstreuer	Kieserit: 100 kg/ha
30.07.2012	Mulchen	Schlepper 67 kW + Mulcher	
26.09.2012	Mulchen	Schlepper 67 kW + Mulcher	

Erläuterung: ^{a)} Stoppelbearbeitung erfolgte im Versuch als ein Arbeitsgang (Fräsen)

Tabelle A 3: Arbeitsverfahren für Winterweizen (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
15.10.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
15.10.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
15.10.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.10.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Stava): 150 kg/ha
22.03.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
26.03.2012	Gärrestdüngung	Schlepper 83 kW + Pumptankwagen mit Schleppschauchverteiler	Gärrest: 20 m ³ /ha
25.04.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
02.08.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
02.08.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Erläuterung: ^{a)} Luzerne-Kleegras-Umbruch erfolgte im Versuch als ein Arbeitsgang (Fräsen)

Tabelle A 4: Arbeitsverfahren für Winterweizen (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtssystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
15.10.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
15.10.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
15.10.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.10.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Stava): 150 kg/ha
22.03.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
25.04.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
02.08.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
02.08.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Erläuterung: ^{a)} Luzerne-Kleegrass-Umbruch erfolgte im Versuch als ein Arbeitsgang (Fräsen)

Tabelle A 5: Arbeitsverfahren für Wintertriticale (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
01.08.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
26.08.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
27.09.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.10.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut: 171 kg/ha
26.03.2012	Gärrestdüngung	Schlepper 83 kW + Pumptankwagen mit Schleppschauchverteiler	Gärrest: 26 m ³ /ha
27.07.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
27.07.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	
28.07.2012	Strohaufbereitung und -bergung	Schlepper 67 kW + Kreiselzettwender / 2-Kreiselschwader-Mittenschwader / Rundballenpresse	
28.07.2012	Strohballentransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 6: Arbeitsverfahren für Wintertriticale (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtssystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
01.08.2011	Grubbern flach ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
26.08.2011	Grubbern tief ^{a)}	Schlepper 83 kW + Grubber	
27.09.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
18.10.2011	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut: 171 kg/ha
27.07.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
27.07.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 7: Arbeitsverfahren für Zwischenfrucht und Ackerbohne (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
13.08.2011	Grubbern flach	Schlepper 83 kW + Grubber	
13.08.2011	Grubbern tief	Schlepper 83 kW + Grubber	
14.09.2011	Säen (Zwischenfrucht)	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut: 63,5 kg/ha
21.10.2011	Mulchen (Zwischenfrucht)	Schlepper 67 kW + Mulcher	
24.10.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
23.03.2012	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Fuego): 290 kg/ha
29.03.2012	Blindstriegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
26.04.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
03.05.2012	Hacken	Schlepper 67 kW + Hackgerät	
10.05.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
19.05.2012	Hacken	Schlepper 67 kW + Hackgerät	
13.08.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
13.08.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 8: Arbeitsverfahren für Zwischenfrucht und Ackerbohne (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtssystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
13.08.2011	Grubbern flach	Schlepper 83 kW + Grubber	
13.08.2011	Grubbern tief	Schlepper 83 kW + Grubber	
14.09.2011	Säen (Zwischenfrucht)	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut: 63,5 kg/ha
21.10.2011	Mulchen (Zwischenfrucht)	Schlepper 67 kW + Mulcher	
24.10.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
23.03.2012	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Fuego): 290 kg/ha
29.03.2012	Blindstriegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
26.04.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
03.05.2012	Hacken	Schlepper 67 kW + Hackgerät	
10.05.2012	Striegeln	Schlepper 67 kW + Striegel	
19.05.2012	Hacken	Schlepper 67 kW + Hackgerät	
13.08.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
13.08.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 9: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Systemversuch Viehhausen, Biogassystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
26.08.2011	Grubbern flach	Schlepper 83 kW + Grubber	
13.09.2011	Grubbern tief	Schlepper 83 kW + Grubber	
27.09.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
29.09.2012	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Pal-lazo): 104 kg/ha
23.03.2012	Gärrestdüngung	Schlepper 83 kW + Pumptankwagen mit Schleppschauchverteiler	Gärrest: 26 m ³ /ha
27.07.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
27.07.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 10: Arbeitsverfahren für Winterroggen (Systemversuch Viehhausen, Marktfruchtsystem, Untersuchungsjahr 2011/12)

Datum	Arbeitsverfahren	Maschinen	Betriebsmittel
26.08.2011	Grubbern flach	Schlepper 83 kW + Grubber	
13.09.2011	Grubbern tief	Schlepper 83 kW + Grubber	
27.09.2011	Pflügen	Schlepper 83 kW + Anbaudrehpflug mit Packer	
29.09.2012	Säen	Schlepper 83 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination	Saatgut (Pal-lazo): 104 kg/ha
27.07.2012	Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW	
27.07.2012	Körnertransport	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug	

Tabelle A 11: Arbeitsverfahren für Winterweizen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug
Strohbergung ^{b)}	Schlepper 102 kW + Quaderballenpresse
Transport des Nebenproduktes ^{b)}	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger; Frontlader

Erläuterung: ^{a)} Abhängig vom individuellen Schlag wurde zweimal oder dreimal mit Gärrest gedüngt, ^{b)} Das Stroh wurde vereinzelt von den Schlägen abgefahren.

Tabelle A 12: Arbeitsverfahren für Winterroggen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug

Erläuterung: ^{a)} Abhängig vom individuellen Schlag wurde nicht bzw. einmal mit Gärrest gedüngt.

Tabelle A 13: Arbeitsverfahren für Wintertriticale in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug
Strohbergung ^{b)}	Schlepper 102 kW + Quaderballenpresse
Transport des Nebenproduktes ^{b)}	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger; Frontlader

Erläuterung: ^{a)} Abhängig vom individuellen Schlag wurde zweimal oder dreimal mit Gärrest gedüngt, ^{b)} Das Stroh wurde vereinzelt von den Schlägen abgefahren.

Tabelle A 14: Arbeitsverfahren für Dinkel in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug
Strohbergung	Schlepper 102 kW + Quaderballenpresse
Transport des Nebenproduktes	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger; Frontlader

Erläuterung: ^{a)} Abhängig vom individuellen Schlag wurde einmal oder zweimal mit Gärrest gedüngt. Als zweite Düngung wurde auf einem Schlag die feste Phase des Gärrestes ausgebracht.

Tabelle A 15: Arbeitsverfahren für Wintergerste in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug
Strohbergung	Schlepper 102 kW + Quaderballenpresse
Transport des Nebenproduktes	Schlepper 67 kW + Dreiseitenkippanhänger; Frontlader

Erläuterung: ^{a)} Abhängig vom individuellen Schlag wurde zweimal oder dreimal mit Gärrest gedüngt.

Tabelle A 16: Arbeitsverfahren für Hafer in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Festmist / fester Gärrest) ^{a)}	Schlepper 67 kW + Streuer
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug

Erläuterung: ^{a)} Fester organischer Dünger wurde nur auf einzelnen Schlägen ausgebracht.

Tabelle A 17: Arbeitsverfahren für Sommergerste in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug

Tabelle A 18: Arbeitsverfahren für Erbsen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest) ^{a)}	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschauch
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Eggen	Schlepper 160 kW + Federzinkenegge
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Festmist / fester Gärrest)	Schlepper 67 kW + Streuer
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug

Erläuterung: ^{a)} Flüssiger Gärrest wurde nur auf einzelnen Schlägen ausgebracht.

Tabelle A 19: Arbeitsverfahren für Ackerbohnen in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Pflügen	Schlepper 160 kW + Anbaudrehpflug
Eggen	Schlepper 160 kW + Federzinkenegge
Organische Düngung (Festmist / fester Gärrest)	Schlepper 67 kW + Streuer
Hacken	Schlepper 67 kW + Hackmaschine
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Hacken	Schlepper 67 kW + Hackmaschine
Striegeln	Schlepper 83 kW + Striegel
Mähdrusch	Mähdrescher 200 kW
Körnertransport	Schlepper 83 kW + Dreiseitenkippanhänger-Doppelzug

Tabelle A 20: Arbeitsverfahren für Klee gras in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Mineraldüngung	Schlepper 83 kW + Anbauschleuderstreuer
Mähen (1. Schnitt)	Schlepper 160 kW + Mähauflbereiter (Front-Heck-Kombination)
Schwaden	Schlepper 83 kW + Kreiselschwader
Futterbergung	Feldhäcksler 400 kW Selbstfahrer + Schlepper 140 kW + Häckselgutwagen
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Mähen (2. Schnitt)	Schlepper 160 kW + Mähauflbereiter (Front-Heck-Kombination)
Schwaden	Schlepper 83 kW + Kreiselschwader
Futterbergung	Feldhäcksler 400 kW Selbstfahrer + Schlepper 140 kW + Häckselgutwagen
Mähen (3. Schnitt)	Schlepper 160 kW + Mähauflbereiter (Front-Heck-Kombination)
Schwaden	Schlepper 83 kW + Kreiselschwader
Futterbergung	Feldhäcksler 400 kW Selbstfahrer + Schlepper 140 kW + Häckselgutwagen
Mähen (4. Schnitt)	Schlepper 160 kW + Mähauflbereiter (Front-Heck-Kombination)
Schwaden	Schlepper 83 kW + Kreiselschwader
Futterbergung	Feldhäcksler 400 kW Selbstfahrer + Schlepper 140 kW + Häckselgutwagen

Tabelle A 21: Arbeitsverfahren für Ganzpflanzensilage in Phase 2 (Ökologischer Marktfruchtbetrieb mit Biogasanlage)

Arbeitsverfahren	Maschinen
Organische Düngung (Gärrest)	Schlepper 200 kW + Pumptankwagen, Schleppschlauch
Stoppelgrubbern	Schlepper 140 kW + Grubber
Säen	Schlepper 160 kW + Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination
Mähen	Schlepper 160 kW + Mähauflbereiter (Front-Heck-Kombination)
Schwaden	Schlepper 83 kW + Kreiselschwader
Futterbergung	Feldhäcksler 400 kW Selbstfahrer + Schlepper 140 kW + Häckselgutwagen

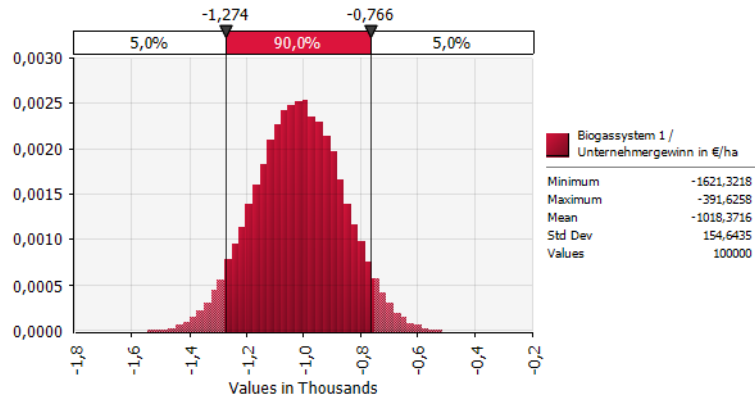


Abbildung A 1: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 1

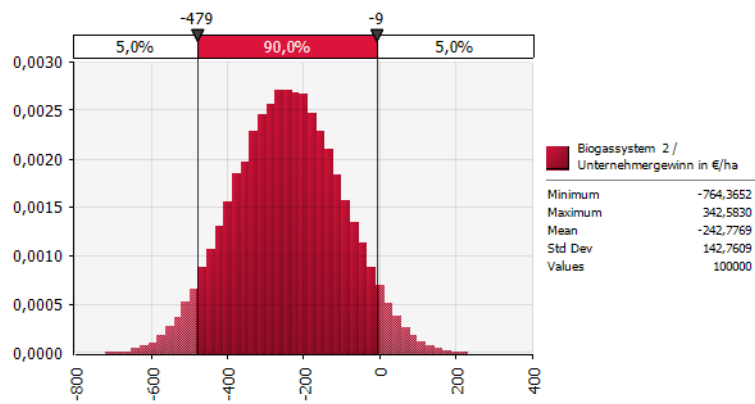


Abbildung A 2: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 2

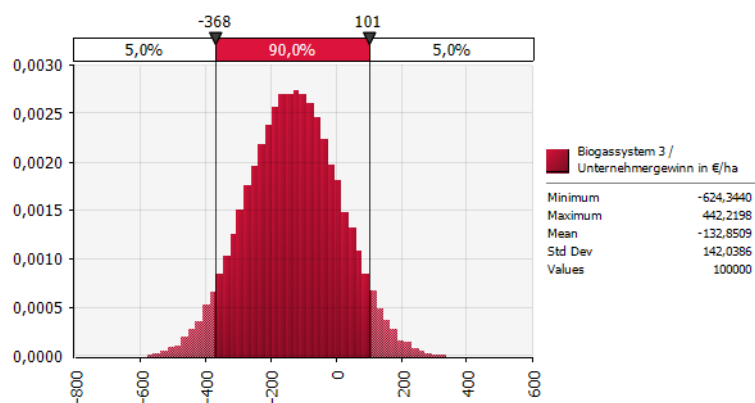


Abbildung A 3: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 3

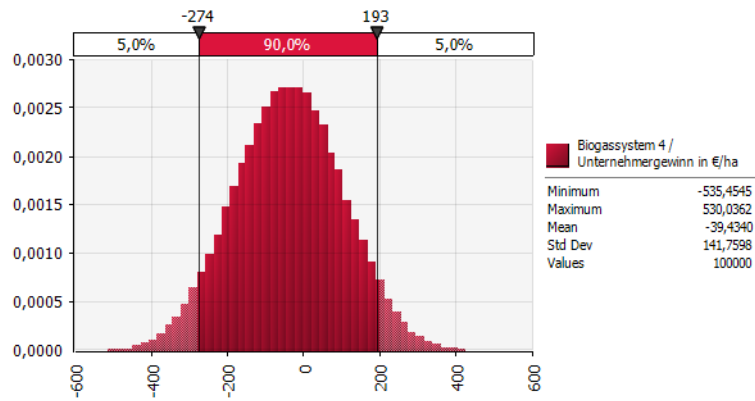


Abbildung A 4: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 4

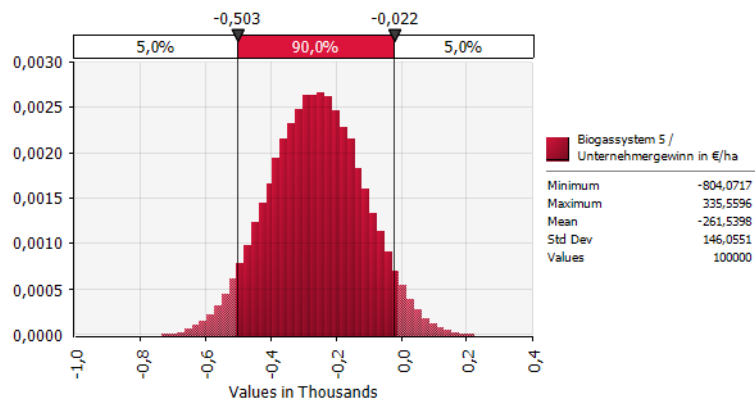


Abbildung A 5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 5

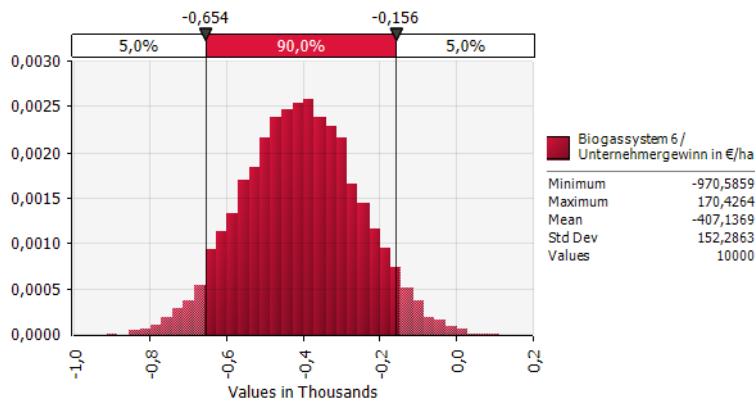


Abbildung A 6: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 6

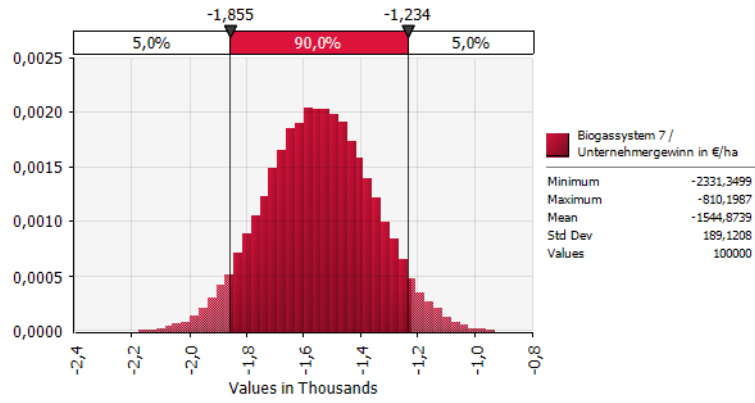


Abbildung A 7: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 7

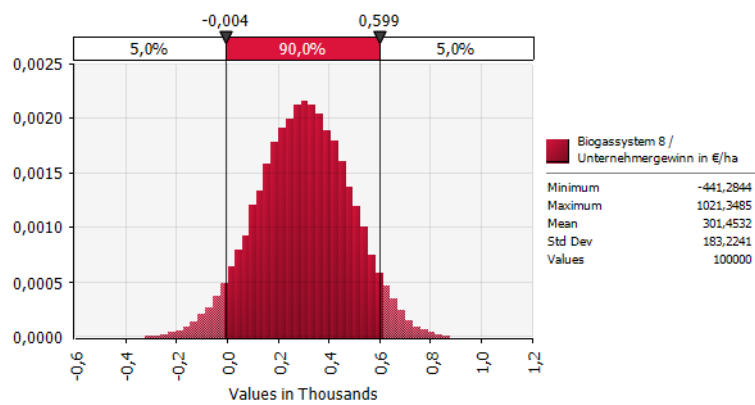


Abbildung A 8: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 8

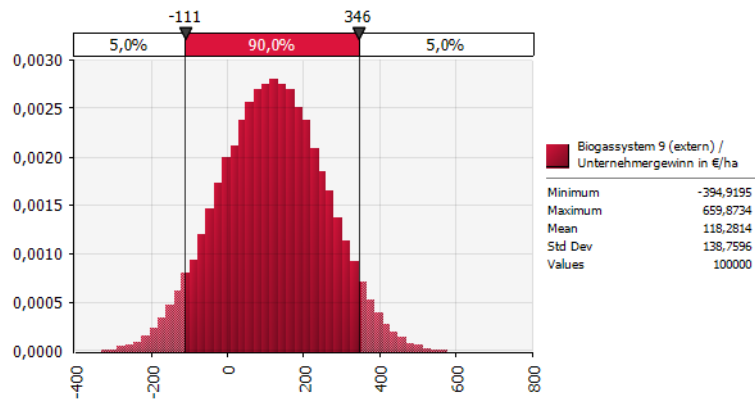


Abbildung A 9: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unternehmergewinne in € ha⁻¹ des Biogassystems 9 (extern)

Danksagung

Zum Abschluss meiner Promotion danke ich all denen ganz herzlich, die zum Gelingen beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen für die Überlassung dieses spannenden Themas und die Betreuung der Arbeit mit wertvollen fachlichen Hinweisen und Diskussionen.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Bodmer danke ich für die Betreuung der Arbeit, vor allem in Bezug auf ökonomische Fragestellungen, sowie für die Übernahme des Zweitgutachters.

Prof. Dr. Vera Bitsch danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. Peter Zerle bedanken, der meine Arbeit in der Anfangsphase betreut hat.

Für die Zusammenarbeit und Datenbereitstellung möchte ich mich bei dem Betriebsleiter bedanken. Durch diese Unterstützung konnte ich in meiner Promotion den Forschungsansatz einer betrieblichen Fallstudie unter Praxisbedingungen verfolgen.

Mein abschließender Dank gilt meiner gesamten Familie.

Augsburg, den 24.09.2019