

Becker, Jasmin

**Working Paper**

## Unterschiede effizienter Biogaserzeugung - wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale

Thünen Working Paper, No. 33

**Provided in Cooperation with:**

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

*Suggested Citation:* Becker, Jasmin (2014) : Unterschiede effizienter Biogaserzeugung - wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale, Thünen Working Paper, No. 33, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:253-201411-dn054256-8>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/108515>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# **Unterschiede effizienter Biogaserzeugung - wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale**

Jasmin Becker

Thünen Working Paper 33

Jasmin Becker  
Thünen-Institut für Marktanalyse  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Telefon: +49 (0) 531 - 596 5337  
Fax: +49 (0) 531 - 596 5399  
E-Mail: [jasmin.becker@ti.bund.de](mailto:jasmin.becker@ti.bund.de)

Jasmin Becker

**Thünen Working Paper 33**

Braunschweig/Germany, Oktober 2014

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Politische Rahmenbedingungen zum Klimaschutz</b>	<b>3</b>
2.1	Europäische Union	3
2.2	Deutschland	5
2.2.1	Biomasseverordnung (Biomasse V)	7
2.2.2	Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG): Vergütung Biogas	9
<b>3</b>	<b>Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland</b>	<b>16</b>
3.1	Bedeutung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas im Rahmen der Bioenergieerzeugung	16
3.2	Entwicklung der Anlagenzahl und installierten Leistungen	17
3.3	Regionaler Vergleich der Biogaserzeugung	19
<b>4</b>	<b>Technologie und Verfahren der Biogaserzeugung</b>	<b>21</b>
4.1	Anlagentechnik und verfahrenstechnischer Prozess der Biogaserzeugung	22
4.1.1	Ablaufprozess Biogasproduktion	22
4.1.2	Verfahrenstechnik im BHKW	24
4.1.3	Anlagenkonzepte und Verfahrensmerkmale	25
4.2	Bekannte Schwachstellen des Prozesses	27
4.3	Substrateinsatz	28
<b>5</b>	<b>Methode und empirisches Material</b>	<b>31</b>
5.1	Strukturprüfende Verfahren zur Mittelwertdifferenz	31
5.1.1	T-Test unabhängiger Stichproben	31
5.1.2	Einfaktorielle Varianzanalyse	33
5.2	Datengrundlage	37

<b>6</b>	<b>Deskriptive Betrachtung der Daten</b>	<b>39</b>
6.1	Regionale Verteilung der Anlagen des Datensatzes	39
6.2	Eingespeistes Substrat	40
6.2.1	Pflanzliche Substrate	40
6.2.2	Tierisches Substrate	41
6.3	Parameter effizienter Biogaserzeugung	43
6.3.1	Hydraulische Verweilzeit	43
6.3.2	Volllaststunden	44
<b>7</b>	<b>Empirische Analyse: Unterschiede der Effizienz der Stromerzeugung aus Biogas</b>	<b>44</b>
7.1	Hypothesen	44
7.2	Regionale Unterschiede der Substrateinspeisung	46
7.2.1	Untersuchungsdesign	46
7.2.2	Ergebnisauswertung und Interpretation	47
7.3	Unterschiede der Biogasproduktion zwischen Anlagenstrukturen	49
7.3.1	Substrateinspeisung	50
7.3.2	Volllaststunden	66
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>76</b>
	<b>Anhang</b>	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Energiegewinnung aus Biomasse in Deutschland 2012	17
Abbildung 2:	Entwicklung der Biogasanlagenzahl und der installierten elektrischen Leistung [MW] in Deutschland	18
Abbildung 3:	Anlagenzahl der Biogasanlagen auf Landkreisebene in Deutschland, Stand 2012	19
Abbildung 4:	Massebezogener Substrateinsatz in Biogasanlagen	29
Abbildung 5:	Verteilung der Anlagen über die Bundesländer	39
Abbildung 6:	Prozentualer Anteil der Biogasanlagen mit Verwendung von pflanzlichen Substraten	41
Abbildung 7:	Prozentualer Anteil der Biogasanlagen mit Verwendung von tierischen Substraten	42
Abbildung 8:	Unterschiede des tierischen Substratanteils zwischen den Agrarregionen	47
Abbildung 9:	Verteilung der Anlagen nach installierter elektrischer Nennleistung	50
Abbildung 10:	Verteilung pflanzlicher und tierischer Substrate	51
Abbildung 11:	Unterschiede im Substratanteil Rindergülle zwischen den Leistungsklassen	52
Abbildung 12:	Histogramm Rindergülle	54
Abbildung 13:	Substratanteile zwischen den Leistungsklassen	57
Abbildung 14:	Unterschiede in der Verweilzeit zwischen den Leistungsklassen	62
Abbildung 15:	Unterschiede in der mittleren Anzahl der Volllaststunden zwischen den Leistungsklassen	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mengenmäßige Ziele der Energiepolitik in Europa und Deutschland	6
Tabelle 2:	Vergütungsbestandteile im Zeitverlauf für Strom aus Biomasse (in ct/kWh)	10
Tabelle 3:	Richtwerte der Gasausbeute	30
Tabelle 4:	Einfaktorielle Varianzanalyse: Aufteilung der Gesamtabweichung	35
Tabelle 5:	Betrachtung der doppelten Fälle in den Erhebungsjahren	38
Tabelle 6:	Test auf Normalverteilung: Geflügelmist	48
Tabelle 7:	T-Test unabhängiger Stichproben: Tierische Substrate	49
Tabelle 8:	Test auf Normalverteilung: Rindergülle	53
Tabelle 9:	Levene-Test: Rindergülle	54
Tabelle 10:	Einfaktorielle Varianzanalyse: Rindergülle	55
Tabelle 11:	Post-Hoc-Test Tamhane: Rindergülle (Ausschnitt)	56
Tabelle 12:	Levene-Test: Maissilage	58
Tabelle 13:	infaktorielle Varianzanalyse Maissilage	58
Tabelle 14:	Post-Hoc-Test Scheffé: Maissilage (Ausschnitt)	59
Tabelle 15:	Test auf Normalverteilung: Verweilzeit	62
Tabelle 16:	Levene-Test: Verweilzeit	63
Tabelle 17:	Einfaktorielle Varianzanalyse: Verweilzeit	63
Tabelle 18:	Post-Hoc-Test Scheffé: Verweilzeit	64
Tabelle 19:	Test auf Normalverteilung: Volllaststunden	67
Tabelle 20:	Levene-Test: Volllaststunden	68
Tabelle 21:	Einfaktorielle Varianzanalyse: Volllaststunden	68
Tabelle 22:	Post-Hoc-Test Tamhane: Volllaststunden	69

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BiomasseV	Biomasseverordnung
d	Tag
Deg.	Degression
EEG	Erneuerbares-Energie-Gesetz
EU	Europäische Union
EVK	Einsatzstoffvergütungsklasse
FM	Frischmasse
GPS	Ganzpflanzen-Silage
h	Stunde
kW <sub>el</sub>	elektrische Leistung in Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LF	landwirtschaftliche Nutzfläche
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MW <sub>el</sub>	elektrische Leistung in Megawatt
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
NI	Normliter
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ORC	Organic-Rankine-Cycle
THG	Treibhausgas
TM/oTM	Trockenmasse/organische Trockenmasse
TWh	Tera-Wattstunde



## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Die Erzeugung erneuerbarer Energien ist weltweit stetig gewachsen (BMU, 2013). Im internationalen Vergleich erlebte Deutschland in den letzten Jahren eine ausgeprägte Boomphase (Bode, 2010, S. 643 ff.). Bereits im Jahr 2007 erbrachte Deutschland die vom Rat der Europäischen Union für 2010 zu erreichenden Ziele, die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien zu steigern. Da Deutschland bestrebt ist, eine Vorreiterrolle im internationalen Klimaschutz einzunehmen, wurden auf nationaler Ebene energiepolitische Ziele für 2020 festgelegt: Die Treibhausgas (THG) - Emissionen um mind. 40 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren, den Hauptanteil der Energieversorgung durch erneuerbare Energien zu sichern und dadurch einen Anteil von mind. 35 % am Bruttostromverbrauch zu erreichen. Zusätzlich wird beabsichtigt, den Primärenergieverbrauch um 20 % gegenüber 2008 zu senken. Womit die Steigerung der Energieeffizienz in allen Wirtschaftsbereichen verfolgt wird. Die Umsetzung der Ziele wird durch das Leitinstrument dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt (BMELV, 2010, BMWi, 2013).

Unter den erneuerbaren Energien ist Energie aus Biomasse mit etwa zwei Drittel am stärksten vertreten. Die flexible Nutzbarkeit im Bereich Strom, Wärme und Kraftstoffe und die relativ einfache Speicherung machen Bioenergie zu einer vielfältigen und bedeutsamen nachhaltigen Energiequelle. In der Stromproduktion aus Biomasse ist Biogas mit über 50 % stark vertreten. Die Erzeugung von Biogas unterliegt keinen witterungsbedingten Schwankungen. Folglich besitzt Biogas das Potenzial, langfristig zur Absicherung der grundlastfähigen Stromversorgung genutzt zu werden (FNR, 2013, S. 4 f.).

Ein kontroverses Konfliktthema ist die für diese Energiequelle benötigte Ackerbaufläche. Flächenkonkurrenz zwischen Bioenergie- und Nahrungsmittelerzeugnissen und potenzielle ökologische negative Umwelteffekte durch steigenden Maisanbau werden in die Debatte mit einbezogen (Leopoldina, 2012, S. 3 ff.)

Innerhalb der OECD ist Deutschland mit einem Anteil von 37 % der größte Biogasproduzent (IEA, 2013, S. 17 ff.). In Deutschland existieren regionale Unterschiede im Biogasanlagenbestand, bezogen auf die Anlagenzahl und die installierte elektrische Leistung. Im Süden Deutschlands sind kleinere bis mittlere Anlagenleistungen ( $< 350 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) zu finden. Wohingegen im Norden und Osten höhere mittlere Anlagenleistungen ( $> 500 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) zu verzeichnen sind (DBFZ, 2012, S. 35). Die wirtschaftliche Hochphase für Biogasanlagenbetreiber erfolgte mit der Einführung der EEG Novellierung 2009. Wonach erstmalig kleinere Anlagen auf Güllebasis bis zu einer installierten elektrischen Leistung von  $500 \text{ kW}_{\text{el}}$  gefördert wurden und ein starker Anlagenzubau erfolgte. Mit der dritten Novellierung 2012 wurde die Vergütungshöhe der Boni gesenkt und eine Förderung nur für sehr kleine Anlagen bis  $75 \text{ kW}_{\text{el}}$  eingeführt. Folglich war ein starker Rückgang im Anlagenbau zu beobachten, der bis zum heutigen Zeitpunkt andauert (FvB, 2013, S. 1 ff.).

In der Stromerzeugung aus Biogas hat Deutschland im letzten Jahrzehnt ein starkes Wachstum erfahren. Jedoch wird weiteres Wachstum benötigt, um die Energieziele zu erreichen. Durch den Rückgang im Biogasanlagenbau wird der Ausbau einer flexiblen und bedarfsorientierten Biogasproduktion gehemmt, die für eine steuerbare Stromproduktion benötigt wird (DIPBT, 2012, S. 4).

## 1.2 Zielsetzung

Vor dem genannten Hintergrund ist demnach die Stromerzeugung der bestehenden Biogasanlagen für eine mögliche grundlastfähige Stromversorgung in Deutschland umso relevanter. Bedeutsam ist hierbei, dass die Stromerzeugung effizient erfolgt. Kosten können gesenkt werden, wenn die Nutzung der eingespeisten Substrate optimiert wird und die Biogasanlage ausgelastet ist, da jede ins Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde nach dem EEG vergütet wird. Die Vergütungshöhe ist abhängig von der Anlagengröße und dem Substrateinsatz.

Ausgehend von diesen Kenntnissen ist das Ziel dieser Arbeit, Antworten auf folgende Fragestellungen zu liefern:

- Welche regionalen, wirtschaftlichen und technischen Faktoren beeinflussen die effiziente Stromerzeugung aus Biogas?
- Ergeben sich hierdurch Effizienzunterschiede in der Biogaserzeugung und wenn diese vorliegen, wie können sie begründet werden?
- Wo gibt es wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale?

In dieser Arbeit soll anhand von Einflussfaktoren die Biogaserzeugung analysiert werden. Demnach wird als Methodik die Varianzanalyse gewählt.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen empirischen Teil. Zunächst werden die politischen Rahmenbedingungen zum Klimaschutz auf europäischer und nationaler Ebene vorgestellt. Um einen genauen Einblick darüber zu gewinnen, welche Veränderungen im EEG vom erstmaligen In-Kraft-Treten bis zum jetzigen Zeitpunkt erfolgten, werden die einzelnen Novellierungen dargestellt. Dies ist wiederum relevant, um die Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland nachzuvollziehen. Auf Grund der verfahrenstechnischen Betrachtung der effizienten Stromerzeugung werden die Grundlagen dieser Technologie in dem Abschnitt 4 erläutert. Aus der deskriptiven Analyse der Datengrundlage des Abschnitts 5 und den theoretischen Kenntnissen der vorherigen Abschnitte werden die Hypothesen abgeleitet. Diese werden im darauf folgenden Kapitel überprüft und interpretiert. Im letzten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

## 2 Politische Rahmenbedingungen zum Klimaschutz

Die zunehmende Verwendung erneuerbarer Energien wird im Wesentlichen von der Politik auf europäischer sowie nationaler Ebene gestaltet. Die politischen Rahmenbedingungen dienen als Fundament der Energiepolitik und müssen abhängig von Klimakonzepten und -zielen angepasst werden.

Der politische Standpunkt zur Klimapolitik eines Landes wird durch die politische Bedeutung der Ökologiebewertung mitbestimmt. Deutschland ist bestrebt im europäischen Vergleich die Vorreiterrolle im Klimaschutz einzunehmen. In den letzten Jahren ist die erneuerbare Energiebranche in Deutschland stetig gewachsen. Gründe hierfür sind vorwiegend das Engagement einzelner Protagonisten, Einführung und Weiterentwicklung von Förderinstrumente wie das Erneuerbare-Energie-Gesetz und die Zusammenarbeit von Wissenschaft und innovative Unternehmen (Wengenmayr, 2011, S. 5 ff.). Die erneuerbaren Energien deckten 2012 etwa 12,6 % des nationalen Energieverbrauchs, wovon 70 % auf Biomasse zurückgeführt wird (AGEE-Stat, 2012, S. 8 ff.). Biogas spielt hierbei als Energieträger eine entscheidende Rolle, da dieses in seiner Verwendung flexibel ist und somit Strom, Wärme und Kraftstoff bereitstellen kann. Deutschland setzt auf diesen Energieträger und ist weltweit führend in der Biogaserzeugung. Für die Biogasanlagenbetreiber stellt das EEG die grundlegenden Rahmenbedingungen der Biogasförderung dar. Das wirtschaftliche Handeln der Betreiber wird durch die Novellierungen des EEG beeinflusst (Kapfer, 2011, S. 15 ff.).

Aus diesem Grund wird im vorliegenden Kapitel zunächst ein Überblick über die politischen Rahmenbedingungen gegeben. Zu Beginn werden die europäischen Zielsetzungen vorgestellt und anschließend wird spezifisch die nationale Ebene mit dem EEG im Bereich Biogasförderung und die Biomasseverordnung betrachtet. Die Biomasseverordnung ist von Bedeutung, da diese zugelassene und verbotene Substrate für die Biogaserzeugung definiert.

### 2.1 Europäische Union

Im Rahmen der europäischen Energie- und Klimapolitik sind in den letzten Jahren politische Ziele und Maßnahmen beschlossen und umgesetzt worden, die zu einer verstärkten Erzeugung und Nutzung von erneuerbaren Energien führten. Ziel ist es, dass der wachsende Anteil erneuerbaren Energien zu einer wettbewerbsfähigen und sicheren Energieversorgung und zu einer besseren Umweltverträglichkeit beiträgt (BMU und BMWi, 2010, S. 20 ff.). Die gemeinsame EU-Politik strebt eine preislich erschwingliche Verfügbarkeit von erneuerbarer Energieprodukten und -dienstleistungen für öffentliche und private Haushalte an (Europäische Kommission, 2010, S. 15). Die politischen Rahmenbedingungen der EU sollen demzufolge zur Erstellung eines funktionierenden Binnenmarktes für Strom und Gas und der Förderung eines übergreifenden Netzausbaus dienen (BMWi, 2013a, S. 51).

Der erste nennenswerte Anteil erneuerbaren Energien am Bruttoinlandsverbrauch der Europäischen Union von 6 % wurde bereits im Jahr 1997 erreicht. Die Europäische Kommission beschloss im gleichen Jahr diesen Anteil bis 2010 auf 12 % zu erhöhen (Europäische Kommission, 1997, S. 11). Folglich entstanden Überlegungen zu geeigneten Förderinstrumenten und welche Auswirkungen mit diesen verbundenen sind. Die EU-Richtlinien zur Förderung der erneuerbaren Energien wurden 2001 vom Rat der Europäischen Union verabschiedet. Die EU-Richtlinie beinhaltet indikative Richtziele für alle Mitgliedsstaaten, deren Zweck es ist, die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien zu steigern. Das Richtziel von Deutschland für den Energieverbrauch aus erneuerbaren Energien betrug 12,5 % für das Jahr 2010 (Europäischer Rat, 2001, S. 3).

Eine weitere europäische Energiepolitikverordnung trat 2007 in Kraft. Der Europäische Rat verabschiedete die energie- und klimapolitischen 20-20-20 Ziele, die zu einer längerfristigen Entwicklung der Energieversorgung beitragen sollen. Diese sind im Vertrag von Lissabon in Artikel 194 aufgeführt und behandeln die Schwerpunkte Versorgungssicherheit, Wettbewerbssicherheit und Nachhaltigkeit. Die EU-Mitgliedsstaaten werden verpflichtet bis 2020 folgende Ziele zu erfüllen: Die THG-Emissionen sollen gegenüber dem Jahr 1990 um mindestens 20 % reduziert werden. Des Weiteren beziehen sich die EU-Energieziele darauf, die Energieeffizienz um 20 % zu verbessern und einen Anteil von 20 % erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen (Europäische Union, 2011, S. 4). Welche erneuerbare Energien für die Zielumsetzung verwendet werden, bleibt jedoch die nationale Entscheidung der einzelnen Mitgliedsstaaten (Europäische Union, 2009, S. 137).

Im Jahr 2010 erfolgte eine Weiterführung der EU-Energiekompetenzen von 2007. Der angeknüpfte Aktionsplan beinhaltet die EU-Energiestrategie 2011-2020 und das Energieinfrastrukturpaket von 2020/2030. Darin werden die künftigen zu erfüllenden Richtziele beschrieben, wie z.B. eine Energieeinsparung von 20 % bis zum Jahr 2020 gegenüber 2010 zu erreichen, um eine effizientere Energienutzung zu gewährleisten.

Des Weiteren soll die Energieversorgung durch die Schaffung von wettbewerbsfähigen Preisen am Energiemarkt und den Ausbau der Technologieförderung gesichert werden (Europäische Kommission, 2010a, S. 2 ff.).

Im Jahr 2011 wurde von der EU-Kommission der Energiefahrplan 2050 vorgestellt. In diesem wird das Ziel verfolgt, die EU-THG-Emissionen um 85-90 % zu senken, um den Klimaschutz zu fördern (Europäische Kommission, 2011, S. 3 ff.).

## 2.2 Deutschland

In der Europäischen Union wurde die Erzeugung erneuerbaren Energien in den letzten Jahren stetig ausgebaut. Jeder Mitgliedsstaat entscheidet auf Grund des jeweiligen Standortes und den unterschiedlichen politischen Interessen welchen Energiemix er wählt (IEA, 2013, S. 33 ff.).

Deutschland hat sich für die nationale und internationale Zusammenarbeit als Ziel gesetzt, günstige und stabile wirtschaftliche Rahmenbedingungen für Energieprojekte zu erstellen, die einen Beitrag zur Sicherung einer nachhaltigen Energieversorgung leisten sollen. Des Weiteren wird der Schwerpunkt der deutschen Energiepolitik im Klimaschutz gesehen. Besonders weil im Industrieland Deutschland mehr als 80 % der THG-Emissionen aus der Energienutzung der verarbeitenden Industrie entstehen (BMW, 2013b). Deutschland ist bestrebt eine starke Position auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien einzunehmen und dies spiegelt auch die derzeitige Situation wieder. Der deutsche Erneuerbare-Energien-Sektor ist im internationalen Vergleich führend (AEE, 2011). Deutschland erreichte bereits im Jahr 2007 das indikative Richtziel für den Anteil erneuerbaren Energien am nationalen Bruttostromverbrauch (vgl. Abschnitt 2.1), welches für das Jahr 2010 vom Rat der Europäischen Union vorgesehen war (Diekmann, 2009, S. 789). Mit den im Jahr 2007 beschlossenen 20-20-20 Zielen setzte sich Deutschland weitere Maßstäbe. Für das Jahr 2020 wurde beschlossen eine THG-Emissionssenkung von 40 % zu erreichen. Im September 2010 erschien von der Bundesregierung das Energiekonzept, in welchem festgelegt wurde, dass für das Jahr 2050 eine THG-Emissionsminderung von über 80 % zu leisten sei. Im Vergleich zu den EU-Zielen sind diese THG-Emissionswerte höher angesetzt (vgl. Tabelle 1). Der Beitrag der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch ist im Jahr 2012 auf 12,6 % gewachsen, demzufolge konnten 2012 146 Mio. t THG-Emissionen eingespart werden. Das ergibt eine Steigerung der THG-Emissionsreduzierung von 9 % im Vergleich zum Vorjahr (BMU, 2013a).

Die Bundesregierung geht auf Grund der bisherigen Umsetzung des Richtziels und der starken Position im internationalen Erneuerbare-Energien-Sektor davon aus, dass das Ziel der Emissionsminderung bis 2020 zu erreichen ist (BMU, 2013b).

**Tabelle 1: Mengenmäßige Ziele der Energiepolitik in Europa und Deutschland**

	2020		2050	
	Europa	Deutschland	Europa	Deutschland
<b>THG-Emissionen</b>				
Reduzierung THG-Emissionen (gegenüber 1990) <sup>a)</sup>	-20%	-40%	-85% bis -90%	-80% bis -95%
<b>Effizienz</b>				
Reduzierung Primärenergieverbrauch	-20%	-20%		-50%
Energieproduktivität (Endenergieverbrauch)	20%	2,0% pro Jahr		2,1 % pro Jahr
Reduzierung Bruttostromverbrauch		-10%		-25%
<b>Gebäudebestand</b>				
Reduzierung Wärmebedarf		-20 %		
Reduzierung Primärenergiebedarf				
Sanierungsrate		Verdopplung auf 2% pro Jahr		
<b>Verkehrsbereich</b>				
Reduzierung Energieverbrauch (gegenüber 2005)		-10 %		-40%
Anzahl Elektrofahrzeuge		1 Mio.		
<b>Erneuerbare Energien</b>				
Bruttoendenergieverbrauch	20%	18%		60%
Bruttostromverbrauch		mind. 35%		mind. 80%
Bruttokraftstoffverbrauch		10%		
Wärmebereitstellung		14%		

<sup>a)</sup> ausbaufähig auf 30 %

(BMJ, 2000, S. 305; BMWi, 2013, S. 7 f. und Diekmann, 2009, S. 789)

Der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland lag 2012 bei 12,6 %. Bis zum Jahr 2020 soll der Bruttoendenergieverbrauch auf 18 % steigen (vgl. Tabelle 1). Biomasse nimmt unter den erneuerbaren Energien in Deutschland eine entscheidende Rolle ein. Die Energie aus Biomasse wird in fester, flüssiger und gasförmiger Form für Strom, Wärme und zur Herstellung von Bioenergie verwendet. Etwa 66 % der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien erfolgt aus Biomasse. Im Bereich Stromversorgung beträgt der Anteil der Bioenergie an erneuerbaren Energien etwa 30 % (FNR, 2013a S. 4).

In Deutschland wird eine Ausdehnung der Stromversorgung durch erneuerbare Energien angestrebt. Der zu erreichende Anteil in Deutschland für das Jahr 2020 liegt bei über 35 % (vgl. Tabelle 1).

Die Bundesregierung verabschiedete 2012 das Energiepaket. In welchem der ausdrückliche Wechsel in der Stromerzeugung beschlossen wurde. Bis 2022 wird Deutschland schrittweise aus der Kernenergie aussteigen. Weiter wird das Ziel verfolgt, einen langfristigen Umstieg von fossilen auf erneuerbaren Energiequellen zu erreichen. Bis 2050 soll ein Anteil von 80 % erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung erreicht werden. Mit dieser Energiewende sind langwierige Entwicklungsprozesse verbunden. Hierzu gehört der Ausbau des Stromnetzes, um

Transportwege vom Standort der Stromerzeugung bis zum Verbraucher zu schaffen und die Stromversorgung sicherzustellen. Des Weiteren müssen Kraftwerke in ihrer Leistung nutzbringend und flexibel sein, damit auf Lastschwankungen reagiert werden kann, weiter werden technologische Innovation benötigt (BMW, 2013a, S. 18).

In Deutschland ist vor allem die Biogaserzeugung im Bereich Bioenergie ein bedeutender Produktionssektor (IEA, 2013, S. 68 ff.). Biogas besitzt in der Nutzung eine hohe Flexibilität und kann für die Erzeugung von Strom, Kraftstoff und Wärme verwendet werden (Euroobserver, 2010, S. 104-119). In dieser Arbeit wird der Fokus speziell auf die Stromerzeugung aus Biogas gelegt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die gesetzlichen Regelungen der Biogaserzeugung in Deutschland dargelegt. Um einen ersten Einblick über die Substrate der Biogasproduktion zu erhalten, werden diese in der Biomasseverordnung vorgestellt. Im anschließenden Abschnitt werden das Fundament der Biogasvergütung, das Erneuerbare-Energie-Gesetz und deren Novellierungen im Zeitverlauf erläutert.

### **2.2.1 Biomasseverordnung (Biomasse V)**

Die Biomasseverordnung (Biomasse V) trat erstmalig 2001 in Kraft und regelt den Anwendungsbereich des EEG. In dieser Verordnung wurde festgelegt, welche Stoffe als Biomasse gelten, welche technischen Verfahren für die Stromerzeugung aus Biomasse Anwendung finden und welche Umweltaforderungen bei der Erzeugung von Strom eingehalten werden müssen.

Biomasse wird definiert als Energieträger aus Phyto- und Zoomasse und deren entstanden Nebenprodukten bezeichnet. Dazu zählen Pflanzen und -bestandteile und aus denen hergestellte Energieträger. Weitere Substanzen, die der Biomasse zugeordnet werden, sind Abfälle und Nebenprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft wie Stroh, Grünschnitt und Gülle. Bioabfälle unterliegen neben der Biomasse V auch der Bioabfallverordnung, sowie dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Das erzeugte Gas durch Vergärung oder Pyrolyse von Biomasse, sowie aus Biomasse produzierte Alkohole wie Biomethanol und Bioethanol, werden ebenfalls zur Biomasse gezählt. Des Weiteren werden Biogas, Pflanzenölmethylester und Treibsel, sowie Altholz und das aus diesem erzeugte Gas als Biomasse definiert.

Altholz darf hierbei nur als Biomasse angesehen werden, wenn der überwiegende Holzanteil aus Gebrauchtholz und Holzwerkstoffreste besteht. Sind im Altholz Gehalte von Gefahrenstoffen wie Quecksilber enthalten oder kann dieses Holz zur stofflichen Verwertung genutzt werden, wird dieses nicht als Biomasse anerkannt. Treibsel wird als Abfall anfallendes Substrat aus Gewässern und Ufern bezeichnet. Hierzu gehören Algen, Seegrass und Schilf. Ist die Substanz mit Hafenschlick oder weitere Gewässerschlämme und -sedimente verunreinigt, ist eine Trennung erforderlich, da die genannten Verunreinigungen nicht als Biomasse zählen.

Biogas, welches durch anaerobe Vergärung aus Phyto- und Zoomasse erzeugt wurde, darf kein Siedlungsabfälle, Gewässerschlämme, Tierkörperreste oder Erzeugnisse aus Tierkörpern wie Tiermehl enthalten, um als Biomasse zu gelten. Weitere Stoffe, die nicht als Biomasse definiert werden, sind fossile Brennstoffe und deren Neben- und Folgeprodukte wie Kohle, Mineralöl und Ölschiefer. Außerdem werden Substanzen wie Torf, gemischte Siedlungsabfälle, Papier, Pappe, Karton, Textilien, Deponie- und Klärgas nicht zur Biomasse hinzugezählt.

Die Biomasse V regelt alle technische Verfahren zur Stromerzeugung mittels Biomasse. Die Nutzung von Biogas erfolgt überwiegend in Blockheizkraftwerken (BHKW), welche komplementär Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugen. Außerdem wird in der Biomasse V die Nutzung von innovativen Verfahrenstechniken wie Brennstoffzellen und der Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Prozess für die Stromerzeugung aufgeführt. Eine genaue Erklärung der Anlagentechnologien und des Verfahrens zur Biogaserzeugung erfolgt in Abschnitt 4.1.2.

Bezug nehmend auf die Umweltauflagen unterliegen diese Auflagen weiterhin den Fachgesetzen zum Umweltschutz wie dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (BMJ, 2001, S. 1234 ff.).

Die erste Verordnung zur Änderung der Biomasse V trat im Jahr 2005 in Kraft. In diesem wurde das Tierkörperbeseitigungsgesetz durch die Verordnung tierischer Nebenprodukte vom Europäischen Parlament und vom Rat ersetzt (vgl. EG, 2002, Nr. 1774).

Eine weitere Veränderung der Biomasse V wurde 2012 eingeführt, wobei die Anwendungsbereiche der bisherigen Verordnung gleich geblieben sind. Zusätzlich wurde mit aufgenommen, für welche Stoffe eine einsatzstoffbezogene Vergütung vorliegt und welche energetischen Referenzwerte die Substrate besitzen.

Die Einsatzstoffe werden in drei Einsatzstoffgruppen eingeteilt: Klasse 0, Einsatzstoffvergütungsklasse (EVK) I und EVK II (vgl. Abschnitt Anhang 1-3). Einsatzstoffklasse 1 bezieht sich vorrangig auf Energiepflanzen, während sich in der Klasse 2 ökologisch wertvollere Substrate, wie Gülle oder Landschaftspflegematerial, befinden, ist in der Klasse 0 die definierte Biomasse aufgeführt, für die es keine zusätzliche Vergütung gibt, da sie keine oder nur geringe Bereitstellungskosten verursacht. Hierzu zählt z.B. Grünschnitt oder Trester (FNR, 2013b, S. 33). Die energetischen Referenzwerte werden in  $\text{m}^3$  pro Tonne Frischmasse (FM) abgebildet, da diese Einheit zur Berechnung der EEG-Biogaserzeugung dient. Unabhängig von der Vergütungsberechnung wird der Energieertrag bzw. Gasertrag durch die Trockenmasse (TM) bestimmt.

In der Novellierung 2012 wurde zusätzlich die Nachweispflicht über den Energieertrag von Einsatzstoffen zur Feststoffverbrennung oder thermochemischen Vergasung eingeführt. Der Nachweis kann z.B. über die Vorlage des Lieferscheins der Einsatzstofflieferanten erfolgen. (BMJ, 2011, S. 1634 ff.).



## 2.2.2 Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG): Vergütung Biogas

Das Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) trat im Jahr 2000 in Kraft. Mit diesem wurde das Stromeinspeisegesetz abgelöst, welches 1991 zur Regelung der Energieversorgung aus regenerativ erzeugtem Strom eingeführt wurde (de Witte, 2012, S. 5 f.).

Mit der Einführung des EEG wurde das Ziel verfolgt, eine nachhaltige Entwicklung in der Energieversorgung zu schaffen und den Anteil erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2010 auf 22 % zu verdoppeln (BMJ, 2000, S. 305 f.).

Das EEG wurde in den Jahren 2004, 2009 und 2012 auf Grund veränderter Ziele der Klimaschutzpolitik und Marktentwicklungen der erneuerbaren Energien novelliert (FNR, 2013a, S. 32). In diesem Gesetz werden Netzbetreiber verpflichtet, Strom aus erneuerbaren Energiequellen bevorzugt ins Netz einzuspeisen. Erzeuger erhalten für den eingespeisten Strom eine für 20 Jahre festgeschriebene Einspeisevergütung (BMU, 2012a, S. 1634 ff.). Die durch die Vergütung entstandenen Kosten werden zunächst auf den Stromlieferanten und anschließend auf den Stromkunden umgelegt. Die daraus entstandene EEG-Umlage wird von den Übertragungsnetzbetreibern jeweils zum 15. Oktober eines Jahres für das Folgejahr vorgegeben. Hierfür wird die Differenz zwischen den Ausgaben, die durch die EEG-Vergütung entstanden sind, und den voraussichtlichen Einnahmen des verkauften EEG-Stroms an der Strombörse European Energy Exchange (EEX) in Leipzig prognostiziert. Der resultierende Wert wird auf den erwarteten Stromverbrauch verteilt. Bei einem zu hohen bzw. zu niedrigen Prognosewert im Jahresverlauf erfolgt ein Ausgleich im darauf folgenden Jahr (Gaul und Glaubitz, 2010, S. 2).

Im Rahmen der Biogasförderung ist die Höhe der Vergütung abhängig von der Anlagengröße bezogen auf die elektrische Leistung, den eingespeisten Brennstoffen, der Technologie, der Wärmeauskopplung und dem Zeitpunkt, in dem die Anlage in Betrieb ging. Neben der Grundvergütung sind im EEG unterschiedliche Boni enthalten, die sich im Zeitverlauf der Novellierungen veränderten. Mit den Novellierungen wechselten auch die Degressionen von Grundvergütung und Boni. Bei Anlagen, die im Jahr 2004 in Betrieb gingen, beträgt die jährliche Degression auf die Grundvergütung 1,5 %. Die Boni sind von dieser ausgeschlossen. Für Anlagen mit dem Inbetriebnahmejahr 2009 ergibt sich ein Degressionsanteil von 1 %. Die Grundvergütung sowie die gesamten Boni sind hiervon betroffen. Für das Jahr 2012 fällt eine Degression von 2 % an, die sich auf die Grundvergütung und die Boni der Gasaufbereitung und der Vergärung von Bioabfällen bezieht (BMU, 2004, S. 1918 ff. und de Witte, 2012, S. 5). Die Degression (Deg.) bewirkt, dass die Einspeisevergütung abhängig vom Jahr der Inbetriebnahme um einen bestimmten Prozentsatz sinkt, damit eine langfristige, auch ohne staatliche Förderung, marktfähige Stromproduktion aus erneuerbaren Energien erreicht wird.

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Novellierungen in den Jahren 2004, 2009 und 2012 vorgestellt. An Hand der Tabelle 2 werden die zeitlich veränderten Unterschiede des EEG aufgezeigt und dienen zur besseren Übersicht.

**Tabelle 2: Vergütungsbestandteile im Zeitverlauf für Strom aus Biomasse (in ct/kWh)**

			EEG 2000	EEG 2004			EEG 2009			EEG 2012				
Vergütungsbestandteile			2000	Deg.	2004	2008	Deg.	2009	2010	2011	Deg.	2012	2013	
Grundvergütung	Sondervergütung <sup>i</sup>		bis 75								2,00%	25	24,5	
	Grundvergütung <sup>a, c, h, j</sup>		150		1,50%	11,5	10,83	1,00%	11,67	11,55	11,44	2,00%	14,3	14,01
			500	20	1,50%	9,9	9,32	1,00%	9,18	9,09	9	2,00%	12,3	12,05
			5.000	18	1,50%	8,9	8,38	1,00%	8,25	8,17	8,09	2,00%	11	10,78
		20.000	17	1,50%	8,4	7,91	1,00%	7,79	7,71	7,63	2,00%	6	5,88	
Substrate	NawaRo-Bonus <sup>a</sup>	Rohstoffvergütung <sup>j</sup>												
		EVK I	500			6	6	1,00%	7	6,93	6,89		6	6
		EVK I	750			4	4	1,00%	4	3,96	3,92		5	5
		EVK I	5.000			4	4	1,00%	4	3,96	3,92		4	4
		EVK II Gülle	500										8	8
		EVK II Gülle	5.000										6	6
			5.000										8	8
	Gülle-Bonus <sup>b, d</sup>		150					1,00%	4	3,96	3,92			
			500					1,00%	1	0,99	0,98			
	Landschaftspflege-Bonus <sup>e</sup>		500					1,00%	2	1,98	1,96			
Bonus für Vergärung von Bioabfällen <sup>l</sup>		500									2,00%	16	15,68	
		20.000									2,00%	14	13,72	
Technik	KWK-Bonus		20.000			2	2	1,00%	3	2,97	2,94			
	Technologie-Bonus Innovative Anlagentechnik		5.000			2	2	1,00%	2	1,98	1,96			
	Gasaufbereitung <sup>k</sup>		350 Nm <sup>3</sup>					1,00%	2	1,98	1,96			
			700 Nm <sup>3</sup>					1,00%	1	0,99	0,98	2,00%	3	2,94
			1.000 Nm <sup>3</sup>									2,00%	2	1,96
			1.400 Nm <sup>3</sup>									2,00%	1	0,98
Emissionsminderung <sup>b, g</sup>		500					1,00%	1	0,99	0,98				
Markt	Marktprämie		20.000									var.	var.	
	Managementprämie		20.000									0,3	0,28	
	Flexibilitätsprämie		20.000									130 €/kW	130 €/kW	

(BMELV, 2012, S. 32 ff., FNR, 2012, S. 33 f. und Schünemann-Plag, 2012, S. 1)

## Novelle 2009

- (a) kein Anspruch für Strom aus flüssiger Biomasse für Neuanlagen über 150 kW<sub>el</sub>
- (b) kein Anspruch für Anlagen, die Gas aus einem Gasnetz einsetzen
- (c) nur für Stromerzeugung mit KWK bei über 5 MW<sub>el</sub> bis 20 MW<sub>el</sub>
- (d) erhöht den nachwachsenden Rohstoff (NawaRo) -Bonus bei ständigem Wirtschaftsdünger-Einsatz von mind. 30 Masse-%
- (e) erhöht den NawaRo-Bonus bei ständigem Landschaftspflegematerial-Einsatz von mind. 50 Masse-%
- (f) beim Einsatz von NawaRo (Positivliste III); kompatibel mit pflanzlichen Nebenprodukten (Positivliste V); Voraussetzung für Neuanlagen nach BImSchG: gasdichtes Gärrestelager und zusätzlich Gasverbraucher (vgl. Anhang 4 und 5)
- (g) Erhöhung der Grundvergütung für Anlagen nach BImSchG bei Einhaltung der entsprechenden Formaldehydgrenzwerte nach Emissionsminimierungsgebot der TA Luft

## Novelle 2012

- (h) einschließlich Wärmenutzungsverpflichtung, d. h. mindestens 60 % des in der Anlage erzeugten Stroms muss in KWK erzeugt werden und die Wärme muss gemäß Vorgaben im EEG 2012 genutzt werden. Ausnahmen: Anlagen mit  $\geq 60$  Masse-% Gülleinsatz oder Teilnahme an der Direktvermarktung
- (i) Güllekleinanlagen, Einsatz von  $\geq 80$  Masse-% Gülle/Mist (ohne Geflügelmist/Hühnertrockenkot)
- (j) Grund- und Rohstoffvergütung nur bei Einsatz von  $\leq 60$  Masse-% Mais und Getreidekorn
- (k) Voraussetzungen für Kapazitäten pro Stunde 700 Nm<sup>3</sup> bis 1400 Nm<sup>3</sup>: Methanemissionen  $\leq 2$  %; Stromverbrauch Aufbereitung max. 0,5 kWh/Nm<sup>3</sup>; Prozesswärme zur Aufbereitung nicht aus zusätzlicher fossiler Energie
- (l)  $\geq 90$  Masse-% Bioabfälle gemäß Bioabfallverordnung, mit Einrichtung zur Nachrotte und stofflicher Verwertung der GärresteNovelle 2004

### 2.2.2.1 Novelle 2004

Mit der Novellierung im Jahr 2004 wurde vorgegeben, den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttostromverbrauch für 2010 auf 12,5 % zu erhöhen. Ein weiteres Ziel der Novellierung war die Förderung kleiner Anlagen und die Vergütung des Einsatzes von Biomasse wie Energiepflanzen und tierische Exkremente (Gömann et al., 2010, S. 2 f.).

Im Vergleich zum EEG 2000 wurden höhere Grundvergütungen und die Einführung von zusätzlichen Boni veranlasst. Kleinere Biomasseanlagen erhielten folgende Förderung. Bei Anlagen bis zu einer Leistung von 150 kW<sub>el</sub> wurde die Grundvergütung von 11,5 ct/kWh eingeführt. Vor der Novellierung lag die erste Leistungsstufe bei 500 kW<sub>el</sub> mit 9,5 ct/kWh (vgl. Tabelle 2).

Die Vergütungssätze für den Bonus für nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) wurden ebenfalls verbessert. Dieser Bonus wurde für Pflanzen und Pflanzenbestandteilen vergeben, die aus der Forst- und Landwirtschaft, dem Gartenbau oder aus der Landschaftspflege stammen. Dieses Material sollte nur durch die Ernte, Konservierung oder Nutzung in Biogasanlagen aufbereitet oder verändert werden und kann auch aus Gülle oder Schlempe gewonnen werden. Anlagen, die eine Leistung bis zu 500 kW<sub>el</sub> erbringen, erhalten eine Vergütung von 6 ct/kWh und Anlagen bis 5 MW 4 ct/kWh (Schünemann-Plag, 2012, S. 2 ff.).

Der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Bonus erbringt eine Vergütung von 2 ct/kWh. Die Voraussetzung hierfür ist die gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme.

Zusätzlich wurde der Technologiebonus eingeführt. Eine Vergütung von 2 ct/kWh für innovative Anlagentechnik wurde festgelegt. Hierbei muss gewährleistet sein, dass das Stromerzeugungssystem mit einer KWK versehen ist und dieses gelegentlich betrieben wird. Des Weiteren müssen innovative Verfahrenstechnologien wie Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Organic-Rankine-Anlagen für die Stromerzeugung aus Biomasse verwendet werden oder die Gasgewinnung erfolgt durch thermochemische Verfahren oder Trockenfermentation (vgl. Abschnitt 4.1.2 und 4.1.3) (BMU, 2004, S. 1918 ff.).

### 2.2.2.2 Novelle 2009

Im Jahr 2009 wurde die zweite Novellierung des EEG eingeführt. Das Ziel war hierbei, den Beitrag von Biogas zur Strombereitstellung auf mind. 30 % bis 2020 zu erhöhen. Zusätzlich wurde die Wärmebereitstellung aus Biomasse berücksichtigt und der KWK-Bonus erhöht. Vergütungssätze für effiziente Technologien bei der Biogaseinspeisung wurden eingeführt. Des Weiteren setzte sich die Bundesregierung das Ziel, den Einsatz von Gülle bei Biogaskleinanlagen zu fördern (BMU, 2009, S. 8 f.).

Die Grundvergütung erhöhte sich bei Anlagen bis zu einer Leistung von 500 kW<sub>el</sub> auf 11,67 ct/kWh. Anlagen die höhere Leistungen erbringen, erhalten eine geringere Vergütung (vgl. Tabelle 2). Für Anlagen, die 2009 in Betrieb gingen, ergeben sich folgende Änderungen im Boni-Förderprogramm.

Der NawaRo-Bonus stieg um 1ct/kWh bei Anlagen bis zu einer Leistung von 500 kW<sub>el</sub> im Vergleich zur Novelle im Jahr 2004. Die Vergütung von 4 ct/kWh bei Anlagen mit 5 MW<sub>el</sub> hat sich nicht verändert. Zusätzlich wurden zwei weitere Vergütungen, der Güllebonus und der Landschaftspflegebonus, in diesem Bereich eingeführt. Der Güllebonus verpflichtet Anlagebetreiber einen Gülle-Anteil von mind. 30 % an der gesamten Substrateinspeisung zu erbringen. Wird dies erfüllt, ergibt sich z.B. eine Vergütung für Anlagen mit einer Leistung bis zu 150 kW<sub>el</sub> von 4 ct/kWh (FNR, 2013a, S. 32 ff.). Der Landschaftspflegematerial-Bonus bezieht sich auf Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die eine Zustandsverbesserung der Natur und Landschaft hervorrufen und der Landschaftspflege dienen (Clearingstelle EEG, 2008, S. 1 ff.). Für den aus diesen Substraten erzeugtem Strom erfolgte bei Anlagen bis zu einer Leistung von 500 kW<sub>el</sub> eine Vergütung von 2 ct/kWh (vgl. Tabelle 2).

Der Förderungssatz für innovative Technologie ist weitestgehend gleich geblieben. Im Bereich Gaseinspeisung wurden zusätzliche Anforderungen beschlossen, die durch den Gasaufbereitungsbonus eingeführt wurden. Demnach richtet sich die Höhe des Bonus nach der Gasaufbereitungskapazität pro Stunde. Bei Anlage mit einer Kapazität bis zu 350 Nm<sup>3</sup> Rohgas/h wurde eine Vergütung von 2 ct/kWh und bis 700 Nm<sup>3</sup> 1 ct/kWh festgelegt. Die Verfahren der thermochemischen Umwandlung wie die Vergasung von Stroh und die Vergärung von Bioabfällen wurden in den Technologie-Bonus neu verankert. Hingegen wurde das Verfahren zur Trockenfermentation (vgl. Abschnitt 4.1.3) gestrichen.

Eine weitere Veränderung erfolgte am KWK-Bonus. Die Vergütung für Anlagen bis zu einer Leistung von 20 MW<sub>el</sub> wurde im Vergleich zu 2004 um 1ct/kWh erhöht.

Die erzeugte Wärme wird außerhalb der Biogasanlage genutzt, demgemäß unterliegt die Nutzung der Wärme einer gesetzlich festgelegten Positivliste (vgl. Anhang 6). In dieser werden die Verwendungsformen und die Höchstwerte der Wärmenutzung angegeben.

Zusätzlich wurde 2009 für den technischen Bereich der Emissionsminderungsbonus eingeführt. Dieser wurde bei Anlagen bis zu einer Leistung von 500 kW<sub>el</sub> mit 1 ct/kWh vergütet (BMJ, 2008, S. 2074 ff.).

### 2.2.2.3 Novelle 2012

Die letzte Novellierung erfolgte 2012. Durch diese soll der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch auf 35 % bis 2020 erfolgen und bis 2050 auf 80 % erhöht werden. Ziel der Novellierung ist das Potenzial von biogenen Reststoffen verstärkt zu nutzen und somit den Einsatz von Gülle zu fördern. Damit eine ökologische Verwertung erfolgt und die Konkurrenz zwischen Lebens- und Futtermittelproduktion verhindert wird (BMELV, 2012, S. 3 f.). Außerdem besteht für Anlagenbetreiber die Möglichkeit der Direktvermarktung über das Marktprämienmodell.

Mit der Novellierung wurde die Grundvergütung für Anlagen mit einer Leistung bis zu 5 MW<sub>el</sub> deutlich erhöht. Diese Erhöhungen auf 11 bis 14 ct/kWh sollten den Ausgleich für die in dem gleichen Jahr abgeschafften Boni wie Gülle- und KWK-Bonus darstellen (vgl. Tabelle 2).

Der NawaRo-Bonus wurde durch die Einsatzstoffvergütungsklassen (EVK) I und II abgelöst (vgl. Anhang 1-3). Demnach erhalten Anlagen mit Leistungen von 5 kWh<sub>el</sub> bis 5 MW<sub>el</sub> in der EVK I 4 bis 6 ct/kWh. In der EVK II wird im Bereich der Anlagenleistung 5 MW<sub>el</sub> zwischen Substraten mit und ohne Gülleanteil unterschieden. Die Vergütung für Substrateinspeisungen mit Gülleanteil liegt um 2 ct/kWh unter der ohne Gülleanteil. Die Substrateile müssen präzise in einem Einsatzstofftagebuch festgehalten werden. Der Anlagenbetreiber darf jedoch bestimmen, welche und in welcher Menge die Substrate eingespeist werden. Die Vergütung richtet sich nach den Standardgaserträgen der einzelnen Substrate, die in der BiomasseV dargestellt sind (vgl. Anhang 1-3) (BMELV, 2012, S. 7 ff.).

Im Bereich der Substratvergütung wurde zusätzlich ein Bonus für die Vergärung von Bioabfällen eingeführt. Demnach müssen mind. 90 Masseprozent Bioabfälle in einem Kalenderjahr eingesetzt werden.

Für die entstandenen festen Gärrückstände muss eine Einrichtung zur Nachrotte geschaffen werden und die Rückstände müssen anschließend einer stofflichen Nutzung unterliegen. Bei Erfüllung dieser Auflagen beträgt die Vergütung z.B. in der Leistungsklasse 500 kW<sub>el</sub> 16,0 ct/kWh.

Im technischen Bereich wurde der Gasaufbereitungsbonus erhöht und beträgt abhängig von der Aufbereitungskapazität 700 bis 1400 Nm<sup>3</sup> Deponie-, Klär- oder Biogas pro Stunde 1 bis 3 ct/kWh. Demzufolge stieg die erste Kapazitätsstufe von 350 Nm<sup>3</sup> auf 700 Nm<sup>3</sup> Gas/h (FNR, 2013a, S. 33).

Damit der Anlagenbetreiber die bisher genannten Vergütungen der Novelle 2012 erhält, müssen weitere Anforderungen erfüllt werden. Beispielweise muss die Stromerzeugung zu mind. 25 % bis

zum Ende des ersten Kalenderjahres und im Sinne der KWK erfolgen. Nach diesem erhöht sich der Anteil auf 60 %. Die Wärmenutzung muss sich hierbei nach der Positivliste richten. Außerdem dürfen der Maisanteil, das Getreidekorn und der Körnermais bis zu 60 Massenprozent betragen.

Eine weitere Vorgabe für die Substratnutzung wurde eingeführt. Am Standort der Biogaserzeugung ist ein neu technisch gasdichtes abgedecktes Gärrestlager einzurichten und die hydraulische Verweilzeit beträgt im gasdichten System mindestens 150 Tage (vgl. Abschnitt 4.4.1). Biogasanlagen, die ausschließlich (100 %) Gülle einspeisen, sind von dieser Regelung nicht betroffen.

Zusätzlich wurde durch die Novellierung 2012 die Sondervergütung für eine neue Anlagenklasse mit einer Leistung bis 75 kW<sub>el</sub> gültig, die mind. 80 Masseprozent Gülle einsetzen muss. Weiter muss die Stromerzeugung am Standort der Biogasanlage erfolgen. Die Vergütung beträgt 25,0 ct/kWh.

Eine bedeutende Neuheit der Novellierung 2012 ist die Vergütung der direkten Stromvermarktung. Anstelle der gesetzlich festen Einspeisevergütung wird durch die Marktprämie die Direktvermarktung für Anlagenbetreiber ermöglicht.

Die Marktprämie ergibt sich aus der Differenz der anlagenspezifischen EEG-Vergütung und dem Referenzwert, der den Marktwert an der Strombörse darstellt. Der Referenzwert berechnet sich dabei aus dem monatsdurchschnittlichen Energiemarktpreis und der energieträgerspezifischen Monatsprämie. Die Monatsprämie wurde eingeführt, um den erhöhten Aufwand zur Direktvermarktung zu berücksichtigen und betrug 2012 0,30 ct/kWh. Der aktuelle Wert liegt bei etwa 0,28 ct/kWh.

Um einen Vorteil durch die Marktprämie zu erzielen, müsste der Anlagenbetreiber einen Preis über dem Referenzwert am Strommarkt erlangen.

Neben dieser Marktprämie wurde die sogenannte Flexibilitätsprämie eingeführt. Diese soll eine marktorientierte Stromerzeugung ermöglichen. Hierfür sind z.B. zusätzliche Gasspeicher vorgesehen, die einen flexiblen Ausgleich von Lastschwankungen im Stromnetz erzeugen sollen. Der vergütete Zeitraum beträgt 10 Jahre und jede zusätzliche installierte Leistung wird mit 130 €/kW gefördert (BMELV, 2012, S. 10-25).

### 3 Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland

In Deutschland entstand durch die Biogasproduktion im Agrarsektor ein neues Geschäftsfeld, womit sich für Landwirte im Rahmen der Diversifikation eine Einkommensalternative erschloss. Auf Grund der vorhandenen Produktionsfaktoren wie landwirtschaftlich nutzbare Flächen, Arbeitsmaschinen und Kenntnissen im Pflanzenbau und in der Tierhaltung war die Grundlage für die Biogaserzeugung gelegt. Demzufolge und zurückführend auf die Biogasförderung des Erneuerbare-Energie-Gesetzes investierten Landwirte in Biogasanlagen. Es existieren regionale Unterschiede in der installierten elektrischen Leistung und in der Agglomeration der Anlagen. Diese regionalen Unterschiede werden durch die betrieblichen landwirtschaftlichen Strukturen, der regionalen Verfügbarkeit von Gärsubstraten und deren Einspeisung in Anlagen mit beeinflusst (Schaper, 2010, S. 94 ff.).

In diesem Kapitel wird die Rolle von Biogas im Bereich der Bioenergie dargestellt. Weiter wird die Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland anhand der Anlagenzahl und der installierten elektrischen Leistung verdeutlicht. In einem separaten Abschnitt werden die regionalen Unterschiede der Biogasproduktion durch Einflussfaktoren wie Betriebsstrukturen aufgezeigt.

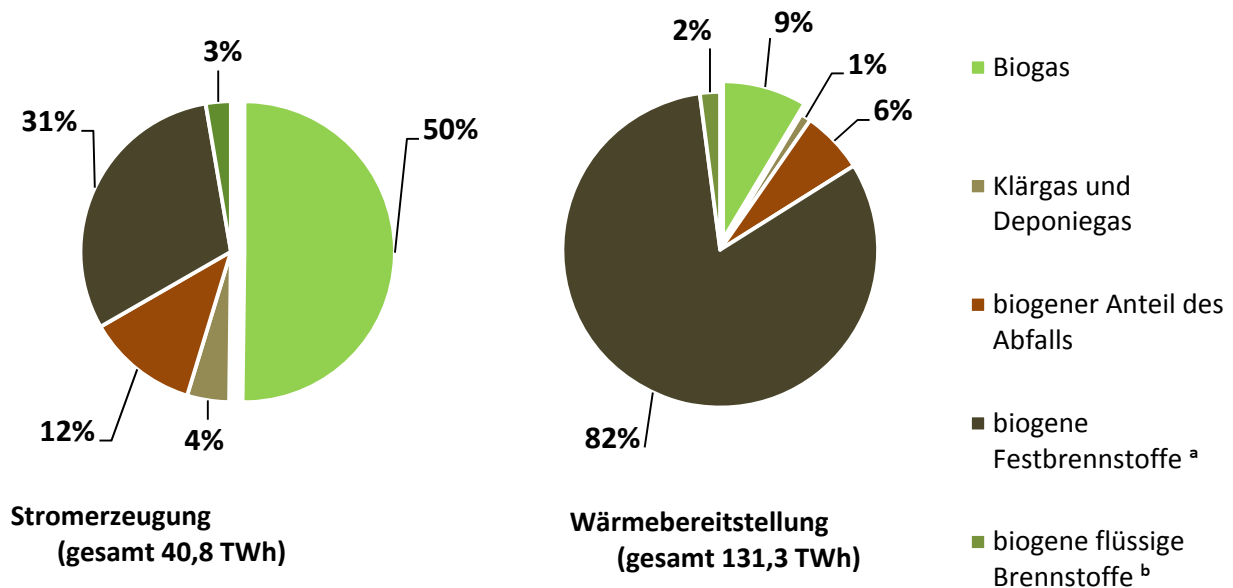
#### 3.1 Bedeutung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas im Rahmen der Bioenergieerzeugung

Die Summe der Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien betrug im Jahr 2012 etwa 314 Mrd. kWh. Demnach wurde ein Endenergieverbrauch von 12,6 % erneuerbarer Energien erreicht. Innerhalb der gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbarer Energien nimmt die Energie aus Biomasse mit etwa 70 % den bedeutsamsten Part ein (FNR, 2013, S. 4 ff.). Des Weiteren ist Biomasse besonders relevant als Wärmequelle, bereits 2011 wurden 91 % Bioenergie an der gesamten Wärmebereitstellung erneuerbaren Energien zur Verfügung gestellt (AEE, 2011, S. 4). Biogas nimmt in der Bioenergie eine bedeutsame Position ein. Dieser Energieträger besitzt eine Vielzahl von Nutzungsoptionen wie die dezentrale Strom- und Wärmeproduktion, die Kraftstoffherzeugung, die Verwendung als Erdgassubstitut und die direkte Einspeisung in das Gasnetz. Biogas bietet gegenüber anderen Bioenergieträgern den Vorteil in der Energieerzeugung keinen tageszeitlichen oder witterungsbedingten Schwankungen zu unterliegen.

Demnach ist Biogas in der Nutzung flexibel und relativ einfach speicherbar. Aus diesem Grund besitzt dieser Energieträger das Potenzial langfristig die Absicherung der sogenannten Stromgrundlast zu gewährleisten.

In der Stromerzeugung aus Biomasse nimmt Biogas 2012 in Deutschland den größten Anteil mit über 50 % ein (vgl. Abbildung 1). Die Verstromung erfolgt zum größten Teil direkt am Entstehungsort. Die derzeitige verbreitete Nutzungsart von Biogasanlagen sind Blockheizkraftwerke mit der Erzeugung von Strom und Wärme durch KWK.



**Abbildung 1: Energiegewinnung aus Biomasse in Deutschland 2012**

<sup>a</sup> Waldrestholz, Rapsstroh

<sup>b</sup> Pflanzenöl, Biodiesel

(FNR, 2013b, AEE, 2013)

Bezug nehmend auf die Wärmebereitstellung aus Biomasse betrug der Anteil Biogas 2012 etwa 9%. Die entstandene Wärmeleistung von 11,3 TWh wurde zu über 35% für das Beheizen von Wohn- und Betriebsgebäude (inkl. Warmwasserbereitung) und zu über 25% für die Einspeisung in Wärmenetze genutzt. Weitere Verwendungszwecke waren Trocknungsprozesse, Stallbeheizung und Beheizung von öffentlichen Gebäuden. Inzwischen entstehen immer mehr Fernwärmenetze zu Wohngebieten und gewerblichen Einrichtungen, die die Versorgung mit Biogasswärme ermöglichen (FNR, 2013, S. 13).

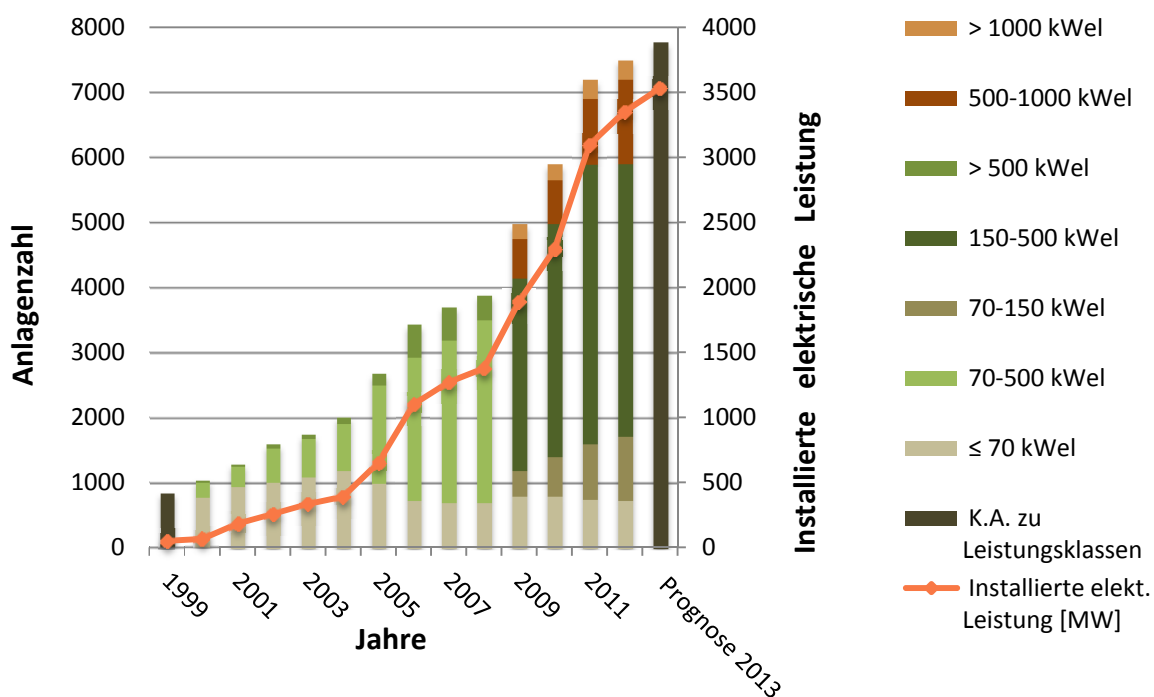
### 3.2 Entwicklung der Anlagenzahl und installierten Leistungen

Mit Einführung des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes im Jahr 2000 stieg der Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland. Der Biogasanlagenbestand lag im Jahr 2000 bei etwa 1.050 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Anlagenleistung von ca. 80 MW<sub>el</sub>. Die erste Novellierung des EEG trat 2004 in Kraft, welche zu einem Zuwachs von Neuanlagen und zu veränderten Substratströmen in Biogasanlagen führte. Mit dem Zubau von 1000 Anlagen wurde eine Anlagenzahl von rund 2.050 und einer Gesamtleistung von etwa 250 MW<sub>el</sub> 2004 in der Bundesrepublik erfasst. Die Substratströme wurden durch den verstärkten Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen geprägt, der erstmalig in der Novelle 2004 gefördert wurden (vgl. Abschnitt 2.2.2.1).

Der „Biogasboom“ wurde in den Jahren 2009 und 2010 ausgelöst. Die Rahmenbedingungen der Novelle 2009 führten zum Neubau von kleineren Anlagen auf Güllebasis bis zu einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub>. Daraus ergab sich, dass die Leistungsklasse 70 - 500 kW<sub>el</sub> in zwei Leistungsklassen 70 - 150 kW<sub>el</sub> und 151 - 500 kW<sub>el</sub> aufteilte. In den beiden neu entstanden Klassen wurde insgesamt ein Zubau von etwa 550 Anlagen erfasst (vgl. Abbildung 2). Des Weiteren wurden die KWK und die Installation von Satelliten-Blockheizkraftwerken intensiviert. Satelliten-BHKW sind räumlich vom Fermenter der Biogasanlage getrennt. Diese stehen an dem Ort, wo Energie in Form von Strom und Wärme nachgefragt wird.

Weiter etablierte sich die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Im Jahr 2009 wurden 17 weitere Biomethan-Einspeiseanlagen erfasst. Die Gesamtkapazität stieg auf 35.100 Nm<sup>3</sup>, wodurch rund 163 Mio. Nm<sup>3</sup> Biomethan eingespeist wurden (DBFZ, 2012, S. 23 ff.).

**Abbildung 2: Entwicklung der Biogasanlagenzahl und der installierten elektrischen Leistung [MW] in Deutschland**



(DBFZ, 2012, S. 33, FNR, 2013, S. 15 und FvB, 2013, S. 1 ff.)

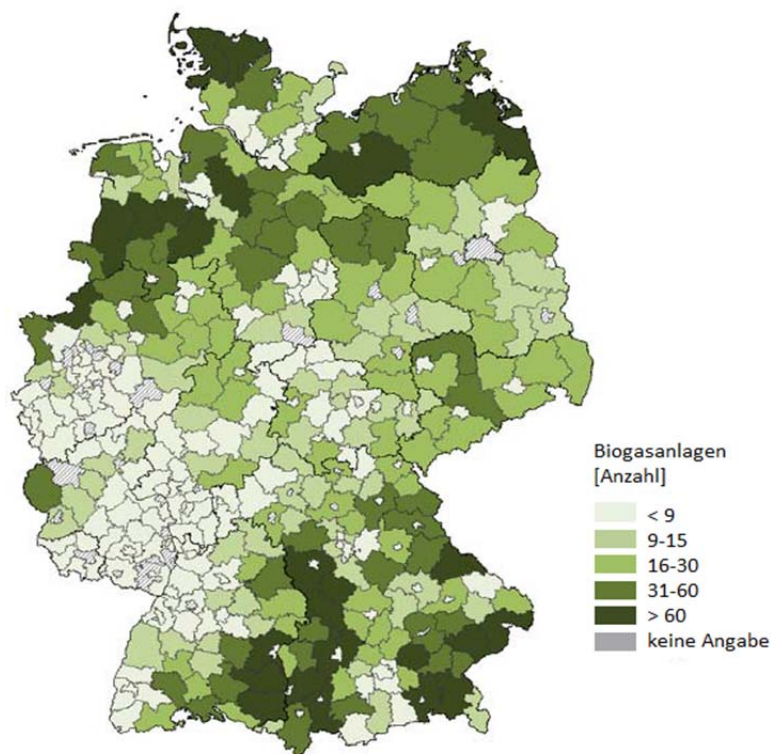
Im gesamten Bundesgebiet standen im Jahr 2010 5.905 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von etwa 2.290 MW<sub>el</sub>. Der Anlagenneubau stieg im Jahr 2011 um rund 1.270 Anlagen (vgl. Abbildung 2). Ein deutlicher Rückgang des Zubaus von Biogasanlagen erfolgte im Jahr 2012. In Betrachtung des Zubaus von 2011 bis 2012 sank die Anzahl um 930 Anlagen. Dieser ist u.a. auf die veränderten Rahmenbedingungen durch die Novelle 2012 zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.2.2.3).

Für 2012 wurden 7.515 Biogasanlagen erfasst, wovon 109 Anlagen Biomethan in das Erdgasnetz einspeisen. Die gesamte installierte elektrische Leistung betrug 3.352 MW<sub>el</sub> (FNR, 2013a, S. 1). Ein weiter Leistungszuwachs wird ebenfalls in 2013 prognostiziert. Jedoch wird vermutet, dass dieser Leistungszuwachs nicht durch den Anlagenzubau, sondern durch eine Effizienzsteigerung mithilfe von Erweiterungsmaßnahmen wie BHKW-Erneuerung durch innovative Prozesstechnologien und Optimierung der Substratverwendung erfolgen wird (FNR, 2013c, S. 2 ff., FvB, 2013).

### 3.3 Regionaler Vergleich der Biogaserzeugung

Die Bundesländer Bayern, Niedersachsen und Baden-Württemberg besitzen die größten Biogasanlagenbestände und die höchsten installierten elektrischen Leistungen in Deutschland (vgl. Abbildung 3). Bayern verzeichnete in 2012 2.294 Biogasanlagen und eine Gesamtleistung von 700 MW<sub>el</sub>. In Niedersachsen wurden etwa 1.480 Biogasanlagen mit insgesamt 780 MW<sub>el</sub> erfasst. Mit Abstand folgte Baden-Württemberg mit 822 Anlagen und einer Leistung von 270 MW<sub>el</sub>. Diese hohen Anlagenbestände sind auf den zunehmenden Neuanlagenbau bis 2011 zurückzuführen. Nach Schätzungen des DBFZ und der Befragung der Länderinstitutionen im Jahr 2011 betrug der Anlagenbau in Bayern (340 Neuanlagen) und Niedersachsen (230 Neuanlagen) zusammen rund 50 % am gesamten Neubau in Deutschland.

**Abbildung 3: Anlagenzahl der Biogasanlagen auf Landkreisebene in Deutschland, Stand 2012**



Die durchschnittliche installierte Anlagenleistung in Deutschland betrug 2012 rund 400 kW<sub>el</sub>. Im Süden Deutschlands sind kleinere bis mittlere Anlagenleistungen (< 350 kW<sub>el</sub>) zu finden. Wohingegen im Norden und Osten höhere mittlere Anlagenleistungen (> 500 kW<sub>el</sub>) zu verzeichnen sind. In Bayern lag die mittlere Anlagenleistung bei rund 280 kW<sub>el</sub>. Im Vergleich zu dieser Angabe wurden in Mecklenburg-Vorpommern deutlich höhere durchschnittliche Leistungen von 680 kW<sub>el</sub> registriert (DBFZ, 2012, S. 35).

Für die Versorgung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden vor allem Energiepflanzen wie Silomais, Grassilage und Getreide-Ganzpflanzen-Silage (GPS) und besonders Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung wie Gülle und Festmist verwendet. Die regionalen Unterschiede der Biogaserzeugung werden durch die betrieblichen landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen und demnach auch durch die regionale Verfügbarkeit von Gärsubstrate mit beeinflusst.

Ackerland ist auf Grund der vielfältigen und intensiven Nutzbarkeit verbreiteter als Grünland. Im Jahr 2010 wurden rund 11,8 Mio. ha landwirtschaftliche Nutzfläche (LF) Ackerland und 4,7 Mio. ha (LF). Dauergrünland erfasst (Statistik-bw, 2011, S. 28). Bezogen auf die Ackerbauflächen wächst der Energiepflanzenbau. Rund 900.000 ha wurden für 2010 ermittelt und 2012 stieg die Anbaufläche auf 2 Mio. ha.

In Regionen in denen hauptsächlich Ackerbau betrieben wird wie in der Hildesheimer Börde und in der Köln-Aachener Bucht ist ein geringer Biogasanlagenbau zu verzeichnen. Ein Grund hierfür ist die geringe Viehdichte und die begrenzte Verfügbarkeit von Wirtschaftsdünger als Substrat. Bei hohen Getreidepreisen verlieren Biogasanlagen, die ausschließlich mit NawaRo gespeist werden, an Wirtschaftlichkeit (de Witte, 2012, S. 139).

In Regionen mit Schwerpunkt Tierhaltung wird im Vergleich zu Ackerbauregionen mehr Biogas erzeugt. Der entstehende Wirtschaftsdünger in der Tierhaltung dient als Basissubstrat für die Biogaserzeugung. Kritisch können jedoch die entstanden Flächenkonkurrenzen, die einerseits durch den Biogassubstrat- und Futtermittelanbau und andererseits durch die Ausbringung von Gärresten aus der Biogasanlage entstehen (Gömann et al., 2013, S. 35 f.).

Die höchste Schweinebestandsdichte Deutschlands befindet sich im westlichen Niedersachsen. Die Region Weser-Ems besitzt etwa  $\frac{1}{3}$  (> 8 Mill. Schweine) des bundesweiten Schweinebestandes, gleichzeitig liegt hier das Ballungsgebiet der Biogaserzeugung von Niedersachsen.

Des Weiteren ist die Rinderhaltung in Deutschland weit verbreitet. Niedersachsen und Bayern besitzen zusammen mit rund 6 Mio. Rindern die Hälfte des Rinderbestandes in Deutschland. Die Rinderhaltung kommt teilweise in Regionen vor, in denen schlechte Böden, Hanglagen und ein hoher Grünlandanteil vertreten sind (Statistik-bw, 2011, S. 8). Der zuletzt genannte Punkt ist für die Biogaserzeugung in Bayern relevant. In den südlichen Bundesländern wie Bayern und Baden-Württemberg wurde mittels Betriebsbefragung 2009/10 des DBFZ festgestellt, dass Grassilage neben Maissilage vorwiegend als NawaRo-Substrateinspeisung verwendet wird. Mehr als  $\frac{3}{4}$  der

NawaRo-Substrate wurde durch Maissilage in den Bundesländern Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Hessen gedeckt (Rensberg und Stinner, 2011, S. 227).

Bezogen auf die durchschnittliche installierte Anlagenleistung sind im Süden Deutschlands quantitativ mehr Anlagen mit kleinerer bis mittlerer Leistung ( $< 350 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) installiert. In Bayern wurde mittels Schätzungen des DBFZ und der Länderinstitutionen 2012 eine mittlere Leistung von  $251 \text{ kW}_{\text{el}}$  erfasst. Dagegen ist die mittlere Anlagenleistung im Norden und Osten höher. In Niedersachsen wurde im Mittel eine installierte elektrische Leistung von rund  $500 \text{ kW}_{\text{el}}$  verzeichnet. Die installierte elektrische Anlagenleistung lag im bundesweiten Durchschnitt bei rund  $400 \text{ kW}_{\text{el}}$  (DBFZ, 2012, S. 35).

Auf Grund des rückläufigen Anlagenneubaus in 2012 (vgl. Abschnitt 3.2), wird vermutet dass der Anlagenausbau weiter erfolgen wird, um die Effizienz der Anlage zu steigern. Bereits durchgeführte Erweiterungen erfolgten vor allem in den Bereichen Wärmenutzung und installierte BHKW-Leistung (DBFZ, 2012, S. 77). In den genannten Ballungsgebieten, die bereits überdurchschnittliche Anlagenleistungen besitzen, wurde in den vergangenen Jahren ein überdurchschnittlicher Leistungsausbau erfasst (Gömann et al., 2013, S. 9).

## 4 Technologie und Verfahren der Biogaserzeugung

Die Biogaserzeugung beruht auf dem biologischen Umwandlungsprozess durch Mikroorganismen. Folglich wird zunächst der Biogas-Vergärungsprozess erklärt, um anschließend den gesamten verfahrenstechnischen Ablauf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage darzustellen. Hierbei werden zunächst die Anlagentechnik und die relevanten Parameter der effizienten Energieumwandlung wie Verweilzeit und Wirkungsgrade vorgestellt. Daraufhin findet die Betrachtung unterschiedlicher Anlagenkonzepte statt, die nach Verfahrensmerkmalen untergliedert sind.

Die Grundlage für eine effiziente Energieumwandlung wird bereits durch die Substrateinspeisung gelegt. Demzufolge werden die mengenbezogene Substrateinsätze und die Gaserträge der Substrate zum Ende des vierten Kapitels näher betrachtet.

Bei der Biogaserzeugung wird organische Substanz im wässrigen Milieu anaerob, unter Luftabschluss, und mithilfe von Mikroorganismen abgebaut. Das produzierte Biogas besteht zu 50-70 % aus Methan ( $\text{CH}_4$ ), zu 25-45 % aus Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und zu 2-7 % aus Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Die Anteile der weiteren Reststoffe für Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) liegen bei  $< 1 \%$ . Durch Verbrennung des Methans wird Energie erzeugt, somit dient  $\text{CH}_4$  als Energieträger (Kaltschmitt und Hartmann, 2001, S. 853 ff.).

Der Biogas-Vergärungsprozess enthält vier Teilschritte, die grundsätzlich zeitlich parallel stattfinden. Mit der Hydrolyse, der Verflüssigungsphase, beginnt der Prozess. Hierdurch werden

komplexe organische Verbindungen aufgespalten und in einfache umgebaut. Demnach erfolgt die Acidogenese, in dieser Versäuerungsphase werden Fette, Zucker Alkohole,  $H_2O$  und  $CO_2$ , die für die Methanproduktion relevant sind, gebildet. In der nächsten Phase, der Acetogenese, entstehen vorwiegend Essigsäuren. Die Methanogenese ist die letzte Prozessphase, in dieser entsteht neben  $H_2O$  und  $CO_2$   $CH_4$ . Die Mikroorganismen besitzen in den vier Prozessphasen unterschiedliche Milieubedingungen. Um diese bestmöglich zu erreichen, ist das Einhalten von technischen Merkmalen wie Verweilzeit des Substrates im Gärbehälter und Temperatur relevant, um den Vergärungsprozess nicht negativ zu beeinflussen (FNR, 2013, S. 18).

## 4.1 Anlagentechnik und verfahrenstechnischer Prozess der Biogaserzeugung

In diesem Abschnitt werden die technischen Anlagenbestandteile, die Parameter der effizienten Energieumwandlung und die unterschiedlichen Anlagenkonzepte erklärt.

### 4.1.1 Ablaufprozess Biogasproduktion

Die fünf Hauptbestandteile einer landwirtschaftlichen Biogasanlage sind Vorgrube, Fermenter, Gärrückstandslager, Gasspeicher und ein BHKW bzw. Gasaufbereitungsanlage. Für die Entstehung und Verwertung von Biogas werden die Gasspeicher und das BHKW verwendet. Für die Zwischenlagerung und Aufbereitung der Substrate, wie das Zerkleinern und das Vermischen der Einsatzstoffe, wird die Vorgrube benötigt. Bei auftretenden Schwankungen hinsichtlich des Trockensubstanzgehaltes oder der Konsistenz der Substrate werden Maßnahmen wie Homogenisierung oder Verrotten in dieser Vorgrube durchgeführt. Bestandteil jeder Biogasanlage ist der Fermenter. In diesem Behälter findet der Vergärungsprozess statt. Das Substrat wird hierfür aus der Vorgrube geliefert. In den Behälter werden in der Regel Rührwerke eingebaut, die das Substrat homogenisieren. Außerdem wird durch die gleichmäßigen Rührbewegungen den Mikroorganismen eine gute Nährstoffversorgung ermöglicht und die Gasentwicklung gefördert.

Das entstandene Gas wird in der Haube des Fermenters über dem Substrat gespeichert. Integrierte Gasspeicher im Fermenter wie auch externe dienen zum Ausgleich von Schwankungen zwischen Gasproduktion und Gasverbrauch. Die Gasspeicherkapazitäten liegen zwischen ein oder zwei Tagesproduktionen.

Das abgefaulte Substrat im Fermenter gelangt in das Gärrückstandslager. Der hierfür verwendete Nachgärbehälter besitzt nach BImSchG ab Inbetriebnahmejahr 2009 eine gasdichte Abdeckung, wodurch Biogas wiederholt gewonnen wird. Der Substratrückstand der Vergärung wird unter Berücksichtigung des Düngerechts als Wirtschaftsdünger Ackerflächen zugeführt (FNR, 2013, S. 24 ff.).

Die Gasmenge bzw. -ausbeute, der Biogasertrag [NI/kg oTM], ist abhängig von der Verweilzeit des Substrates. Die Verweilzeit ist ein Parameter der effizienten Energieumwandlung. Dieser beschreibt diejenige Dauer, die das Substrat in einem Gärbehälter (Fermenter bzw. Nachgärer) verbleibt. Je länger die Verweilzeit, desto größer wird die Gasausbeute pro Kilogramm organischer Trockenmasse. Sie wird in Tagen [d] angegeben.

Die sogenannte hydraulische Verweilzeit wird über das Verhältnis zwischen dem Nettofermentervolumen bzw. Nettogärvolumen (Summe: Nettogärvolumen [m<sup>3</sup>]) und die zugeführte Substratmenge, die Substratmenge [m<sup>3</sup>] berechnet (Besgen, 2005, S. 67). Das nutzbare Gärvolumen, Nettogärvolumen, ist bei diesem Umwandlungsprozess entscheidend (KTBL, 2009, S. 50). Ist dieses nicht ausreichend vorhanden, um die produzierte Gasmenge zu speichern, wird der Abbauprozess der Mikroorganismen gehemmt. Wodurch wiederum der Gasertrag in der Summe sinkt (Böttchen, 2013, S. 288).

$$\text{hydraulische Verweilzeit [d]}: \frac{\text{Nettogärvolumen [m}^3\text{]}}{\text{zugeführte Substratmenge [m}^3\text{/d]}}$$

Eine kritische Verweilzeit beträgt  $\leq 20$  Tage. Ist die Verweildauer geringer, wird das aktive Ausspülen von Bakterienpopulationen des Bestandes der Mikroorganismen gefördert. Die gesamte hydraulische Verweilzeit im gasdichten System muss nach der Novellierung des EEG 2012 mind. 150 Tage betragen, wenn der Gülleanteil unter 100 % liegt und die Gärbehälter mit einer Planhaube gasdicht abgedeckt sind (vgl. Abschnitt 2.2.2.3). Des Weiteren gibt der Verband deutscher Ingenieure einen gleich hohen Richtwert vor (VDI, 2010, S. 34). Bei einer kurzen Verweilzeit werden besonders leicht abbaubare Stoffe methanisiert. Bei längeren Verweilzeiten hingegen können zusätzlich schwer abbaubare Stoffe umgewandelt werden (Osteroth, 1992, S. 233). Woraus ergibt sich ein sich ein höherer Gasertrag in Summe wodurch eine effiziente Energieumwandlung und Substratausnutzung gefördert wird.

NawaRo besitzen in der Regel einen schwer abbaubaren Rohfaseranteil. Demnach sollte das Substrat unter Berücksichtigung einer langen Verweilzeit effizient genutzt werden, um die variablen Kosten der Anlage möglichst niedrig zu halten. Die Dauer der Verweilzeit ist somit für die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage bedeutsam.

Das erzeugte Biogas muss vor der Nutzung im BHKW gereinigt werden, um Korrosionsschäden an den BHKW-Motoren zu verhindern. Das gereinigte Biogas wird anschließend in den Verbrennungsmotor geleitet (FNR, 2013, S. 26).

Motorkraftwerke wie das BHKW nutzen chemische Energie aus dem Methan. Durch die Energieumwandlung mithilfe des Verbrennungsmotors entsteht mechanische Energie. Im Generator wird die mechanische Energie in elektrische umgesetzt. Die Energiegewinnung erfolgt über Kopplung der gleichzeitigen Erzeugung elektrischer Energie und Heizwärme (KWK). Die ent-

standene Wärme wird für die Prozessphasen im Vergärungsprozess und u.a. für die Raumbeheizung von Stallungen genutzt.

### 4.1.2 Verfahrenstechnik im BHKW

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die zwei gebräuchlichsten Motor-Verfahrenstechniken eingegangen und innovative Verfahrenstechniken genannt.

Die zwei häufig eingesetzten Verfahrenstechniken der Biogasverstromung sind Gas- und Zündstrahl-BHKW. Das Gas-BHKW arbeitet nach dem Otto-Prinzip und ist demnach ein Fremdzündungsmotor, deren Zündung durch Zündkerzen erfolgt. Der Fremdzündungsmotor besitzt hohe Verbrennungstemperaturen. Demnach nimmt die thermische Energie der KWK einen größeren Anteil im Vergleich zur elektrisch erzeugten Energie ein. Das Verbrennungsverfahren nach dem Otto-Prinzip wird auf Grund der einfachen, kostengünstigen Fertigung in Leistungsbereichen von 15 kW<sub>el</sub> bis zu 2 MW<sub>el</sub> eingesetzt (elektrische Wirkungsgrad: 30-41 %).

Zündstrahl-BHKW arbeiten nach dem Diesel-Prinzip und besitzen nach diesem Selbstzündungsmotoren mit Einspritzdüse. Auf Grund der chemischen Eigenschaft von Biogas ist eine selbstständige Zündung schwierig zu realisieren. Deshalb wird ein zweiter flüssiger Kraftstoff, das Zündöl, verwendet. Somit wird das Luftbiogasgemisch wie beim Ottomotor außermotorisch gebildet und nicht wie üblicherweise in einem Dieselmotor innermotorisch. Nach der Regelung des EEG 2009 dürfen Neuanlagen, die im Jahr 2007 in Betrieb gingen, kein fossiles Zündöl verwenden. Demzufolge entstanden Kosten für die Anlagenumrüstung auf Pflanzenöle. Nach Angaben der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft war ein Rückgang der Zündstrahl-BHKW zu vernehmen (LfL, 2011, S. 2). Diese Verstromungstechnik wird bei Anlagen mit Leistungen von 40 kW<sub>el</sub> bis 540 kW<sub>el</sub> eingesetzt (elektrische Wirkungsgrad: 35-45 %) (KTBL, 2009, S. 116).

Innovative Verfahrenstechnologien werden seit der Novelle 2009 verstärkt gefördert, um geringere Emissionswerte zu erreichen und auf Lastschwankungen im Stromnetz einzugehen (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Zu den innovativen Anlagentechniken zählen Brennstoffzellen, Gasturbinen und Organic-Rankine-Cycle-Anlagen (ORC).

Brennstoffzellen wandeln die chemisch gebundenen Energie, Methan, durch elektrokatalytische Verbrennung in elektrische Energie um. Vorteil dieses Verfahrens ist die direkte Umwandlung chemischer in elektrische Energie. Hierbei entstehen keine Stickoxide NO<sub>x</sub>, unverbrannte Kohlenwasserstoffe C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> und Partikelemissionen z.B. Feinstaub wie in den oben genannten Verbrennungsmotoren, insbesondere den Selbstzündungsmotoren. (elektrischer Wirkungsgrad: 40-55 %) (Kurzweil, 2013, S. 4 ff., S. 24).

Organic-Rankine-Cycle-Anlagen (ORC) werden nach dem Verfahren der Dampfturbine betrieben. Die wesentlichen Unterschiede sind jedoch, dass anstelle von Wasserdampf organische Flüssig-



keiten bei geringeren Temperaturen (95-15 °C) verdampfen. Demnach erfolgt eine maximale Nutzung der Prozesswärme. Ein weiterer Vorteil ist, die Anlagen sind teillastfähig, da geringere Temperaturdifferenzen zwischen Eingang und Ausgang im Vergleich zu Wasserdampfturbinen entstehen. Demzufolge wird der Gesamtwirkungsgrad der Biogasanlage erhöht. (KTBL, 2009, S. 134).

Im Abschnitt 4.2 (vgl. Abschnitt 4.2) werden auf die Problematik der unvollständigen Auslastung der Verfahrenstechnik zur Biogaserzeugung und somit auf die Volllaststunden eingegangen.

### 4.1.3 Anlagenkonzepte und Verfahrensmerkmale

Um Biogas zu erzeugen werden unterschiedliche Anlagenkonzepte angewendet. Eine Differenzierung dieser Konzepte erfolgt über die unterschiedlichen Verfahrensmerkmale wie Anzahl der Prozessphase, Prozesstemperaturen und Trockensubstanzgehalte der Substrate. Diese Merkmale werden im Nachfolgenden erklärt (FNR, 2013, S. 22 f.).

#### *Anzahl der Prozessphase*

Der Vergärungsprozess läuft in vier Phasen ab. Diese Phasen finden entweder in einem Behälter statt, dem einstufigen Verfahren oder in zwei bzw. mehreren Behältern und somit entsteht das zwei- oder mehrstufige Verfahren. In den zuletzt genannten Verfahren erfolgt eine räumliche Trennung der Verflüssigung-/Versäuerungsphase und der Essigsäurebildungs-/Methanbildungsverfahren. Wodurch die Prozessbedingungen besser auf die jeweilige Phase abgestimmt werden.

#### *Prozesstemperaturen*

Die Lebensbereiche von Mikroorganismen sind von drei Prozesstemperaturen abhängig. Allerdings wird eine thermophile Vergärung auch mit einer mesophilen Prozessphase kombiniert. Im mesophilen Bereich ist der Vergärungsprozess stabiler und der Prozesswärmebedarf geringer im Vergleich zur thermophilen Vergärung.

- psychrophil 15-25°C
- mesophil 32-38°C
- thermophil 42-55°C

#### *Art der Beschickung*

Die Verfahrensmerkmale der Beschickung unterteilen sich in diskontinuierliche, quasi-kontinuierliche und kontinuierliche Beschickung. Bei der diskontinuierlichen Beschickung verbleibt das einmalig eingefüllte vollständige Substrat die gesamte Verweilzeit (4-8 Wochen) im Fermenter. Dieses Verfahren wird vorwiegend bei Trockenvergärungsanlagen angewendet.

Substrateinspeisungen, die mind. einmal pro Tag erfolgen, bzw. mehrmals täglich in kleineren Mengen mit einer geringeren Verweilzeit (3-4 Wochen), erbringen kontinuierlich Gaserträge. In Deutschland werden etwa 70 % der Anlagen nach dem quasikontinuierlichen bzw. kontinuierlichen Verfahren betrieben. Hierfür werden Anlagensysteme wie Durchfluss- und Durchfluss-Speicher-Anlagen verwendet.

Durchfluss-Anlagen besitzen ein gleichmäßigen Befüll- und Abpump-Rhythmus. Im Idealfall wird die gleiche Menge Substrat von der Vorgrube in den Fermenter eingespeist, die wiederum als Gärrestmenge in einen geeigneten Behälter abgepumpt wird. Bei diesem Verfahren kann eine gleichmäßige Gasproduktion erreicht werden.

Die Durchfluss-Speicher-Anlage besitzt eine zusätzliche Abdeckung auf dem Gärrestbehälter zusätzlich und bietet demnach eine weitere Produktionsstätte für Biogas (HEI, 2013).

#### *Trockensubstanzgehalt der Substrate*

Der Trockensubstanz (TS) -Gehalt unterscheidet zwischen Nass- oder Feststromvergärung. Der Orientierungswert für die Nassfermentation liegt bei  $< 15\%$ . In Deutschland besitzen Biogasanlagen vorzugsweise Nassfermenter mit Rundbehälter. Dies ist auf den Substrateinsatz von Gülle zurückzuführen, da das Substrat nur im feuchten Zustand pump- und rührfähig ist.

Die Nassfermentation wird in liegende und stehende Fermenter unterteilt. Der liegende Fermenter zeichnet sich durch eine zylindrische Form aus. Diese Stahltanks besitzen ein Fermentationsvolumen bis zu  $800\text{ m}^3$ , demzufolge werden sie als Vorfermenter für größere Anlagen oder als Hauptfermenter für kleinere Anlagen eingesetzt. Das zugeführte Substrat durchläuft als Pfropfen die Fermenterlänge, wodurch Kurzschlussströmungen verhindert werden. Des Weiteren kann ein einheitlicher Abbau der Substrate mit vorgegebener Verweilzeit erreicht werden (KTBL, 2009, S. 26).

Der stehende Fermenter ist die häufiger verwendete Bauform. Ein Fermentervolumen bis zu  $30.000\text{ m}^3$  ist verwendbar. Die angestrebte Verweilzeit kann auf Grund des Volumens und der zugeführten Substratmenge abgeschätzt werden. Der Gasertrag wird von der Verweilzeit und von der abhängigen Temperatur mitbestimmt. Bei niedrigen Temperaturen werden höhere Gaserträge erzielt, da die Mikroorganismen je höher die Temperatur ist, umso empfindlicher auf Temperaturschwankungen reagieren. Bei hohen Temperaturen (thermophil) ist die Geschwindigkeit des Abbauprozesses des Substrates höher, demnach die Verweilzeit kürzer. Eine längere Verweilzeit wirkt sich jedoch positiv auf den Gasertrag aus. Ein hoher Gasertrag ist allerdings mit Investitionskosten verbunden, da ein größeres Fermentervolumen benötigt wird.

Das Verfahren der Trockenvergärung ( $> 30\%$  TS) wird in Betrieben verwendet, die über sogenannte stapelbare und demnach trockene Biomasse verfügen. In der Trockenvergärung werden Substrate wie Festmist, nachwachsende Rohstoffe, Ernterückstände und Bioabfälle verwendet. Im Gegensatz zur Nassvergärung wird das Substrat auf Grund der Konsistenz nicht ständig

durchmischt. Für den Vergärungsprozess wird ein feuchtes Milieu benötigt, demnach müssen die Substrate mit Flüssigkeit vor der Vergärung oder mit Gärflüssigkeit während des Prozessvorgangs besprüht werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass sich sogenannte Ausgasungen in nicht durchmischten Regionen ergeben. Dies bedeutet, in bestimmten Zonen ist der Wassergehalt zu hoch bzw. zu niedrig und die Methanproduktion wird eingeschränkt. Demnach wird beim bei der Nassvergärung eine gleichmäßigere Gasproduktion erreicht (FNR, 2013, S. 22 f.).

## 4.2 Bekannte Schwachstellen des Prozesses

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen wird einerseits durch die effiziente Nutzung von Substraten und andererseits von der Laufzeit des BHKW pro Jahr unter Höchstleistung, den Volllaststunden, bestimmt. Die effiziente Nutzung der Substrate wurde bereits durch die hydraulische Verweilzeit erläutert (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Die Volllaststunden werden berechnet mit dem Quotienten aus tatsächlich erreichbarer Arbeit [kWh] pro Jahr und der maximal zu erreichenden Leistung, der Nennleistung [ $kW_{el}$ ]. Demnach verdeutlichen die Volllaststunden, wie viel Stunden die Biogasanlage die maximale erreichbare Leistung erbringt und somit maximal ausgelastet ist. Die Volllaststunden einer Biogasanlage sind somit ein Parameter für effiziente Stromerzeugung.

$$\text{Volllaststunden [h]} = \frac{\text{erreichte elektrische Arbeit [kWh]}}{\text{elektrische Nennleistung [kW}_{el}\text{]}}$$

Mit der elektrischen Nennleistung im Nenner wird ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Leistungsklassen möglich. Da die Leistungsgröße aus der elektrischen Arbeit heraus dividiert wird.

Die maximal erreichte Anzahl an Volllaststunden, die eine Biogasanlage erreichen kann beträgt 8760 Stunden, die max. Stundenanzahl, die ein Jahr besitzt. Auf Grund von verspäteten Substratlieferungen und oder Qualitätsmängeln im Substrat werden bestimmte Methangehalte nicht erreicht, womit eine geringere elektrische Leistung, Summe der kWh, verbunden ist. Des Weiteren müssen Wartungsarbeiten im BHKW durchgeführt werden, wodurch Ausfallstunden entstehen und von dieser Anlage kein elektrischer Strom ins Netz eingespeist wird. Daher wird davon ausgegangen, dass die maximal erreichte Anzahl von Volllaststunden selten erreicht wird. Um zu beurteilen, ob eine Anlage effizient Biogas produziert wird die Kenngröße 7000 Volllaststunden mitberücksichtigt. Eine Biogasanlage, die  $\geq 7000$  Volllaststunden im Jahr erreicht, ist weitgehend ausgenutzt. Hingegen besitzen Anlagen unter 7000 Volllaststunden freie Kapazitäten (Rohring et al., 2011, S. 19)

Volllaststunden messen die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage, denn jedes BHKW einer Biogasanlage besitzt Fixkosten für Investition (technologische Erneuerungen) und Wartung, diese variieren zwischen den Anlagengrößen. Generell fallen jedoch die Kosten pro erzeugte Kilowatt-

stunde Strom umso geringer aus, je höher die Anzahl der Volllaststunden ist. Die erzeugte Kilowattstunde Strom wird je nach Leistungsklasse nach dem EEG vergütet (AEE, 2013a, S. 1 ff.).

Auf Grund dieser Tatsachen kann von Schwachstellen im Prozess Biogaserzeugung ausgegangen werden, wenn die Volllaststunden einer Biogasanlage weit unter 7000 Stunden liegt. Dies ist wiederum negativ für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage.

Des Weiteren ist die Auslastung der Kraftwerke relevant für den zukünftigen Netzausbau in Deutschland. Anlagen, die ausgelastet sind, tragen dazu bei den Strombedarf aus Erneuerbaren-Energien zu decken.

### 4.3 Substrateinsatz

Der Gasertrag wird durch technologische Kennziffern, die im vorigen erläutert wurden, bestimmt. Die Steigerung der Gaserträge wird jedoch von Grund auf durch die Gasbildungspotenziale der verschiedenen Substrate mit beeinflusst. Demzufolge wird in diesem Abschnitt auf den mengenbezogenen Substrateinsatz eingegangen und die unterschiedlichen Biogaserträge sowie die Methangehalte der Einsatzstoffe werden dargestellt.

In landwirtschaftliche Biogasanlagen können grundsätzlich alle organischen Substrate eingespeist werden, die in der Biomasse V definiert sind (vgl. Abschnitt 2.2.1). Um möglichst einen hohen Biogasertrag zu erlangen, ist jedoch die Berücksichtigung der Zusammensetzung des Substrate und die Verweilzeit entscheidend.

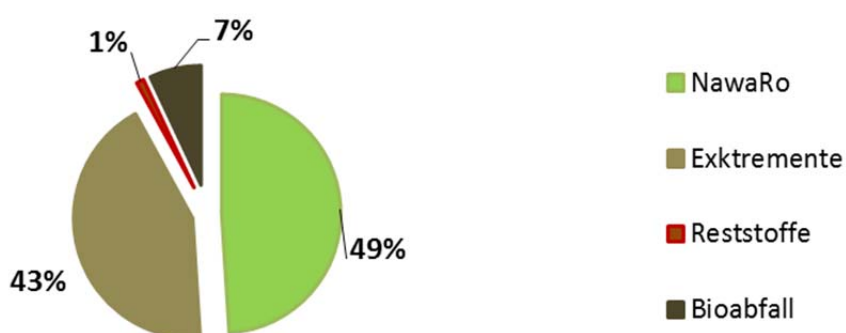
In der Anfangsphase bei neu gebauten Anlagen (1. - 7. Tag der Einspeisung) ist der Einsatz einer konstant bleibenden Substratzusammensetzung notwendig, damit keine ständige Neuanpassung der Mikroorganismen im Vergärungsklima erfolgt. Des Weiteren verursacht ein häufiger Wechsel der Substrate eine Erhöhung des Säureanteils im Vergärungsprozess, folglich wird die Methanproduktion gehemmt und der pH- Wert sinkt.

In einem stabilen Gärungsprozess stehen Säureproduktion und -abbau durch Methanbildner im Gleichgewicht. Der pH-Wert liegt dann im neutralen Bereich von 6,5-7,5 (Kaltschmitt und Hartmann, 2001, S. 648).

An die Anfangsphase schließt der reguläre Betrieb des Gärbehälters an. Hierbei dient die Verweilzeit (vgl. Abschnitt 4.1) als Parameter der effizienten Energieumwandlung. Anhand dieser wird der zeitliche Aufenthalt des Substrates bis zum Austausch gegen neues Substrat angegeben. Mit einer hohen Verweilzeit ist die Belastung im Gärbehälter wie dem Fermenter gering. Dies wird zurückgeführt auf den vollständigen stofflichen Substratabbau der Mikroorganismen, die für diesen genügend Zeit besitzen. Dadurch steigt die Gasausbeute (Dissemond et al., 1993, S. 83).

Für die Biogaserzeugung werden vor allem Energiepflanzen, Silomais, und tierische Substrate, Rinder- und Schweinegülle, verwendet. Nach Angaben der Betriebsumfrage 2011/12 wurden etwa 43 % tierische Exkrememente wie Gülle und fast zu 50 % Energiepflanzen eingespeist. Bioabfälle wurden zu etwa 7 % und Reststoffe zu etwa 1 % verwendet. Diese Abfälle und Reststoffe stammen aus der Lebensmittelindustrie und der landwirtschaftlichen Produktion (vgl. Abbildung 4) (DBFZ, 2012, S. 79). Demnach werden Speiseabfälle (Trester und Schlempe) und Landschaftspflegematerialien (Rasenschnitt) für die Versorgung von Biogasanlagen verwendet. Werden diese mit NawaRo kombiniert resultiert daraus die gemeinsame Einspeisung - Kofermentation (FNR, 2013, S. 20).

**Abbildung 4: Massebezogener Substrateinsatz in Biogasanlagen**



(DBFZ, 2012, S. 78)

Der größte Anteil mit 50 % bezieht sich auf NawaRo, diese setzen sich auf Mais, Getreide, Gräsern und Zuckerrüben zusammen. Wie bereits in Abschnitt 3.3 genannt besitzt Maissilage den größten Anteil mit etwa 70 %. Zu je rund 10 % sind Grassilage und Getreide Ganz-Pflanzen-Silage (GPS) vertreten. Den restlichen Anteil wird unter Getreidekorn, Zuckerrüben und Landschaftspflegematerial aufgliedert.

Anlagen mit Leistungen von 500 bis > 1000 kW<sub>el</sub> speisen überwiegend mit rund 60 % NawaRo ein. In der Leistungsklasse ≤ 70 kW<sub>el</sub> wird für die Biogaserzeugung zu rund 80 % Wirtschaftsdünger verwendet, welches auf die Novelle 2012 des EEG zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 2.2.2.3) (DBFZ, 2012, S. 80 f.).

Die im nachfolgenden dargestellten Biogaserträge und Methangehalte der Einsatzstoffe dienen als Richtwerte (vgl. Tabelle 3). Hierbei ist zu beachten, diese Werte basieren auf der Grundlage eines vollständigen Abbaus der Inhaltsstoffe im Gärbehälter. Demnach können Werte aus der Praxis durch unterschiedliche verfahrenstechnische Parameter von diesen abweichen. Nach Angaben des KTBL ist eine Sicherheitsabweichung von 10 % zu berücksichtigen.

**Tabelle 3: Richtwerte der Gasausbeute**

Substrat	Eigenschaften	TM %	davon oTM %	Biogasertrag NI/kg oTM	Methan- gehalt %	
<b>Wirtschaftsdünger</b>						
Geflügelmist	abhängig vom Stroh-/Kot- Verhältnis wenig gelagert mit Futterrest	40	75	500	55	
Rindermist		25	85	450	55	
Rindergülle		10	80	380	55	
Schweinegülle		6	80	420	60	
<b>NawaRo</b>						
Maissilage	mittlerer Kornanteil	33	95	650	52	
CCM		65	98	730	52	
Sorghumsilage		28	90	610	52	
Getreide-GPS		33	95	620	53	
Grünroggensilage		25	90	600	53	
Sonnenblumensilage		25	90	520	57	
Zuckerrübensilage		oTM säurekorregiert	23	90	700	52
Futterrübensilage		oTM säurekorregiert	16	90	700	52
Getreidekorn		gequetscht/gemahlen	87	97	730	52
Körnermais		gequetscht/gemahlen	87	98	730	52
Stroh		kurzgehäckselt	86	90	400	52
Grassilage			35	90	600	53
Landschaftspflegegras			50	85	200-400	50
<b>Substrate aus der Weiterverarbeitung und organische Reststoffe</b>						
Kartoffelschlempe		6	85	670	54	
Getreideschlempe		6	94	700	55	

(KTBL, 2009, S. 94)

Die Methangehalte der Substrate liegen im Bereich 50 bis 60 %. Wirtschaftsdünger besitzt bezogen auf den Biogasertrag (Rindergülle: 380 NI/kg oTM davon 55 % Methan) niedrigere Methangehalte im Vergleich zu den NawaRo (Maissilage: 650 NI/kg oTM davon 52 % Methan). Der Wirtschaftsdünger ist jedoch für ein gutes Mikroklima wichtig, da in diesen Substraten methanproduzierende Mikroorganismen existieren und ein feuchtes Milieu auf Grund der oTM-Gehalte geschaffen wird (vgl. Tabelle 3 und Abschnitt 4.1.3).

## 5 Methode und empirisches Material

Im diesem Abschnitt werden die statistischen Methoden und die Datengrundlage dieser empirischen Arbeit dargestellt. Die hierfür angewendeten Analysen sind strukturprüfende Verfahren zur Ermittlung von Mittelwertdifferenzen.

### 5.1 Strukturprüfende Verfahren zur Mittelwertdifferenz

Strukturprüfende Verfahren finden Anwendung, um kausale Zusammenhänge zu analysieren und die Stärke dieses Zusammenhanges herauszufinden. Um diese Verfahren anzuwenden, wird vorausgesetzt, dass zuvor eine sachlogische Betrachtung erfolgte. Die Überprüfung dieser Vorstellung resultiert durch die Aufteilung der empirischen Daten in abhängige, erklärte und unabhängige, erklärende Variablen (Backhaus et al., 2011, S. 14 ff.).

Für die Ermittlung der Mittelwertdifferenz der abhängigen Variablen zwischen den Fallgruppen der unabhängigen Variablen werden die parametrischen Verfahren der  $t$ -Test unabhängiger Stichproben und die einfaktorielle Varianzanalyse verwendet. Hierbei wird ein nicht metrisches Skalenniveau, somit nominal oder ordinal, für die unabhängigen Variablen und ein metrisches Skalenniveau für die abhängige Variable vorausgesetzt. Diese Verfahren werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert. Die Analyse erfolgt mit der Statistik-Software SPSS 21.

#### 5.1.1 T-Test unabhängiger Stichproben

Die Anwendung des  $t$ -Tests erfolgt zwischen zwei unabhängigen Stichproben  $x_1, \dots, n_1$  und  $x_2, \dots, n_2$ . Die Mittelwertdifferenzen des untersuchten Merkmals werden auf Signifikanz getestet. Für die Fragestellung, wie wahrscheinlich ist ein empirisch entdeckter Mittelwert unter Betrachtung der theoretischen Differenzen, werden die Nullhypothese  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  bzw.  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  und weiter die Alternativhypothese  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  überprüft.

Je größer die Differenz der Mittelwerte ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass  $H_0$  verworfen wird und  $H_1$  angenommen wird. Die Differenz der Mittelwerte bildet den Stichprobenmittelwert  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ . Die Verteilung des Stichprobenkennwertes wird durch deren Streuung, dem Standardfehler der Mittelwertdifferenz  $\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$  geschätzt:

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_1^2 - \hat{\sigma}_2^2}{n_1 - n_2}}$$

$n_1$  = Beobachtungen in der Stichprobe 1  
 $\hat{\sigma}_1^2$  = geschätzte Varianz der Population 1  
 $n_2$  = Beobachtungen in der Stichprobe 2  
 $\hat{\sigma}_2^2$  = geschätzte Varianz der Population 2

Mit dem  $t_c$ -Werte und der standardisierte Verteilung als  $t$ -Verteilung wird die Analyse durchgeführt.

$$t_c(df) = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}}$$

Die  $t$ -Verteilung ist schmalgipfliger als die Standardnormalverteilung. Dies wird damit begründet, dass die Form der  $t$ -Verteilung (engl.: Student  $t$ -Verteilung) von der Stichprobengröße bzw. von den Freiheitsgraden  $df = n_1 + n_2 - 2$  ( $df$  = degrees of freedom) abhängt und folgendermaßen berechnet wird (Rasch et al., 2010, S. 45).

Die Nullhypothese  $H_0$  wird abgelehnt, wenn  $t_c > t^*$  ist. Beim zweiseitigen Test besteht prinzipiell die Möglichkeit Abweichungen der Nullhypothese in beide Richtungen zu testen.  $H_0$  wird abgelehnt, wenn  $t_c > t^*$  oder  $t_c < -t^*$  sind (Ramanathan, 2002, S. 54).

Der  $t$ -Test besitzt gewisse Voraussetzungen, um durchgeführt zu werden, diese werden im nachfolgenden aufgezählt:

- Das untersuchte Merkmal ist intervall- oder verhältnisskaliert.
- Die beiden Stichproben des untersuchten Merkmals sind normalverteilt.
- Die Populationsvarianzen, aus denen die beiden Stichproben stammen, sind gleich und somit liegt Varianzhomogenität vor.

Werden die Voraussetzungen erfüllt, sind die Ergebnisse des  $t$ -Tests verlässlich. Andererseits muss weiter betrachtet werden, ob die Stichprobe der beiden Gruppen annähernd dieselbe Größe besitzen oder die Stichprobengröße genügend Beobachtungen aufweist ( $n_1 = n_2 > 30$ ). Sind die Gruppen nicht zu klein oder gleich groß reagiert der  $t$ -Test robust gegenüber verletzten Voraussetzungen.

Die zweite Voraussetzung der Normalverteilung wird mit Hilfe von grafischen und statistischen Methoden durchgeführt. Für die graphische Methode wird das Histogramm und für die statistischen Methoden werden der Kolmogrov-Smirnov-Test und der Shapiro-Wilk-Test angewendet (Yazici und Yolacan, 2007, S. 182).

Die vorausgesetzte Varianzhomogenität wird durch den Levene-Test geprüft. Der Levene-Test der Varianzgleichheit wird auf Grundlage des  $F$ -Tests durchgeführt. Der  $F$ -Wert prüft, mit welcher



Wahrscheinlichkeit in der Grundgesamtheit eine Differenz zwischen den Varianzen vorliegt. Die Nullhypothese lautet hierbei, die Varianzen in der Grundgesamtheit sind gleich. Ist demnach die Wahrscheinlichkeit hoch, ist anzunehmen, dass die Varianzen in der Grundgesamtheit gleich sein können und die Nullhypothese wird nicht abgelehnt. In SPSS erfolgt dies automatisch durch den Welch-Test. Dieser nimmt eine Korrektur der Freiheitsgrade vor. Ausgehend von dem Standardfehler der Mittelwertdifferenz  $\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$  werden die Freiheitsgrade  $df_{korr}$  wie folgt berechnet (Garbade, 2012, S. 33)

$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{n_1 - n_2}}$$

$$df_{korr} = \frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\sigma_1^4}{n_1^2 * (n_1 - 1)} + \frac{\sigma_2^4}{n_2^2 * (n_2 - 1)}}$$

- $n_1$  = Beobachtungen in der Stichprobe 1
- $\hat{\sigma}_1^2$  = geschätzte Varianz der Population 1
- $n_2$  = Beobachtungen in der Stichprobe 2
- $\hat{\sigma}_2^2$  = geschätzte Varianz der Population 2

Mit diesen korrigierten Freiheitsgraden wird wie zuvor der t-Test durchgeführt.

### 5.1.2 Einfaktorielle Varianzanalyse

Die Varianzanalyse (engl.: analysis of variance) wird angewendet, um zu entscheiden, ob sich die Werte einer abhängigen Variablen in verschiedenen Fallgruppen, den Faktorstufen, signifikant unterscheiden. Dies erfolgt mit Hilfe des  $F$ -Testes. Varianzanalysen finden Verwendungen bei Faktoren mit mehr als zwei Faktorstufen. Bei einem Faktor mit zwei Faktorstufen würde der  $t$ -Test Anwendung finden. Die Varianzanalyse ist jedoch auch befähigt einen Faktor mit zwei Faktorstufen zu analysieren. Auf Grund dieses Zusammenhanges wird der  $t$ -Test auch als Spezialfall der einfaktoriellen Varianzanalyse bezeichnet. Hingegen ist die Anwendung des  $t$ -Tests bei einem Faktor mit mehr als zwei Faktorstufen ungültig.

Werden mehrere  $t$ -Tests hintereinander durchgeführt entsteht eine  $\alpha$ -Fehlerkumulierung. Jeder Test testet zwar gegen das festgelegte Signifikanzniveau, allerdings summiert sich dieses zu einem Gesamt-  $\alpha$ -Niveau auf:

$$\alpha_{gesamt} = 1 - (1 - \alpha_{Test})^m$$

$\alpha_{gesamt}$  = kumuliertes  $\alpha$ -Niveau  
 $\alpha_{Test}$  =  $\alpha$ -Niveau in jedem einzelnen Test  
 $m$  = Anzahl der durchgeführten Einzeltests

Des Weiteren erhöht sich die Anzahl der erforderlichen t-Tests überproportional zu der Anzahl der betrachteten Mittelwerte.

$$m = \frac{k - (k - 1)}{2}$$

$m$  = Anzahl der benötigten t-Tests  
 $k$  = Anzahl der betrachteten Mittelwert

Demnach ist der  $\alpha$ -Fehler von der Anzahl der durchgeführten Tests und dem festgelegten  $\alpha$ -Niveau abhängig. Womit die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese fälschlicherweise zurückgewiesen wird, mit zunehmender Anzahl der Tests ansteigt (Rasch et al., 2010, S. 2 ff.) Die Varianzanalyse besitzt hierfür statistische Tests, die dieses Problem berücksichtigen. Diese Tests werden im späteren Teil des Abschnittes behandelt. Die Varianzanalyse basiert darauf, im Modell erfasste Einflüsse von nicht erfassten Einflüssen zu trennen. Demnach wird die Gesamtabweichung aus zwei Komponenten gebildet: Erklärte Abweichung und nicht erklärte Abweichung (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4: Einfaktorielle Varianzanalyse: Aufteilung der Gesamtabweichung**

Gesamtabweichung	= Erklärte Abweichung	+ nicht erklärte Abweichung
Summe der quadrierten Gesamtabweichungen	= Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den Faktorstufen	+ Summe der quadrierten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen
$\sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K (y_{gk} - \bar{y})^2$ $SS_{t(total)}$	$\sum_{g=1}^G K (\bar{y}_g - \bar{y})^2$ $SS_{b(between)}$	$\sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K (y_{gk} - \bar{y}_g)^2$ $SS_{w(within)}$

$y_{gk}$  = Beobachtungswert

$g$  = Kennzeichnung einer Faktorstufe als Ausprägung einer unabhängigen Variablen ( $g = 1, 2, \dots, G$ )

$k$  = Kennzeichnung des Beobachtungswertes innerhalb einer Faktorstufe ( $k = 1, 2, \dots, K$ )

$\bar{y}$  = Gesamtmittelwert aller Beobachtungswerte

$\bar{y}_g$  = Mittelwert der Beobachtungswertes innerhalb einer Faktorstufe

$y_{gk}$  = Beobachtungswert

Die genannten Analyseschritte beruhen auf folgendem Modell der einfaktoriellen Varianzanalyse:

$$y_{gk} = \mu + \alpha_g + \varepsilon_{gk}$$

$y_{gk}$  = Beobachtungswert

$g$  = Kennzeichnung einer Faktorstufe als Ausprägung einer unabhängigen Variablen ( $g = 1, 2, \dots, G$ )

$k$  = Kennzeichnung des Beobachtungswertes innerhalb einer Faktorstufe ( $k = 1, 2, \dots, K$ )

$\mu$  = Mittelwert der Grundgesamtheit

$\alpha_g$  = tatsächlicher Einfluss des Faktors mit ( $g = 1, 2, \dots, G$ )

$\varepsilon_{gk}$  = Zufallseffekt durch nicht im Experiment kontrollierte Einflüsse

Der Mittelwert der Grundgesamtheit  $\mu$  wird durch den Gesamtmittelwert aller Beobachtungen  $\bar{y}$  geschätzt. Der tatsächliche Einfluss  $\alpha$  der Stufe des Faktors  $g$  wird durch die Subtraktion des Gesamtmittelwerts der Grundgesamtheit und dem Mittelwert des Beobachtungswertes einer Faktorstufe geschätzt ( $\bar{y}_g - \bar{y}$ ).

Mit dem F-Test wird ermittelt, ob ein Einfluss von der unabhängigen Variablen ausgeht. Um zu überprüfen, zwischen welchen Faktorstufen signifikante Unterschiede vorhanden sind, werden sogenannte Post-hoc-Tests verwendet. Diese Signifikanztests überprüfen gleichsam wie der  $t$ -Test, welcher Mittelwert sich signifikant unterscheidet. Dabei wird jedoch die  $\alpha$ -Fehlerkumulierung bereinigt. Wie auch bei diesen Tests gelten die Voraussetzungen des  $t$ -Tests (vgl.

Abschnitt 5.1.1). Allerdings besteht die Möglichkeit, dass bei der Annahme der Varianzheterogenität ein konservativer Test verwendet wird, der dies berücksichtigt.

Der konservative Scheffé-Test ist ein Signifikanztest, der bei Annahme der Varianzhomogenität verwendet wird. Er basiert auf der  $F$ -Verteilung. Im Vergleich zum Tukey HSD-Test kann die Anzahl der Beobachtungen in den Stichproben ungleich verteilt sein. Dieser Scheffé-Test errechnet die kritische Mittelwertdifferenz. Bei diesem Test wird der kritische  $F$ -Wert  $F_{krit}$  verwendet, um die kritische Differenz zu errechnen:

$$F_{krit} = (r - 1) * F_{(r-1, n-r, 1-\alpha)}$$

$r$  = Anzahl der Gruppen  
 $n$  = Gesamtstichprobengröße  
 $\alpha$  = Irrtumswahrscheinlichkeit

$$D_{Scheffe} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_w^2 * 2 * (r - 1) * F_{r-1, n-r, 1-\alpha}}{n}}$$

$D_{Scheffe}$  = kritische Mittelwertdifferenz  
 $\hat{\sigma}_w^2$  = geschätzte Fehlervarianz  
 $r$  = Anzahl der Gruppen  
 $n$  = Gesamtstichprobengröße  
 $\alpha$  = Irrtumswahrscheinlichkeit

Auf Grund der kritischen Mittelwertdifferenz  $D_{Scheffe}$  wird eine Kumulierung des  $\alpha$ -Fehler verhindert. Ist die tatsächliche Differenz zwischen zwei Gruppen größer als die kritische Differenz, existiert ein signifikanter Unterschied (Bühner und Ziegler, 2009, S. 515)

Besteht die Annahme, dass die Populationsvarianzen ungleich sind und Varianzheterogenität vorliegt, wird der konservative Tamhane-T2-Test angewendet. Dieser wendet paarweise Vergleichstests auf der Grundlage eines T-Tests an (Brosius, 2011, S. 511)

Ein relevantes Maß neben dem Signifikanztest ist in der Varianzanalyse die Effektstärke Omega-Quadrat  $\Omega^2$ . Dieser misst den erklärenden Varianzanteil der abhängigen Variable, der durch den Faktor erreicht wurde. Omega-Quadrat  $\Omega^2$  wird durch kleines Omega-Quadrat  $\omega^2$  gemessen. Um  $\omega^2$  zu berechnen, wird zunächst kleines f-Quadrat  $f^2$  benötigt (Rasch et al., 2006, S. 37 ff.):

$$f^2 = \frac{(F_{df_{Zähler}, df_{Nenner}} - 1) * df_{Zähler}}{N}$$

$F_{df_{Zähler}, df_{Nenner}}$  = F-Wert, der aus Freiheitsgraden  $df$  des Zählers und Nenner basiert  
 $df_{Zähler}$  = Freiheitsgrade des Zählers  
 $N$  = Gesamtstichprobengröße

$$\omega^2 = \Omega^2 = \frac{f^2}{1 + f^2}$$

Die Ergebnisbewertung findet anhand der Konventionen nach Cohen (1988) für Effektstärken statt:

- Kleiner Effekt:  $\Omega^2 = 0,01$
- Mittlerer Effekt:  $\Omega^2 = 0,06$
- Großer Effekt:  $\Omega^2 = 0,14$

## 5.2 Datengrundlage

In diesem Abschnitt werden der Datenursprung und die Datenzusammenfassung beschrieben.

Die Daten wurden von OmniCert GmbH, mit Sitz in Bayern, unter Absprache mit dem Geschäftsführer Thorsten Grantner im Rahmen dieser Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Die Datengrundlage basiert auf geprüften Umweltgutachten von Biogasanlagen. Diese Umweltgutachten werden erstellt, um die EEG-Vergütungswürdigkeit der Anlage zu erfassen. Durch diese Gutachten ergibt sich eine detaillierte Datenbasis, die in diesem Umfang anhand einer Befragung nicht entstanden wäre. Die genauen Mengenangaben (Tonnen pro Jahr) der eingespeisten Substrate ermöglichen weitere Berechnungen.

Der zur Verfügung stehende Datensatz umfasst Anlagen, die in den Jahren 2012 und 2013 begutachtet wurden. Da keine Anlage sowohl in 2012 als auch im darauffolgenden Jahr überprüft wurde und somit keine doppelte Erhebung stattfand, wurden die Datensätze zusammengefügt (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5: Betrachtung der doppelten Fälle in den Erhebungsjahren**

Erhebungsjahr	Beobachtungen	Häufigkeit	Prozent [%]	Kumulierte Prozenze [%]
2013	Primärer Fall	60	100	100
2012	Doppelter Fall	6	0,8	0,8
	Primärer Fall	703	99,2	100
	Gesamt	709	100	
Gesamt	Summe	769	100	

(Eigene Auswertung)

Insgesamt besitzt der Datensatz 769 Biogasanlagen, davon wurden 60 im Jahr 2013 und 709 im Jahr 2012 geprüft. Im Erhebungsjahr 2012 existieren 6 doppelte Fälle, die identisch in der elektrischen installierten Anlagenleistung und im Substratanteil zu einem anderen Fall im Erhebungsjahr 2012 sind. Dies kann auf die Erstellung der Umweltgutachten zurückgeführt werden. Für Biogasanlagen, die an einem Satelliten-BHKW (vgl. Abschnitt 3.2) angeschlossen sind, wird jede Anlage im einzeln betrachtet.

Die Datensätze von 2012 und 2013 getrennt zu betrachten und die Biogaserzeugung miteinander zu vergleichen wurde auf Grund der Angaben zur Erstinbetriebnahme abgelehnt. Die Erstinbetriebnahme mit dem Erneuerbaren-Energie-Gesetzes gibt Auskunft, nach welcher EEG-Novellierung die Biogasanlage vergütet wird. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt eine 20-jährige Festvergütung, demnach ist von einer kontinuierlichen Biogaserzeugung auszugehen. Die vergleichende Betrachtung zwischen den Erhebungsjahren zeigt keine relevanten Unterschiede in der Erstinbetriebnahme mit dem EEG. Im Erhebungsjahr 2013 werde etwa 77 % der Biogasanlagen nach dem EEG 2009 vergütet und im Erhebungsjahr 2012 liegt der Anteil bei über 86 % (vgl. Anhang 7). Demnach kann der Erhebungszeitraum für die weitere Analyse vernachlässigt werden

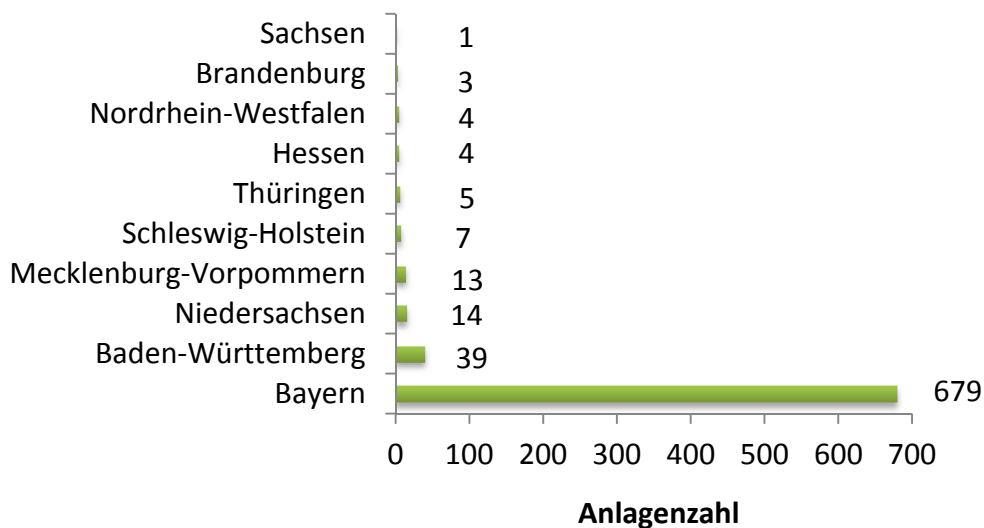
## 6 Deskriptive Betrachtung der Daten

Nachfolgend werden die Anlagenverteilung und die verschiedenen eingespeisten Substrate betrachtet. Im abschließenden Abschnitt werden die Parameter effizienter Biogaserzeugung vorgestellt.

### 6.1 Regionale Verteilung der Anlagen des Datensatzes

Um die Verteilung der Anlagenzahl betrachten zu können, wird die Variable PLZ, die die ersten drei Stellen der Postleitzahl des jeweiligen Standortes der Biogasanlage besitzt, nach Bundesländern umcodierte. Daraus ergibt sich, dass die im Datensatz enthaltenen Biogasanlagen mehrheitlich in Bayern stehen (vgl. Abbildung 5).

**Abbildung 5: Verteilung der Anlagen über die Bundesländer**



(Eigene Auswertung)

Biogasanlagen aus 10 Bundesländern wurden geprüft, wovon etwa 88 % der Anlagen in Bayern vorzufinden sind. Mit weitem Abstand folgt Baden-Württemberg mit 5 %. Daraus wird sichtbar, dass sich die Betrachtung effizienter Unterschiede in der Biogaserzeugung zwischen regionalen Agrarstrukturen in Deutschland als schwierig erweist.

## 6.2 Eingespeistes Substrat

Der Datensatz enthält die detaillierte jährliche Substrateinspeisung jeder Anlage. Da einige Substrate nur in geringem Umfang und selten in Biogasanlagen eingespeist werden und andere zu den bekanntesten Hauptsubstraten zählen (vgl. Abschnitt 3.3 und 4.3) wurde analysiert, welche Substrate überwiegend von Biogasanlagebetreiber verwertet werden und welche bei der Einspeisung geringfügig verwendet werden. In den nächsten Abschnitten werden die Substrate in tierische und pflanzliche Substrate aufgegliedert.

### 6.2.1 Pflanzliche Substrate

Um die Fragestellung, welche Substrate überwiegend von Biogasanlagebetreiber verwendet werden, zu beantworten, wird die deskriptive Statistik erstellt. Hierbei interessiert die Anzahl der Biogasanlagen, die das jeweilige pflanzliche Substrat einspeist. Vorab wurden die pflanzlichen Substrate im Datensatz geordnet, da die einzelnen Angaben vergleichbar wie String-Variablen vorlagen. Daraus ergeben sich fünf Pflanzengruppen, wobei die Betrachtung nicht unter botanischen Merkmalen geschieht:

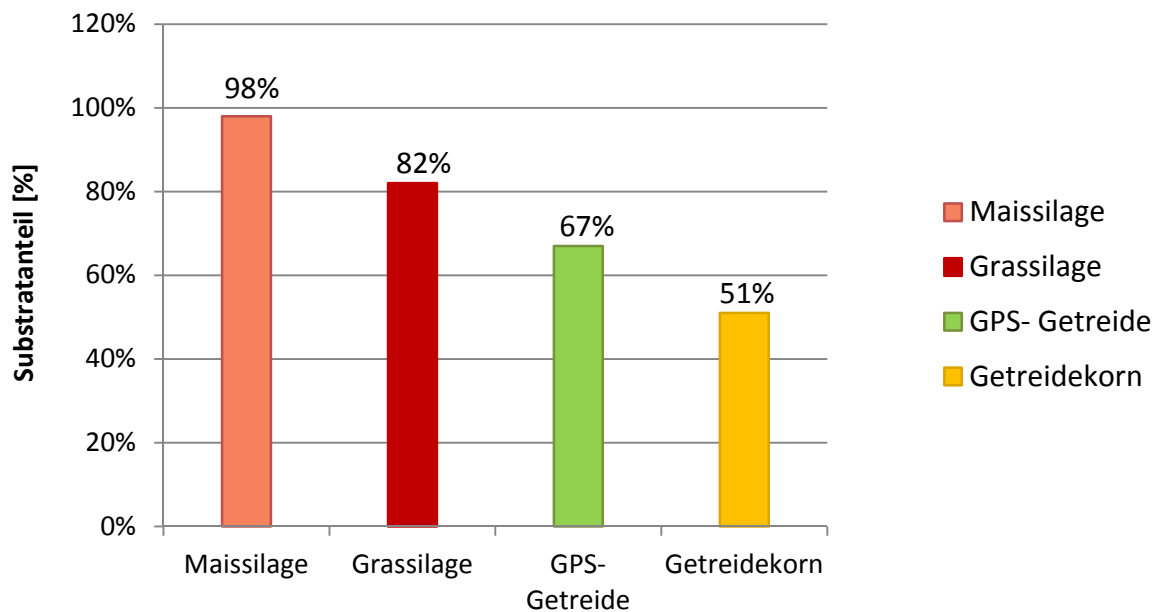
- Getreide,
- Gras,
- Kartoffeln,
- Mais
- Rüben (Futter-/Zuckerrüben).

In diesen Gruppen ergeben sich weitere Untergruppen, dies durch unterschiedliche Verarbeitungsformen gekennzeichnet sind, wie zum Beispiel Kartoffelpülpe und -schlempe (vgl. Anhang 9).

Insgesamt wurden 15 pflanzliche Substrate aus dem Datensatz sortiert. Die vier am häufigsten eingespeisten pflanzlichen Substrate sind Grassilage, Getreidekorn, GPS-Getreide und Maissilage. Ausgehend von den im Datensatz enthaltenen 769 Anlagen speisen 98 % der Anlagen Maissilage ein (vgl. Abbildung 6). Substrate wie Rüben und Kartoffeln werden hingegen selten verwendet. Nur etwa 2 % der Anlagen speisen Rüben und rund 3 % Kartoffeln ein (vgl. Anhang 9).



**Abbildung 6: Prozentualer Anteil der Biogasanlagen mit Verwendung von pflanzlichen Substraten**



(Eigene Auswertung)

Der Substratgruppe Getreidekorn wird Roggen, Weizen und Hafer zugeordnet. GPS-Getreide besteht vor allem aus Grünschnittroggen. Auf Grund der vorwiegenden Verwendung der vier pflanzlichen Substrate werden diese im Abschnitt 6 für die weitere Analyse verwendet.

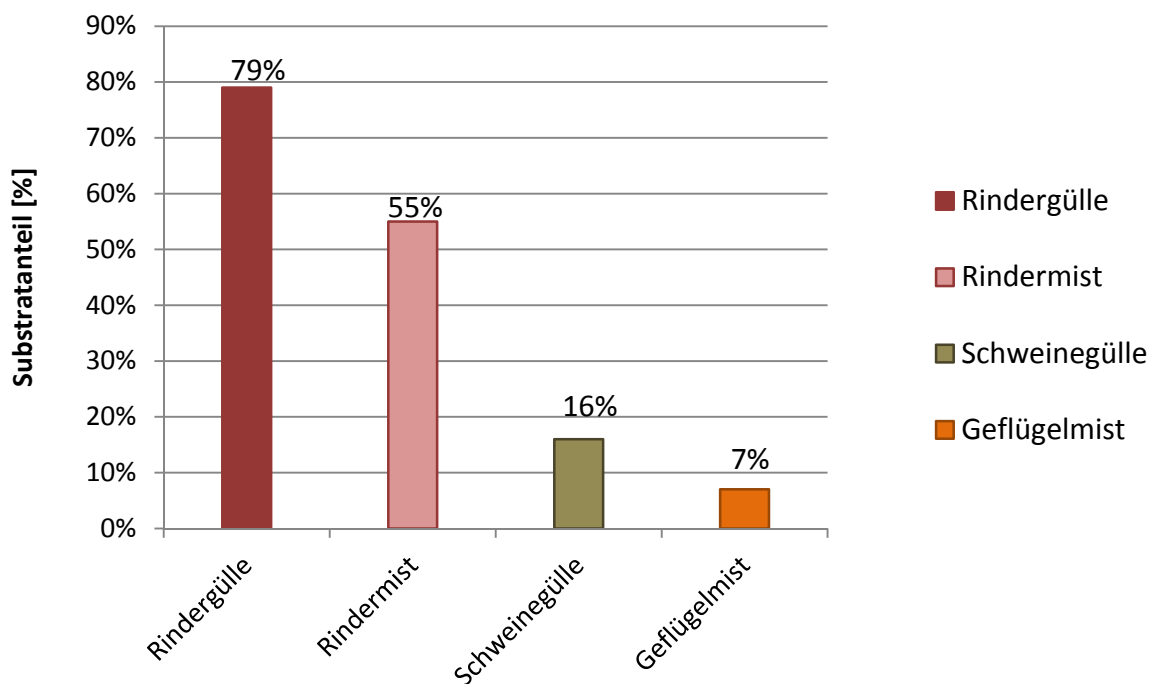
## 6.2.2 Tierisches Substrate

Die tierischen Substrate wurden wie bereits die pflanzlichen Substrate im Datensatz sortiert. Daraus entstehen 5 Hauptgruppen:

- Rind,
- Schwein,
- Geflügel,
- Schaf,
- Pferd.

Der Gruppe Geflügel werden Exkreme des Huhns und der Pute zugeteilt. Darüber hinaus wurden die tierischen Substrate in flüssige und feste Exkreme, die sich durch den Trockenmasseanteil [TM %] unterscheiden, unterteilt. Die tierischen Substrate, die von den Anlagenbetreibern überwiegend eingespeist werden sind: Rindergülle, Rindermist, Schweinegülle und Geflügelmist (vgl. Abbildung 7).

**Abbildung 7: Prozentualer Anteil der Biogasanlagen mit Verwendung von tierischen Substraten**



(Eigene Auswertung)

Schafmist und Pferdekot finden seltene Verwendung in Biogasanlagen, rund 1 % der Anlagen speisen Schafmist ein und etwa 4 % Pferdekot (vgl. Anhang 10). Wie bereits bei den pflanzlichen Substraten werden die vier häufigsten tierische Substrate für die weitere Analyse betrachtet.

Aus den pflanzlichen und tierischen Substraten, die überwiegend von Biogasanlagebetreibern verwendet werden, wird der jeweilige prozentuale Anteil am Gesamtsubstrat berechnet. Dieser ist relevant für die weitere Analyse im Abschnitt 7.

## 6.3 Parameter effizienter Biogaserzeugung

Im nachfolgenden Abschnitt werden zwei Berechnungen dargelegt, woraus sich jeweils ein Parameter der effizienten Biogaserzeugung ergibt.

### 6.3.1 Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit gibt Auskunft darüber, wie effizient das eingespeiste Substrat genutzt wird. Je länger das eingespeiste Substrat pro Tag im Gärbehälter verbleibt, desto mehr Substratbestandteile werden von den Mikroorganismen zersetzt und Biogas produziert. Demnach steigt die Methangewinnung mit längerer Verweilzeit (vgl. Abschnitt 4.1). Die Verweilzeit wird zusätzlich von der Temperatur im Gärbehälter beeinflusst. Temperaturen im thermophilen Bereich, erhöhen den Substratabbau und verringern die Verweilzeit (vgl. Abschnitt 4.1.3). Dieser Parameter kann jedoch nicht mitberücksichtigt werden, da der Datensatz hierzu keine Angaben liefert.

Für die Berechnung der hydraulischen Verweilzeit werden im Zähler das Fermenter- und das Nachgärervolumen eingesetzt. Der Nenner ergibt sich aus dem gesamten eingespeisten Substrat pro Jahr dividiert durch 365 Tage.

$$\text{hydraulische Verweilzeit [d]}: \frac{\text{Nettogärervolumen [m}^3\text{]}}{\text{zugeführte Inputmasse [m}^3\text{/d]}}$$

Aus der Häufigkeitsstatistik ist zu entnehmen, dass bei 191 Fällen die Verweilzeit berechnet wurde, die geringe Summe im Vergleich zum Gesamtanlagenbestand entsteht auf Grund der fehlenden Angaben zum Volumen im Nachgärer (vgl. Anhang 11). Dennoch sollte auf die Größe nicht verzichtet werden, da mit der fehlenden Angabe die hydraulische Verweilzeit sinken würde. Ein Vergleich zu dem Richtwert von mind. 150 Tagen Gesamtverweilzeit im gasdichten System wäre dann nicht mehr möglich (vgl. Abschnitt 4.1.1).

### 6.3.2 Volllaststunden

In Abschnitt 4.2 wurden die Volllaststunden bereits definiert, um eine kurze Wiederholung zu geben, wird die Berechnung dargestellt.

$$\text{Volllaststunden [h]} = \frac{\text{erreichte elektrische Arbeit [kWh]}}{\text{elektrische Nennleistung [kW}_{el}\text{]}}$$

Die Auswertung des Datensatzes ergab, dass 747 Anlagen Angaben zur erreichten elektrischen Arbeit und zur elektrischen Nennleistung besitzen und somit zur Berechnung der Volllaststunden genutzt werden. Der Mittelwert liegt bei rund 7160 Volllaststunden, demnach sind die Biogasanlagen im Datensatz im Durchschnitt ausgelastet. Anlagen die unter dem Grenzwert von 7000 Volllaststunden liegen, sind nicht ausgelastet (vgl. Abschnitt 4.2). Allerdings existiert eine Spannweite von rund 977 bis rund 8760 h die darauf schließen lässt, dass Unterschiede in diesem Bereich existieren (vgl. Anhang 12).

## 7 Empirische Analyse: Unterschiede der Effizienz der Stromerzeugung aus Biogas

In diesem Abschnitt wird analysiert, inwieweit regionale Agrarstrukturen, gesetzliche Rahmenbedingungen und verfahrenstechnische Parameter, auf die Effizienz der Stromerzeugung wirken. Die dadurch entstehenden Effizienzunterschiede werden interpretiert und mögliche Begründungen formuliert. Des Weiteren wird untersucht, wo die wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Potenziale liegen.

### 7.1 Hypothesen

Aus den Kenntnissen der theoretischen Kapitel und aus der Betrachtung der deskriptiven Analyse werden nun Hypothesen abgeleitet, die mit Hilfe der empirischen Analyse in den nachfolgenden Abschnitten zu überprüfen sind.

Die deskriptive Statistik des Datensatzes weist eine unregelmäßige Verteilung der Biogasanlagen in den Bundesländern auf. Bayern besitzt mit 88 % den größten Anteil der Biogasanlagen. Dadurch ergeben sich Einschränkungen bei der Betrachtung des Einflusses der regionalen Agrarstrukturen auf die Effizienz der Stromerzeugung.

Hypothese 1: Zwischen den Agrarregionen des Nordens und Südens existieren auf Grund der jeweils vorherrschenden Agrarstrukturen Unterschiede im tierischen Substrateinsatz.

Die größten Agglomerationen der Biogasanlagen liegen im Norden und Süden Deutschlands. Biogasanlagen werden vorwiegend in Regionen mit hoher Viehdichte aufgebaut, damit die anfallenden tierischen Exkrememente als Basissubstrat in die Anlage eingespeist werden (vgl. Abschnitt 3.1). Für die Analyse von Unterschieden in der Substrateinspeisung zwischen dem Norden und Süden Deutschlands wird noch einmal die deskriptive Statistik der Bundesländer betrachtet. Um eine annähernd gleiche Verteilung in den Biogasanlagen des Datensatzes zwischen Norden und Süden für die Untersuchung zu erhalten, werden die Biogasanlagen in Baden-Württemberg, dem Süden, und die Anlagen in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein dem Norden zugeordnet.

Hypothese 2: Biogasanlagen in den Leistungsklassen bis 500 kW<sub>el</sub> speisen mind. 30 % Gülle am Gesamtsubstrat ein, um die Vergütung des Gülle-Bonus zu erhalten

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen des EEG wirken auf die Substrateinspeisung in Biogasanlagen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Um zu überprüfen, wie intensiv auf diese Wirkung eingegangen werden kann, wird die Erstinbetriebnahme der Anlagen betrachtet. Mehrheitlich werden die Anlagen nach dem EEG 2009 vergütet (vgl. Abschnitt 5, Anhang 15). Mit der Novellierung 2009 wurde der Gülle-Bonus eingeführt. Um diesen zu erhalten wird ein Anteil von mind. 30 % Gülle an der gesamten Substrateinspeisung vorgegeben. In der Vergütungshöhe existieren jedoch Unterschiede. Anlagen bis zu einer Leistungsklasse von 150 kW<sub>el</sub> erhalten 4 ct/kWh und Anlagen über 150 bis 500 kW<sub>el</sub> erhalten 1 ct/kWh.

Hypothese 3: Kleinere Anlagen in den Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> besitzen einen höheren Gülleanteil als Anlagen in höheren Leistungsklassen

Biogasanlagen mit niedrigen elektrischen Nennleistungen sind befähigt nur kleine Mengen, Summe in kWh, in das Stromnetz einzuspeisen. Hingegen besitzen Anlagen mit Nennleistungen von z.B. 5.000 kW<sub>el</sub> deutlich mehr Kapazitäten. Diese erhalten nach dem EEG 2009 niedrigere Vergütungen, sind jedoch befähigt über die in das Stromnetz eingespeiste Strommenge effizient zu wirtschaften. Um die Menge an kWh zu erreichen, werden Substrate eingesetzt, die hohe Methanerträge erbringen (vgl. Abschnitt 4.3). Rindergülle erbringt hingegen relativ niedrige Methanerträge, dieser Wirtschaftsdünger ist jedoch kostengünstiger im Vergleich zu pflanzlichem Substrat. Demnach ist ein hoher Gülleanteil für kleine Biogasanlagen wirtschaftlich interessant.

Hypothese 4: Die Verweilzeit beeinflusst die effiziente Biogausausbeute der Biogasanlagen.

Neben den regionalen und gesetzlichen Einflussfaktoren wirken ebenso technische Parameter auf die Effizienz der Biogaserzeugung. Bedeutend ist in diesem Zusammenhang die Verweilzeit. Je länger diese Verweilzeit ist, desto höher die Methanausbeute des eingesetzten Substrates. Auf Grund der Berechnung der Verweilzeit ist zu erkennen, dass die Verweilzeit sinkt, wenn die zugeführte Substratmenge pro Tag zunimmt. Des Weiteren ist das nutzbare Gärvolumen ent-

scheidend für die Verweilzeit. Bei ausreichend großem Gärvolumen wird die Methanproduktion nicht gehemmt (vgl. Abschnitt 4.1).

Hypothese 5: Zwischen den Biogasanlagen existieren Unterschiede in der Zahl der erzielten Volllaststunden.

Ein weiterer Parameter zur Untersuchung effizienter Stromerzeugung sind die Volllaststunden. Wie aus der deskriptiven Betrachtung zu erkennen ist, liegen deutliche Unterschiede in der Streuweite der betrachteten Anlagen (vgl. Anhang 20).

Um die Fixkosten einer Biogasanlage möglichst gering zu halten, sollte die Zahl der erzielten Volllaststunden hoch sein (vgl. Abschnitt 4.2). Die unterschiedliche Vergütungshöhe des EEG erfolgt für jede erbrachte Kilowattstunde. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass jede Biogasanlage effizient wirtschaftet.

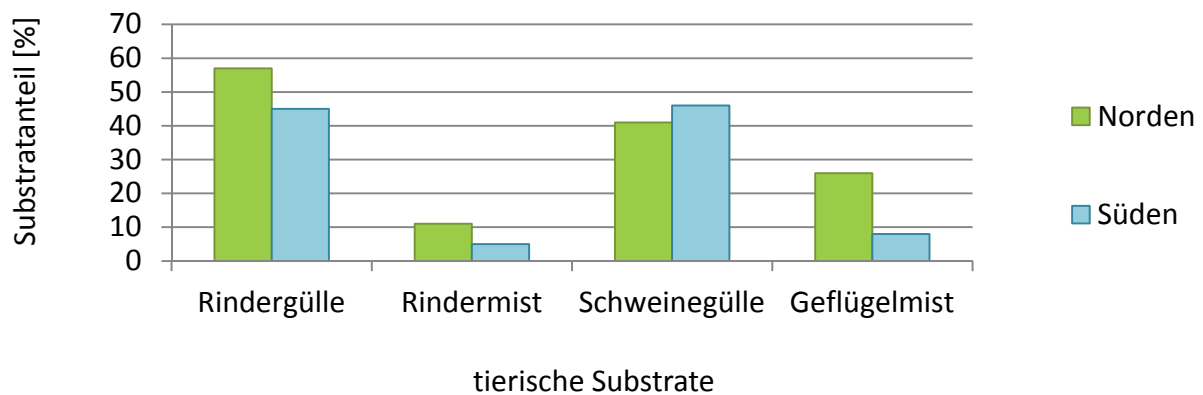
## 7.2 Regionale Unterschiede der Substrateinspeisung

Im nachfolgenden Abschnitt wird untersucht, ob es angesichts verschiedener Agrarstrukturen Unterschiede im Substrateinsatz gibt. Hierbei werden Nord- und Süddeutschland miteinander verglichen. Der Norden Deutschlands zeichnet sich durch vergleichsweise größere Agrarstrukturen aus und bildet darüber hinaus die Schwerpunktregion der Tierhaltung Deutschlands.

Zu berücksichtigen ist, dass die Anzahl der Beobachtungen in den beiden Stichproben gering ist. Zurückzuführen ist dies auf die Biogasanlagenverteilung in den Bundesländern im Datensatz (vgl. Abschnitt 5.2 und 6.1).

### 7.2.1 Untersuchungsdesign

Für die Untersuchung wird geprüft, ob der Substratanteil der ermittelten vier tierischen Hauptsubstrate *Rindergülle*, *Rindermist*, *Schweinegülle* und *Geflügelmist* zwischen den Agrarregionen Norden und Süden signifikante Unterschiede aufweist. Basierend auf der deskriptiven Statistik (vgl. Anhang 13) existieren Unterschiede zwischen dem Norden und Süden Deutschlands (vgl. Abbildung 8).

**Abbildung 8: Unterschiede des tierischen Substratanteils zwischen den Agrarregionen**

(Eigene Auswertung)

Folglich entstehen Mittelwertdifferenzen im Substratanteil Rindergülle von etwa 10 %. Die Unterschiede zwischen Norden und Süden im Substratanteil Geflügelmist sind weitaus höher. Die Differenz liegt hier bei etwa 18 %.

Um zu testen, ob diese Unterschiede der Substratanteile tierischer Exkremate zwischen den Agrarregionen Norden und Süden auch in der Grundgesamtheit bestehen, wird der *t*-Test unabhängiger Stichproben auf einem Signifikanzniveau von 5 % angewendet. Die unabhängige Variable ist hierbei *Nord\_und\_Süd\_Vergleich* mit den beiden Fallgruppen Norden und Süden. Die abhängigen Variablen sind die vier tierischen Exkremate *Geflügelmist*, *Rindergülle*, *Rindermist* und *Schweinegülle*. Der prozentuale Substratanteil wird durch diese Variablen angezeigt. Für diese werden vorab die Voraussetzungen für den *t*-Test, Normalverteilung und Varianzhomogenität, überprüft.

## 7.2.2 Ergebnisauswertung und Interpretation

Zunächst wird der Geflügelmistanteil des Substrateinsatzes auf Normalverteilung geprüft. Die angewandten statistischen Methoden besitzen gegenüber graphischen Methoden den Vorteil, dass diese robuster auf kleine Stichproben reagieren (Yazici und Yolacan, 2007, S. 182). Demzufolge werden die statistischen Methoden betrachtet. Der Kolmogorov-Smirnov wird auf einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Die Nullhypothese besagt, die empirische Verteilung entspricht der theoretischen Verteilung.

Der Shapiro-Wilk-Test überprüft die gleiche Nullhypothese, allerdings ist die Grundlage dieses Tests die quadrierten Korrelationskoeffizienten der empirischen und theoretischen Verteilungsquantile (Shapiro und Wilk, 1965, S. 560 f.).

Die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov- und des Shapiro-Wilk-Tests werden in der Spalte Signifikanz betrachtet (vgl. Tabelle 6). Diese Werte liegen in den Stichproben der Variable *Geflügelmist* über dem Grenzwert 0,05. Demnach wird die Nullhypothese beibehalten und die Stichprobe in den Fallgruppen ist annähernd normalverteilt.

**Tabelle 6: Test auf Normalverteilung: Geflügelmist**

	Nord_und_Süd Vergleich	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Geflügelmist	Nord	0,257	7	0,177	0,86	7	0,152
	Süd	0,301	5	0,157	0,835	5	0,152

(Eigene Auswertung)

Die weiteren Tests auf Normalverteilung der tierischen Substrate in den jeweiligen Stichproben ergaben, dass *Rindermist* und *Schweinegülle* keine Normalverteilung aufweisen. Wohingegen *Rindergülle* in den Fallgruppen normalverteilt ist (vgl. Datei 7.2\_I bis 7.2\_IV).

Grundsätzlich ist allerdings zu vermerken, dass der *t*-Test robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung reagiert (vgl. Abschnitt 5.1.1). Demnach wurde jedes tierische Hauptsubstrat für den *t*-Test verwendet.

Die dritte Voraussetzung des *t*-Tests besagt, dass die Populationsvarianzen, aus denen die beiden Stichproben stammen, gleich sind. Die Varianzhomogenität wird mit dem Levene-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % überprüft (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Aus der Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass die Varianzen in den beiden Fallgruppen der Variablen *Geflügelmist* nicht signifikant unterschiedlich sind, da der *p*-Wert über 0,05 liegt ( $p = 0,672 > 0,05$ ). Demzufolge ist die Voraussetzung der Varianzhomogenität für den *t*-Test erfüllt.

Die Varianzen in den beiden Fallgruppen der Variablen *Schweinegülle* sind ebenfalls gleich ( $p = 0,466 > 0,05$ ). Liegt keine Varianzhomogenität vor, findet eine Korrektur der Freiheitsgrade mithilfe des Welch-Tests statt (vgl. Tabelle 7, Spalte: Varianzen ungleich). Wonach der *t*-Test uneingeschränkt erfolgen kann.



**Tabelle 7: T-Test unabhängiger Stichproben: Tierische Substrate**

Substrat	Levene Test: Varianzgleichheit			T-Test für die Mittelwertgleichheit						
	Varianz	F	Sig.	T	df	Sig. (2-seit.)	Mittlere Differenz	Standard- fehler der Differenz	95 % Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Rindergülle	gleich	15,21	0	1,601	45	0,116	10,154	6,343	-2,622	22,929
	ungleich			1,511	29	0,141	10,154	6,72	-3,576	23,883
Rindermist	gleich	5,3	0,03	1,816	29	0,08	5,485	3,021	-0,694	11,664
	ungleich			1,549	13	0,144	5,485	3,541	-2,121	13,091
Schweinegülle	gleich	0,56	0,47	-1,044	13	0,315	-7,37	7,058	-22,618	7,877
	ungleich			-1,097	12	0,293	-7,37	6,72	-21,951	7,211
Geflügelmist	gleich	0,19	0,67	3,675	10	0,004	17,891**	4,868	7,044	28,738
	ungleich			3,572	7	0,008	17,891	5,009	6,3	29,482

Signifikanzlevel: \*\*\* =  $p < 0,001$ ; \*\* =  $p < 0,01$ ; \* =  $p < 0,05$

(Eigene Auswertung)

Der angewendete *t*-Test unabhängiger Stichproben überprüft auf einem Signifikanzniveau von 5 %, ob die Nullhypothese abgelehnt werden kann. Die Nullhypothese lautet hierbei: Die Mittelwerte der tierischen Substrate zwischen den Agrarregionen im Norden und Süden sind in der Grundgesamtheit gleich.

Die mittlere Differenz zwischen den Fallgruppen der Variablen Geflügelmist liegt bei rund 18 %. Die Teststatistik des *t*-Tests zeigt, orientiert an der Spalte Varianzen *gleich*, der Signifikanzwert für zweiseitige Tests beträgt etwa 0,004 (vgl. Tabelle 7). Dieser stellt einen hoch signifikanten Unterschied dar. Demnach liegt bei Ablehnung der Nullhypothese eine Irrtumswahrscheinlichkeit von etwa 0,4 % vor.

Die Hypothese 1, zwischen den Agrarregionen des Nordens und Südens existieren auf Grund der jeweils vorherrschenden Agrarstruktur Unterschiede im Geflügelmistanteil des Substrateinsatzes, wird bestätigt. Der Substratanteil Geflügelmist im Norden ist um 18 % höher im Vergleich zum Süden. Der Grund hierfür liegt in der Größe und Anzahl von Geflügelmastbetrieben im Norden (Statistik-bw, 2011, S. 30). Die größeren Mengen, die an Geflügelmist anfallen, steigern den Geflügelmistanteil in Biogasanlagen

### 7.3 Unterschiede der Biogasproduktion zwischen Anlagenstrukturen

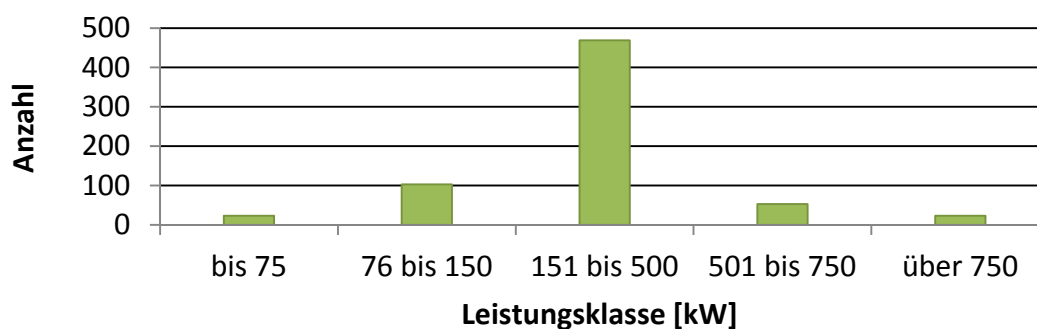
In diesem Abschnitt werden die Hypothesen mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalysen überprüft und interpretiert. Im Abschnitt 7.3.3.3 erfolgt eine Zusammenfassung der relevantesten

Ergebnisse, diese werden interpretiert und diskutiert. Auf Grund der Datenlage wird für die weitere Analyse ausschließlich der Biogasanlagenbestand in Bayern betrachtet.

Für die Fragestellung, hat das EEG mit seinen Novellierungen Einfluss auf die Effizienz von Biogasanlagen, werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Vergütungsleistungsklassen des EEG berücksichtigt (vgl. Tabelle 2). Demnach wird der Faktor *Leistungsklassen* für die einfaktoriellen Varianzanalysen verwendet, dieser Faktor stellt die verschiedenen Anlagestrukturen wieder.

Nachdem die installierte Leistung der Biogasanlagen den Vergütungsleistungsklassen zugeordnet wurde, ergibt sich folgende Verteilung (vgl. Abbildung 9):

**Abbildung 9: Verteilung der Anlagen nach installierter elektrischer Nennleistung**



(Eigene Auswertung)

Die größte Differenz innerhalb der Leistungsklassen liegt zwischen den Leistungsgrößen 151 kW und 500 kW, wonach etwa 70 % der Anlagen dieser Klasse angehören. Hingegen sind Anlagen in der Leistungsklasse bis 75 kW nur gering mit 22 Anlagen vertreten. Die Begründung kann darin liegen, dass die Einführung der Vergütung in dieser Leistungsklasse erst mit der Novellierung 2012 erfolgte. Die Anlagen in Bayern, die eine Angabe zum Jahr der Erstinbetriebnahme mit EEG besitzen, werden zu etwa 86 % nach EEG 2009 vergütet.

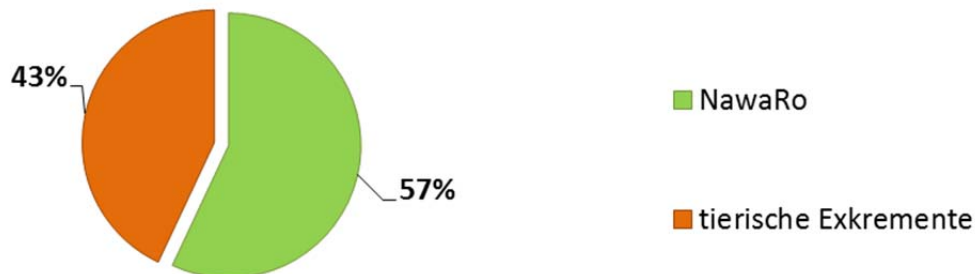
In Bayern stehen vorwiegend Anlagen mit kleineren ( $\leq 150 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) bis mittleren (bis  $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) Leistungsklassen. Die Verteilung der Anlagen ist bereits in anderen Studien aufgezeigt worden (vgl. Abschnitt 3.3). In der letzten Leistungsklasse über  $750 \text{ kW}_{\text{el}}$  sind auf Grund der genannten Verteilung nur 23 Anlagen vertreten.

### 7.3.1 Substrateinspeisung

Um einen ersten Überblick über die Substrateinspeisung der untersuchten Biogasanlagen zu gewinnen, wird die Verteilung des tierischen und pflanzlichen Substrats betrachtet. NawaRo werden zu etwa 57 % am Gesamtsubstrat und tierische Exkrememente zu etwa 43 % eingespeist

(vgl. Abbildung 10). Die Verteilung entspricht annähernd den Angaben, die im Monitoringbericht des DBFZ erhoben wurden (vgl. Abschnitt 4.3).

**Abbildung 10: Verteilung pflanzlicher und tierischer Substrate**



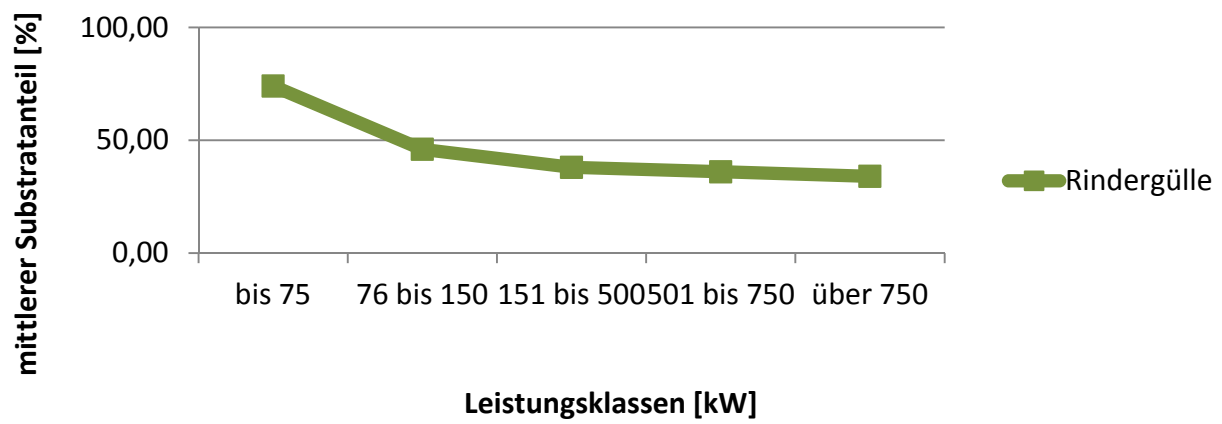
(Eigene Auswertung)

Die NawaRo setzen sich zusammen aus rund 58 % Maissilage, 25 % Grassilage, 10 % GPS-Getreide, 3 % Getreidekorn, die restlichen 4 % sind Rüben und verarbeitete Produkte aus Kartoffeln und Getreide. Im Bereich tierische Exkreme übernimmt Rindergülle einen dominierenden Part, zu rund 90 % wird Rindergülle eingespeist.

### 7.3.1.1 Untersuchungsdesign

Um die Hypothese 2 zu überprüfen, dass Biogasanlagen in den Leistungsklassen bis 500 kW<sub>el</sub> auf Grund der EEG-Vergütung mind. 30 % Gülle am Gesamtsubstrat einspeisen, wird die abhängige Variable *Rindergülle*, für die Analyse verwendet. Diese abhängige Variable gibt den Substratanteil an der Gesamtsubstrateinspeisung wieder. Etwa 79 % der geprüften Biogasanlagen verwenden dieses tierische Exkrement. Des Weiteren ist Rindergülle in jeder Leistungsklasse vertreten (vgl. Abbildung 11). Die zweite Hypothese geht davon aus, dass kleinere Anlagen in den Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> einen höheren Gülleanteil als Anlagen in höheren Leistungsklassen besitzen (vgl. Abschnitt 6.1).

Die empirischen Ergebnisse zeigen, zwischen der kleinsten Leistungsklasse bis 75 kW<sub>el</sub> und der höchsten Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> nimmt der Substratanteil Rindergülle stark ab (vgl. Abbildung 11 und Anhang 16).

**Abbildung 11: Unterschiede im Substratanteil Rindergülle zwischen den Leistungsklassen**

(Eigene Auswertung)

Um zu überprüfen, ob diese auf die Grundgesamtheit übertragbar ist, wird die einfaktorielle Varianzanalyse angewendet.

### 7.3.1.2 Auswertung der Ergebnisse

Die Voraussetzungen für die Varianzanalyse sind identisch mit denen des  $t$ -Tests. Bei Verletzung der Normalverteilung reagiert die Varianzanalyse wie der  $t$ -Test gleichermaßen robust. Liegt Varianzheterogenität zwischen den Faktorstufen der betrachteten Variablen vor, wird der konservative Tamhane-T2-Test angewendet.

Die statistische Auswertung für Normalverteilung zeigt, dass die Variable *Rindergülle* in den Leistungsklassen mit einer Ausnahme, Leistungsklasse 151 bis 500 kW<sub>el</sub>, annähernd normalverteilt ist (vgl. Tabelle 8). Die beiden statistischen Methoden Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk wurden auf einem Signifikanzniveau von 5 % getestet.

**Tabelle 8: Test auf Normalverteilung: Rindergülle**

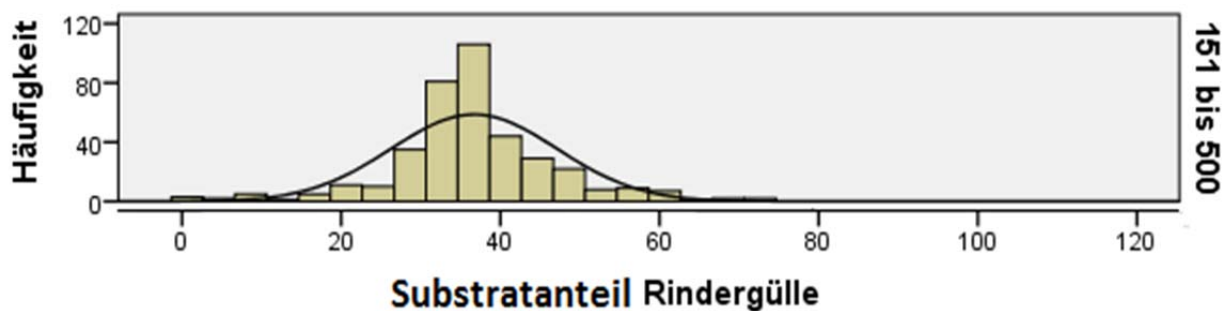
Leistungsklassen		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Rindergülle	bis 75	0,144	20	0,200*	0,967	20	0,691
	76 bis 150	0,106	92	0,012	0,98	92	0,169
	151 bis 500	0,106	383	0	0,937	383	0
	501 bis 750	0,108	29	0,200*	0,979	29	0,802
	über 750	0,168	17	0,200*	0,947	17	0,411

\*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

(Eigene Auswertung)

Die p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests liegen über dem Grenzwert von 0,05 und die Nullhypothese, die empirische Verteilung entspricht der theoretischen Verteilung, wird beibehalten.

Statistische Methoden reagieren jedoch bei großen Stichprobengrößen empfindlich auf Abweichungen von der Normalverteilung. Die meisten Biogasanlagen befinden sich in der Leistungsklasse 151 bis 500 kW<sub>el</sub>. Insgesamt umfasst diese Stichprobe 383 Beobachtungen. Demnach wird die graphische Methode, das Histogramm, betrachtet, da diese weniger sensibel auf große Stichprobengrößen reagiert (vgl. Abbildung 12).

**Abbildung 12: Histogramm Rindergülle**

(Eigene Auswertung)

Das Histogramm mit Normalverteilungskurve verdeutlicht, dass auch in der Leistungsklasse 151 bis 500 kW<sub>el</sub> von einer annähernden Normalverteilung ausgegangen werden kann.

Die Varianzhomogenität wird wie bereits bei dem *t*-Test mit dem Levene-Test überprüft.

**Tabelle 9: Levene-Test: Rindergülle**

Test der Homogenität der Varianzen			
Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
13,328	4	548	0

(Eigene Auswertung)

Der höchst signifikante Wert von 0,000 ( $p$ -Wert  $< 0,001$ ) zeigt, dass die Varianzen zwischen den Faktorstufen in der Variablen *Rindergülle* nicht gleich sind (vgl. Tabelle 9). Demzufolge wird der Tamhane-T2-Test in der nachfolgenden Varianzanalyse verwendet.

Das Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA (analysis of variance) in der Spalte Signifikanz weist höchst signifikante Unterschiede im Substratanteil Rindergülle zwischen den Leistungsklassen ( $p < 0,001$ ) auf (vgl. Tabelle 10). Die Nullhypothese, der Faktor besitzt keinen Einfluss auf die Variable *Rindergülle*, wird demnach abgelehnt.

**Tabelle 10: Einfaktorielle Varianzanalyse: Rindergülle****Abhängige Variable: Rindergülle**

ANOVA					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	28542,121	4	7135,53	53,861	0
Innerhalb der Gruppen	72599,071	548	132,48		
Gesamt	101141,192	552			

(Eigene Auswertung)

Nach dem Prinzip der Varianzzerlegung wird deutlich, die erklärte Streuung zwischen den Gruppen  $SS_b$  (28542,121) ist kleiner als die nicht erklärte Streuung innerhalb der Faktorstufe  $SS_w$  (72599,071) (vgl. Tabelle 10). Um die Erklärungskraft des Faktors auf die abhängige Variable auf Ebene der Population herauszufinden, wird Omega-Quadrat  $\Omega^2$  bzw.  $\omega^2$  berechnet (vgl. Abschnitt 5.1.2):

$$f^2 = \frac{(53,861 - 1) * 4}{552}$$

$$f^2 = 0,383$$

$$\omega^2 = \frac{0,383}{1 + 0,383}$$

$$\omega^2 = \Omega^2 \approx 0,28$$

Demzufolge erklärt der Faktor *Leistungsklassen* auf der Populationsebene 28 % der Varianz der abhängigen Variablen *Rindergülle*. Nach Angaben der Konventionen für Effektstärke liegt ein starker Effekt vor.

Demzufolge erklärt der Faktor *Leistungsklassen* auf der Populationsebene 28 % der Varianz der abhängigen Variablen *Rindergülle*. Nach Angaben der Konventionen für Effektstärke liegt ein starker Effekt vor.

Die Tabelle 11 zeigt einen Ausschnitt der gesamten statistischen Auswertung. Da für die Überprüfung der Hypothese 3 die Betrachtung der ersten beiden Leistungsklassen relevant sind.

**Tabelle 11: Post-Hoc-Test Tamhane: Rindergülle (Ausschnitt)**

Mehrfachvergleiche						
Abhängige Variable: Rindergülle						
Tamhane						
(I) Leistungs- klassen	(J) Leistungs- klasse	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Signi- fikanz	99,9 %- Konfidenzintervall	
					Unter- grenze	Ober- grenze
bis 75	76 bis 150	27,693 <sup>***</sup>	4,278	0	8,01	47,37
	151 bis 500	35,437 <sup>***</sup>	4,001	0	16,01	54,86
	501 bis 750	37,054 <sup>***</sup>	4,117	0	17,55	56,56
	über 750	40,632 <sup>***</sup>	4,487	0	20,44	60,82
76 bis 150	bis 75	-27,693 <sup>***</sup>	4,278	0	-47,37	-8,01
	151 bis 500	7,744 <sup>***</sup>	1,688	0	0,93	14,55
	501 bis 750	9,361 <sup>***</sup>	1,948	0	1,51	17,21
	über 750	12,939 <sup>***</sup>	2,641	0	1,83	24,05

Signifikanzlevel: <sup>\*\*\*</sup>=p < 0,001; <sup>\*\*</sup>=p < 0,01; <sup>\*</sup>=p < 0,05

(Eigene Auswertung)

Aus der deskriptiven Statistik geht hervor, dass in der Leistungsklasse bis 75 kW<sub>el</sub> der Mittelwert des Substratanteils Rindergülle mit etwa 70 % im Vergleich zu den anderen Leistungsklassen am höchsten ist (vgl. Anhang 16). Diese Unterschiede werden in der Leistungsklasse bis 75 kW<sub>el</sub> durch die höchst signifikanten Mittelwertdifferenzen (p < 0,001) belegt. Die Begründung hierfür liegt im EEG 2012, demnach sollen Anlagen bis 75 kW<sub>el</sub> mind. 80 % Gülle am Gesamtsubstrat einspeisen, um den Gülle-Bonus zu erhalten. Die meisten Anlagen gaben an, nach dem EEG 2009 vergütet zu werden, in dieser Novelle existiert die Vergütung für Anlagen bis 75 kW<sub>el</sub> noch nicht. Zu erkennen ist allerdings, dass bereits die Tendenz zum Rindergülleanteil von 80 % besteht.

Des Weiteren liegen in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> signifikante Unterschiede vor. Der Substratanteil Rindergülle bei Biogasanlagen mit Nennleistungen bis 150 kW<sub>el</sub> ist höher als zu größeren Anlagen (>150 kW<sub>el</sub>).

Somit kann die Hypothese 3 bestätigt werden, dass kleinere Anlagen in den Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> einen höheren Gülleanteil als Anlagen in höheren Leistungsklassen besitzen. In der Leistungsklasse bis 75 kW liegt der Gülleanteil um etwa 35 % im Durchschnitt höher im Vergleich zu den Biogasanlagen in höheren Leistungsklassen.



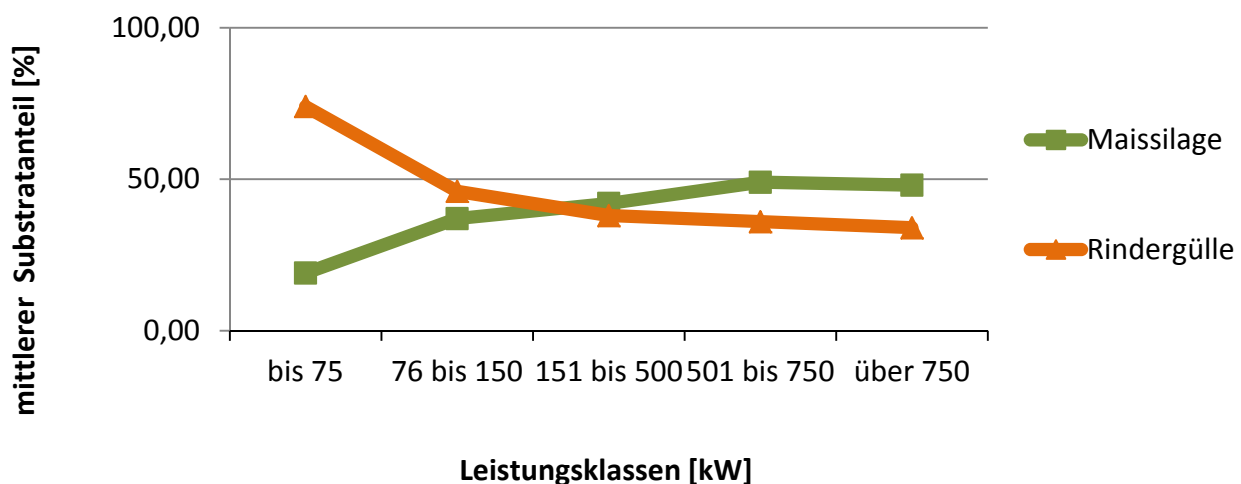
Bei Biogasanlagen, die der Vergütungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> angehören, ist der Substratanteil durchschnittlich 10 % höher im Vergleich zu den nachfolgenden Leistungsklassen.

Auf Grund der höchst signifikanten Mittelwertdifferenz ist davon auszugehen, dass die empirischen Mittelwerte denen der Grundgesamtheit entsprechen. Demnach liegt der Substratanteil Rindergülle in den Leistungsklassen bis 500 kW<sub>el</sub> bei mind. 30 %, womit die Hypothese 2 bestätigt wird. Die Voraussetzung für den Gülle-Bonus wird somit erfüllt.

Auf Grund der genannten Ergebnisse wird vermutet, dass ein weiteres Substrat mit dem Rindergülleanteil zwischen den Vergütungsklassen variiert. Der Rindergülleanteil wurde aus dem Gesamtsubstrat berechnet und besitzt im tierischen Substrat eine dominierende Position. Demgegenüber müsste ein pflanzlicher Substratanteil stehen, der mit dem Substratanteil Rindergülle zwischen den Leistungsklassen schwankt.

Für die Überprüfung wurden die pflanzlichen Substrate Getreidekorn, GPS-Getreide, Grassilage und Maissilage getestet. Daraus folgt ein Zusammenhang zwischen dem Substratanteil von Maissilage und Rindergülle.

**Abbildung 13: Substratanteile zwischen den Leistungsklassen**



(Eigene Auswertung)

Der Korrelationskoeffizient liegt bei - 0,511 auf einem Signifikanzniveau von 99,99 % (vgl. Anhang 17). Die Abbildung 13 verdeutlicht die Beziehung der Substratanteile zwischen den Leistungsklassen.

Im nachfolgenden wird überprüft, ob signifikante Unterschiede im Substratanteil Maissilage bestehen. Weiter wird die Hypothese 6 aufgestellt, dass der Substratanteil Maissilage in kleinen Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> geringer ist als in Leistungsklassen über 150 kW<sub>el</sub>.

Die Tests auf Normalverteilung der abhängigen Variablen *Maissilage* in den Leistungsklassen ergeben ähnliche Ergebnisse wie bei der Variablen *Rindergülle*. In der Leistungsklasse 151 bis 500<sup>o</sup>kW<sub>el</sub> wird die Nullhypothese, die empirische Verteilung entspricht der theoretischen, auf einem Signifikanzniveau von 5 % in beiden statistischen Methoden abgelehnt.

Die dritte Voraussetzung der Varianzanalyse, die Varianzhomogenität, wird auf Grund des nicht signifikanten Ergebnisses ( $p = 0,178 > 0,05$ ) erfüllt (vgl. Tabelle 12). Die Nullhypothese, die Varianzen in den Faktorstufen der Variablen *Maissilage* sind gleich, wird beibehalten.

**Tabelle 12: Levene-Test: Maissilage**

Test der Homogenität der Varianzen			
Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
1,582	4	542	0,178

(Eigene Auswertung)

Des Weiteren zeigt die ANOVA der einfaktoriellen Varianzanalyse, dass höchst signifikante Unterschiede im Substratanteil Maissilage zwischen den Faktorstufen der Leistungsklasse bestehen ( $p = 0,000 < 0,001$ ) (vgl. Tabelle 13).

**Tabelle 13: Einfaktorielle Varianzanalyse Maissilage**

**Abhängige Variable: Maissilage**

ANOVA					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	13408,058	4	3352,014	19,548	0
Innerhalb der Gruppen	92937,98	542	171,472		
Gesamt	106346,037	546			

(Eigene Auswertung)

Für die Effektstärke,  $\Omega^2$ , ergibt sich ein Wert von 0,20. Demnach erklären die Vergütungsleistungsklassen etwa 20 % der Varianz der abhängigen Variablen *Maissilage*. Daher ergibt sich ein großer Effekt. Im Vergleich zur Effektstärke der Leistungsklasse auf den Substratanteil Rindergülle ist dieser geringer. Woraus ersichtlich wird, dass der Substratanteil Rindergülle stärker von den Vergütungsklassen beeinflusst wird als der Substratanteil Maissilage. Dies ist auch ein Beweis dafür wie stark der Güllebonus des EEG die Substrateinspeisung von Rindergülle beeinflusst.

Durch die Vergütungssätze entscheidende ökonomische Anreize für kleinere Anlagen bis 150 kW<sub>el</sub>.

Um die Unterschiede der Substratanteile zwischen den Vergütungsklassen festzustellen, wird der Post-Hoc-Test, der Scheffé-Test, angewendet. Dieser setzt die Annahme der Varianzhomogenität voraussetzt (vgl. Abschnitt 6.2.2).

**Tabelle 14: Post-Hoc-Test Scheffé: Maissilage (Ausschnitt)**

Mehrfachvergleiche						
Abhängige Variable: Maissilage						
Scheffé-Prozedur						
(I) Leistungs- klassen	(J) Leistungs- klasse	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Signifi- kanz	99%- Konfidenzintervall	
					Unter- grenze	Ober- grenze
bis 75	76 bis 150	-17,085 <sup>***</sup>	3,55	0	-30,09	-4,08
	151 bis 500	-23,009 <sup>***</sup>	3,341	0	-35,25	-10,77
	501 bis 750	-29,616 <sup>***</sup>	4,054	0	-44,46	-14,77
	über 750	-29,450 <sup>***</sup>	4,226	0	-44,93	-13,97
76 bis 150	bis 75	17,085 <sup>***</sup>	3,55	0	4,08	30,09
	151 bis 500	-5,924 <sup>**</sup>	1,526	0,005	-11,51	-0,34
	501 bis 750	-12,531 <sup>***</sup>	2,757	0	-22,63	-2,43
	über 750	-12,365 <sup>**</sup>	3,005	0,002	-23,37	-1,36
151 bis 500	bis 75	23,009 <sup>***</sup>	3,341	0	10,77	35,25
	76 bis 150	5,924 <sup>**</sup>	1,526	0,005	0,34	11,51
	501 bis 750	-6,607	2,482	0,133	-15,7	2,48
	über 750	-6,441	2,755	0,244	-16,53	3,65

Signifikanzlevel: <sup>\*\*\*</sup> = p < 0,001; <sup>\*\*</sup> = p < 0,01; <sup>\*</sup> = p < 0,05

(Eigene Auswertung)

Die Mittelwerte in der ersten Faktorstufe unterscheiden sich höchst signifikant ( $p = 0,000 < 0,001$ ) von jedem Mittelwert der nachfolgenden Faktorstufen. Hohe signifikante Unterschiede existieren auch zwischen dem Mittelwert der zweiten Faktorstufe und denen in den nachfolgenden Leistungsklassen.

Aus der Tabelle 14 ist zu erkennen, der Substratanteil Maissilage in den Leistungsklassen bis 150 kW ist niedriger als in höheren Leistungsklassen. Dies wird durch die hoch signifikanten

Mittelwertdifferenzen belegt. Die Hypothese 6, der Substratanteil in kleinen Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> ist geringer als in Leistungsklassen über 150 kW<sub>el</sub>, wird angenommen.

### 7.3.1.3 Interpretation der Ergebnisse

Die zweite und dritte Hypothese beschäftigen sich mit dem Einfluss des EEG auf die Substrateinspeisung. Die unterschiedlichen Fördersätze haben Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Nach dem EEG 2009 erhalten Anlagen in kleineren Vergütungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> höhere Vergütungssätze im Vergleich zu Anlagen mit höherer Nennleistung bis 500 kW<sub>el</sub>. Darüber hinaus sinkt die EEG Förderung mit zunehmender Anlagengröße.

Hypothese 2 geht deshalb davon aus, dass Biogasanlagen bis 500 kW<sub>el</sub> ihren Substrateinsatz so gestalten, dass sie die Voraussetzungen erfüllen, um den im EEG 2009 festgelegten Gülle-Bonus zu erhalten. Die Voraussetzung hierfür ist, einen Gülleanteil von mind. 30 % einzuspeisen. Die Hypothese 2 wird angenommen.

Für kleine Anlagen bis 150 kW<sub>el</sub> ist es wirtschaftlich interessant Substrate einzuspeisen, die kostengünstig produziert bzw. kostenlos anfallen. Da diese Anlagen nicht die Kapazitäten wie beispielweise Biogasanlagen mit 5000<sup>0</sup>kW<sub>el</sub> besitzen und über die Menge, Summe der kWh, effizient in das Stromnetz einspeisen können. Der Vergütungssatz wird in ct pro kWh berechnet. Da kleine Anlagen nicht über die eingespeiste Strommenge wirtschaften können, ist der Vergütungssatz für diese Anlagen höher.

Hingegen erhalten größere Anlagen über 500 kW<sub>el</sub> weniger EEG-Förderungen (vgl. Tabelle 2), die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage wird dann zunehmend über die Substratkosten bestimmt. Biogasanlagen mit Nennleistungen über 500 kW<sub>el</sub> benötigen höhere Methanerträge als Anlagen mit niedrigeren Leistungen. Demzufolge sollten Substrate eingesetzt werden, aus denen hohe Methangehalte zu produzieren sind, um die Summe an kWh zu erreichen und über die Masse effizient zu wirtschaften. Der Methangehalt von pflanzlichen Substraten, wie z.B. Mais (650 NI/kg oTM, Methangehalt 52 %), ist höher im Vergleich zu Rindergülle (380 NI/kg oTM; Methangehalt 55 %). Mit steigender Menge an pflanzlichen Substraten steigen jedoch auch die Substratkosten. Umso relevanter ist es, die Substrate optimal zu nutzen, um Kosten zu minimieren.

Aus diesen Überlegungen erfolgt die Hypothese 3: Kleinere Anlagen in den Leistungsklassen bis 150 kW<sub>el</sub> besitzen einen höheren Gülleanteil als Anlagen in höheren Leistungsklassen. Diese wird bestätigt. In der Leistungsklasse bis 75 kW ist der Gülleanteil um etwa 35 % im Durchschnitt höher als zu den Biogasanlagen in höheren Leistungsklassen. Bei Biogasanlagen, die der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> angehören, ist der Substratanteil durchschnittlich 10 % höher als in höheren Leistungsklassen.

Da der Substratanteil Rindergülle und der Substratanteil Maissilage negativ korrelieren (vgl. Abbildung 13, Anhang 17), ergeben sich folgende Unterschiede im Substratanteil Maissilage zwischen den Leistungsklassen.

Der Substratanteil Maissilage ist in der Leistungsklasse bis 75 kW<sub>el</sub> durchschnittlich um 25 % niedriger im Vergleich zu den höheren Leistungsklassen. Weiter ergibt sich, dass in der zweiten Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> der Substratanteil Maissilage im Durchschnitt um 10 % geringer ist als in den nachfolgenden Leistungsklassen. Damit wird bestätigt, dass Anlagen mit höheren Nennleistungen (über 150) einen höheren Substratanteil an Maissilage besitzen, um möglichst hohe Gaserträge zu erreichen. Ob das Potenzial der höheren Methanerzeugung aus dem pflanzlichen Substrat genutzt wird, wird anhand der Verweilzeit im nächsten Abschnitt überprüft.

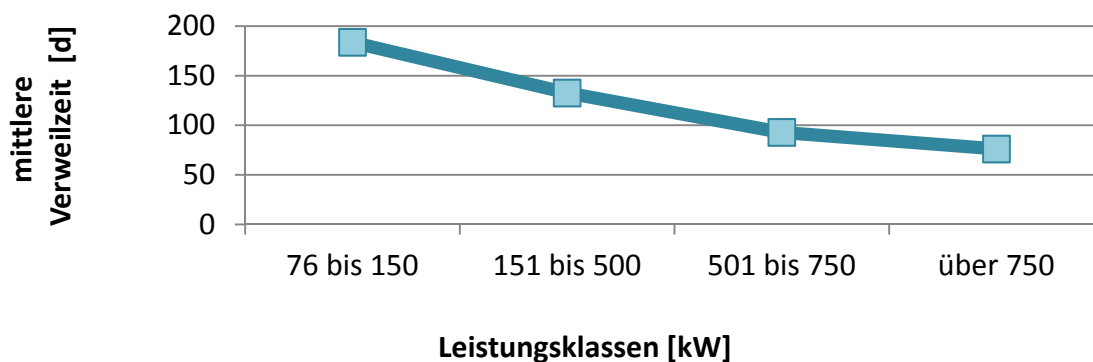
Die Gesamtbetrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Staffelung der Förderung des EEG mit den unterschiedlichen Vergütungssätzen einen starken Effekt auf die Substrateinspeisung besitzt. Auf Grund der Vergütungshöhe des Gülle-Bonus überwiegt der Substratanteil Rindergülle den Substratanteil Maissilage bis zu einer Anlagenleistung von 150 kW<sub>el</sub>. Demzufolge richtet sich die Substrateinspeisung der Anlagen mit Leistungen bis 150 kW<sub>el</sub> stark nach den ökonomischen Anreizen des EEG. Hydraulische Verweilzeit

Im nachfolgenden wird untersucht, in wie weit die hydraulische Verweilzeit die effiziente Biogasausbeute der Biogasanlagen beeinflusst.

#### 7.3.1.4 Untersuchungsdesign

Die hydraulische Verweilzeit ist ein Parameter effizienter Biogaserzeugung. Die Variable *hyd\_Verweilzeit* wurde aus dem Quotienten des gesamten Nettogärvolumens (Fermenter und Nachgärer) und der eingespeisten Substratmenge pro Tag berechnet. Für die Leistungsklasse bis 75 kW<sub>el</sub> wurden keine bzw. nicht vollständige Angaben zum Gärvolumen gemacht, weshalb die Verweilzeit nicht berechnet wurde.

Aus der deskriptiven Statistik entstehen folgende Unterschiede zwischen den Leistungsklassen (vgl. Abbildung 14). Daraus wird ersichtlich, dass die Verweilzeit mit zunehmender Nennleistung abnimmt.

**Abbildung 14: Unterschiede in der Verweilzeit zwischen den Leistungsklassen**

(Eigene Auswertung)

Des Weiteren ist aus der deskriptiven Statistik zu erkennen, dass lediglich die Anlagen der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> eine Verweilzeit von mind. 150 Tagen erreichen (vgl. Anhang 19). Dies wurde mit dem einfachen *t*-Test für die Grundgesamtheit bestätigt.

### 7.3.1.5 Auswertung der Ergebnisse

Die statistischen Auswertungen für Normalverteilung zeigen, dass die abhängige Variable *hyd\_Verweilzeit* in den Leistungsklassen annähernd normalverteilt ist. Die beiden statistischen Methoden Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk wurden auf einem Signifikanzniveau von 5 % getestet. Die *p*-Werte des Kolmogorov-Smirnov liegen über dem Grenzwert von 0,05 unter Berücksichtigung der unteren Grenze einer echten Signifikanz (vgl. Tabelle 15).

**Tabelle 15: Test auf Normalverteilung: Verweilzeit**

Leistungsklassen		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
hyd_Verweilzeit	76 bis 150	0,117	27	0,200*	0,97	27	0,612
	151 bis 500	0,063	129	0,200*	0,987	129	0,243
	501 bis 750	0,225	13	0,071	0,823	13	0,013
	über 750	0,226	9	0,200*	0,767	9	0,008

\*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

(Eigene Auswertung)

Des Weiteren wird die dritte Voraussetzung der Varianzanalyse erfüllt, die Varianzen in den beiden Faktorstufen der Variablen Verweilzeit sind nicht signifikant unterschiedlich. Der *p*-Wert von 0,660 liegt weit über dem Grenzwert von 0,005 (vgl. Tabelle 16).

**Tabelle 16: Levene-Test: Verweilzeit**

Test der Homogenität der Varianzen			
Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
0,534	3	174	0,66

(Eigene Auswertung)

Die Voraussetzungen für die einfaktorielle Varianzanalyse wurden überprüft, folglich wird die Varianzanalyse durchgeführt.

Die einfaktorielle ANOVA ergibt einen höchst signifikanten Wert ( $p = 0,000$ ) (vgl. Tabelle 17). Demnach wird die Nullhypothese, der Faktor Leistungsklasse besitzt keinen Einfluss auf die Variable Verweilzeit, abgelehnt.

**Tabelle 17: Einfaktorielle Varianzanalyse: Verweilzeit****Abhängige Variable: Verweilzeit**

ANOVA					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	119200,932	3	39733,644	15,831	0
Innerhalb der Gruppen	436713,301	174	2509,847		
Gesamt	555914,233	177			

(Eigene Auswertung)

Die Effektstärke  $\Omega^2$  liegt bei 0,25. Demnach erklärt der Faktor *Leistungsklassen* auf der Populationsebene etwa 25 % der Varianz der abhängigen Variable *hyd\_Verweilzeit*. Es liegt ein starker Effekt vor.

Die ANOVA zeigt, dass Unterschiede zwischen den Agrarstrukturen in der Verweilzeit vorliegen. Um herauszufinden wo diese liegen, wird der Post-Hoc-Test, der Scheffé-Test, angewendet.

Die Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> weist zu jeder folgenden Leistungsklasse höchst signifikante Unterschiede auf ( $p = 0,000 < 0,001$ ) (vgl. Tabelle 18). Im Durchschnitt existieren die größten Unterschiede in der Verweilzeit zwischen der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> und über 750 kW<sub>el</sub> mit rund 108 Tagen. Ein weiterer signifikanter Unterschied liegt zwischen den Leistungsklassen 151 bis 500 kW<sub>el</sub> und über 750 kW<sub>el</sub> ( $p = 0,015 < 0,05$ ). Die Mittelwertdifferenz beträgt hier 56

Tage. Zwischen den Leistungsklassen 501 bis 750 kW<sub>el</sub> und über 750 kW<sub>el</sub> wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

**Tabelle 18: Post-Hoc-Test Scheffé: Verweilzeit**

Mehrfachvergleiche						
Abhängige Variable: Hyd_Verweilzeit						
Scheffé-Prozedur						
(I) Leistungs- klassen	(J) Leistungs- klassen	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Signifi- kanz	95%- Konfidenzintervall	
					Unter- grenze	Ober- grenze
76 bis 150	151 bis 500	51,125 <sup>***</sup>	10,60	0,00	21,19	81,06
	501 bis 750	90,914 <sup>***</sup>	16,91	0,00	43,17	138,66
	über 750	107,647 <sup>***</sup>	19,28	0,00	53,21	162,08
151 bis 500	76 bis 150	-51,125 <sup>***</sup>	10,60	0,00	-81,06	-21,19
	501 bis 750	39,789	14,58	0,06	-1,37	80,94
	über 750	56,521 <sup>*</sup>	17,27	0,02	7,76	105,28
501 bis 750	76 bis 150	-90,914 <sup>***</sup>	16,91	0,00	-138,66	-43,17
	151 bis 500	-39,789	14,58	0,06	-80,94	1,37
	über 750	16,732	21,72	0,90	-44,60	78,06
über 750	76 bis 150	-107,647 <sup>***</sup>	19,28	0,00	-162,08	-53,21
	151 bis 500	-56,521	17,27	0,02	-105,28	-7,76
	501 bis 750	-16,732	21,72	0,90	-78,06	44,60

Signifikanzlevel: <sup>\*\*\*</sup> = p < 0,001; <sup>\*\*</sup> = p < 0,01; <sup>\*</sup> = p < 0,05

(Eigene Auswertung)

Aus diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass die durchschnittliche Verweilzeit bei Anlagen mit niedriger (bis 150 kW<sub>el</sub>) bis mittlerer Nennleistung (bis 500 kW<sub>el</sub>) länger ist im Vergleich zu Anlagen mit hoher Nennleistung (über 750 kW<sub>el</sub>).

Eine große Effektstärke geht von dem Faktor *Leistungsklassen* auf die unabhängigen Variablen *Rindergülle*, *Maissilage* und *Verweilzeit* aus. Folglich entsteht die Vermutung, dass ein Zusammenhang zwischen den Substratanteilen tierischer bzw. pflanzlicher Herkunft und der Verweilzeit in den Leistungsklassen besteht. Dies konnte jedoch nicht bewiesen werden, da keine aussagekräftigen signifikanten Korrelationen vorlagen.



### 7.3.1.6 Interpretation der Ergebnisse

Die Verweilzeit ist ein Parameter für effiziente Biogas- bzw. Methanherzeugung. Wenn Substrate länger im Gärbehälter verbleiben, werden schwer abbaubare Rohfasern, die vor allem in pflanzlichen Substraten vorkommen, optimal abgebaut und die Gasausbeute erhöht. Besitzt die Anlage ein ausreichend großes Gärvolumen, um das Gärgas zu speichern, erfolgt der biologische Prozess in der Biogasanlage effizient. Außerdem sinken die Substratkosten, da weniger Substratmasse pro Tag eingespeist wird. Ist der technische Anlagenteil für den erzeugten Biogasertrag ausgelegt, kann die Anlage vollkommen ausgelastet werden. Das wiederum bedeutet, eine ausgelastete Anlage ermöglicht eine verlässliche dauerhafte Einspeisung in das Stromnetz. Für den Anlagenbetreiber ist dies wirtschaftlich bedeutsam, da für jede erbrachte kWh die EEG-Vergütung erfolgt. Für den zukünftigen Netzausbau erneuerbarer Energien ist dies ebenfalls interessant, da eine ausgelastete Anlage dem grundlastfähigen System in Deutschland angehört.

Die genannte Erläuterung stellt den Idealfall effizienter Stromerzeugung aus Biogas dar. Jedoch existieren relevante Effizienzunterschiede zwischen den Anlagenstrukturen, die durch die Vergütungsklassen des EEG dargestellt werden.

Die Auswertungsergebnisse ergeben, dass die Verweilzeit in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> durchschnittlich 108 Tage höher ist im Vergleich zur Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub>. Ein weiterer Unterschied besteht zwischen der Leistungsklasse 151 bis 500 kW<sub>el</sub> zu über 750 kW<sub>el</sub>. Das Substrat verbleibt im Durchschnitt bei Anlagen mit Nennleistungen von 151 bis 500 kW<sub>el</sub> um 57 Tage länger im Gärbehälter. Womit die Verweilzeit in niedrigen bis mittleren Leistungsklassen bis 500 kW<sub>el</sub> länger ist im Vergleich zu Anlagen mit hoher Nennleistung über 750 kW<sub>el</sub>.

Nach Richtlinie des VDI und nach dem EEG 2012 sind Verweilzeiten von mind. 150 Tagen im gasdichten System einzuhalten, um maximale Methanausbeute zu erzeugen (vgl. Abschnitt 4.1.1). Dieser Richtwert wird im Durchschnitt lediglich in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> erreicht. Wobei zu berücksichtigen ist, dass die Verweilzeit aus dem Nettogärvolumen des Fermenters und dem Nachgärer berechnet wurde. Das Endgärrestlager wurde hierbei nicht beachtet. Mit diesem würde die Verweilzeit weiter ansteigen.

Bezogen auf den biologischen Anlagenteil wirtschaften die Anlagen mit den Leistungen von 76 bis 150 effizient. Die lange Verweilzeit ermöglicht prinzipiell, bei gegebenem nutzbarem Gärvolumen, einen höheren Methangehalt zu erzielen und bei vorhandenem gasdichten Gärbehältern Emissionen zu mindern (VDI, 2010, S. 34).

In der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> beträgt die Verweilzeit etwa 70 Tage und liegt damit unter dem Grenzwert von mind. 150 Tagen. Dabei besitzen diese Anlagen das Potenzial aus den pflanzlichen Substraten höhere Methanträge zu erzeugen. Jedoch werden die Substrate nicht optimal genutzt. Große Anlagen mit Leistungen über 750 kW<sub>el</sub> erhalten niedrige Vergütungssätze, die

Wirtschaftlichkeit wird demnach zunehmend über die Substratkosten bestimmt. Durch eine längere Verweilzeit sinkt die eingespeiste Substratmenge und mit dieser die Substratkosten.

Substratkosten stellen mit bis zu 60 % der Gesamtkosten den größten Kostenfaktor in der Biogasproduktion dar (FNR, 2013e, S. 161). Im günstigsten Fall ist das Substrat quasi kostenlos verfügbar. Allerdings entstehen für die meisten Anlagenbetreiber Kosten bei Zukauf bzw. durch Opportunitätskosten für die Substraterzeugung, den Transport und die Lagerung.

Die Substratkosten sind an die Volatilität der Agrarproduktpreise gekoppelt. Ausgehend von dem Erzeugerpreis für Weizen sank dieser im Jahr 2009 nach dem Wirtschaftsaufschwung von 2007/08. Welche für Anlagen mit hohen Leistungen hinsichtlich der hohen eingespeisten Substratmenge rentabel war. Dies erklärt auch den starken Anlagenzubau im Jahr 2009. Im darauf folgenden Jahr stiegen jedoch die Agrarpreise, demnach sank die Rentabilität der großen Anlagen (Gömann et al., 2013, S. 54).

Folglich ist es relevant, dass große Anlagen das Substrat optimal nutzen und eine lange Verweilzeit erreichen, womit die Substratkosten gesenkt werden.

Die Ursachen für die geringe Verweilzeit der großen Anlagen werden zum einen im Betriebsmanagement und zum anderen im geringen Gärspeichervolumen gesehen. Diese Überlegungen werden im Abschnitt 7.3.3.3 erläutert.

## 7.3.2 Volllaststunden

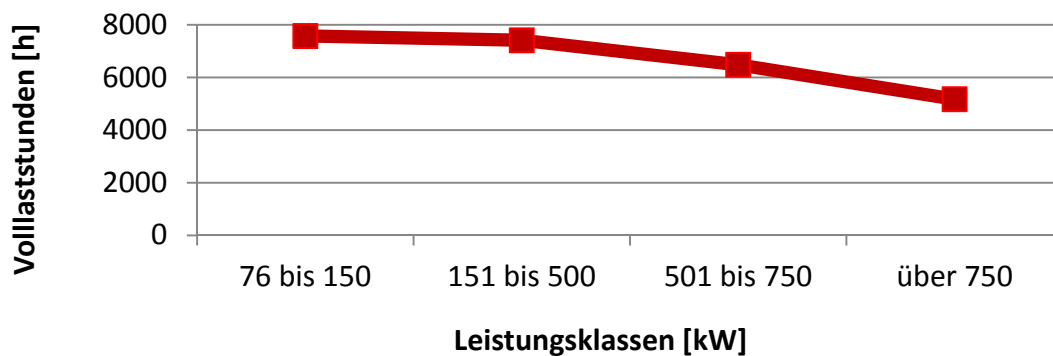
In diesem Abschnitt wird die Hypothese 5 mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse überprüft: Zwischen den Biogasanlagen existieren Unterschiede in der Zahl der erzielten Volllaststunden.

### 7.3.2.1 Untersuchungsdesign

Volllaststunden werden aus dem Quotienten von tatsächlich erbrachter Leistung, der Summe der kWh, und der maximal zu erreichenden Leistung, der Nennleistung, berechnet. Die Volllaststunden werden somit gesteigert, wenn die Zahl der erbrachten kWh steigt. Eine Anlage, die ausgelastet ist, nutzt das Leistungspotenzial, um für jede ins Stromnetz eingespeiste kWh den Vergütungssatz zu erhalten. Demnach sind Volllaststunden ein Parameter effizienter Stromerzeugung.

Um eine Gesamtbetrachtung der Parameter effizienter Stromerzeugung zu erlangen, werden die Volllaststunden unter Berücksichtigung der Verweilzeit betrachtet. Die deskriptive Statistik zeigt, dass die Anzahl der Volllaststunden mit steigender Nennleistung sinkt (vgl. Anhang 20 und Abbildung 15).

**Abbildung 15: Unterschiede in der mittleren Anzahl der Volllaststunden zwischen den Leistungsklassen**



(Eigene Auswertung)

Auffällig ist die geringe Anzahl an Volllaststunden mit etwa 5000 Stunden in der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub>, welche sich auch auf die Grundgesamtheit übertragen lässt.

### 7.3.2.2 Auswertung der Ergebnisse

Zunächst werden die Tests auf Normalverteilung betrachtet. Die statistischen Methoden Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk, die auf einem Signifikanzniveau von 5 % getestet werden, liefern mit Ausnahme der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub>, signifikante Werte. Wonach die Nullhypothese, die empirische Verteilung entspricht der theoretischen, nicht verworfen werden kann (vgl. Tabelle 19).

Die Stichprobengröße liegt in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> bei 27 Beobachtungen und liegt daher noch annähernd an dem Grenzwert der 30 Beobachtungen, die bei Verletzung der Normalverteilung für einen robusten t-Test bzw. robuste Varianzanalyse benötigt werden.

**Tabelle 19: Test auf Normalverteilung: Volllaststunden**

Leistungsklassen		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Volllaststunden	76 bis 150	0,184	27	0,019	0,793	27	0
	151 bis 500	0,21	122	0	0,816	122	0
	501 bis 750	0,312	13	0,001	0,823	13	0,013
	über 750	0,21	9	0,200*	0,867	9	0,115

\*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

(Eigene Auswertung)

Die Stichprobengröße mit 122 Beobachtungen in der Leistungsklasse 151 bis 500 kW<sub>el</sub> liegt weit über dem besagten Grenzwert. Demnach liegt der einzige kritische Wert in der Leistungsklasse 501 bis 750 kW<sub>el</sub>. Diese Stichprobe liegt unter dem Grenzwert von 30 und besitzt einen signifikanten p-Wert (Kolmogorov-Smirnov: 0,001; Shapiro-Wilk: 0,013). Die Varianzanalyse wird dennoch angewendet, jedoch sollte berücksichtigt werden, dass beim Post-Hoc-Test die Ergebnisse mit der Faktorstufe 501 bis 750 kW<sub>el</sub> vorsichtig zu betrachten sind.

Weiter wird der Levene-Test durchgeführt (vgl. Tabelle 20).

**Tabelle 20: Levene-Test: Volllaststunden**

Test der Homogenität der Varianzen			
Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
5,78	3	167	0,001

(Eigene Auswertung)

Der p-Wert dieses Tests ist hoch signifikant ( $p = 0,001 < 0,01$ ), womit die Nullhypothese, die Varianzen in den Faktorstufen der Variable *Volllaststunden* sind gleich, nicht angenommen werden kann. Für den Post-Hoc-Test wird demnach der konservative robuste Tamhane-T2-Test angewendet.

Die ANOVA- Statistik weist in der Spalte Signifikanz einen Wert von 0,000 auf ( $p$ -Wert =  $0,000 < 0,001$ ) (vgl. Tabelle 21). Demzufolge existieren höchst signifikante Unterschiede in der Anzahl der Volllaststunden zwischen den Leistungsklassen. Die Hypothese 5 wird damit bestätigt. Wo die Unterschiede liegen werden im nachfolgenden mit dem Post-hoc-Test analysiert.

**Tabelle 21: Einfaktorielle Varianzanalyse: Volllaststunden**

**Abhängige Variable: Volllaststunden**

ANOVA					
	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	52654979,43	3	17551659,8	10,295	0
Innerhalb der Gruppen	284727095,6	167	1704952,67		
Gesamt	337382075,1	170			

(Eigene Auswertung)

Die Effektstärke  $\Omega^2$  ergibt einen Wert von rund 0,28. Demzufolge kann von einem starken Effekt ausgegangen werden. Der Faktor *Leistungsklasse* erklärt zu rund 28 % die Varianz der abhängigen Variable *Volllaststunden*. Demzufolge existiert ein großer Effekt auf Populationsebene.

Der Post-Hoc-Test weist folgende Ergebnisse auf (vgl. Tabelle 22). Die Mittelwerte in der letzten Faktorstufe unterscheiden sich signifikant von dem Mittelwert in der Leistungsklasse 76 bis 150 ( $p = 0,005 < 0,01$ ) und unterscheiden sich hoch signifikant von dem in der Leistungsklasse 151 bis 500  $\text{kW}_{\text{el}}$  ( $p = 0,010 < 0,001$ ). Demnach wird die Nullhypothese, zwischen den Faktorstufen ist die Anzahl der Volllaststunden gleich, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 % abgelehnt.

**Tabelle 22: Post-Hoc-Test Tamhane: Volllaststunden**

Mehrfachvergleiche						
Abhängige Variable: Volllaststunden						
Tamhane-T2						
(I) Leistungs- klassen	(J) Leistungs- klassen	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Signifi- kanz	95%- Konfidenzintervall	
					Unter- grenze	Ober- grenze
76 bis 150	151 bis 500	165,362	241,1986	0,984	-501,33	832,058
	501 bis 750	1097,46	631,1727	0,477	-808,37	3003,294
	über 750	2405,025**	536,7571	0,005	695,93	4114,119
151 bis 500	76 bis 150	-165,362	241,1986	0,984	-832,06	501,332
	501 bis 750	932,098	603,8168	0,615	-941,26	2805,454
	über 750	2239,662*	504,3055	0,01	540,93	3938,393
501 bis 750	76 bis 150	-1097,46	631,1727	0,477	-3003,3	808,372
	151 bis 500	-932,098	603,8168	0,615	-2805,5	941,258
	über 750	1307,564	771,0552	0,488	-942,13	3557,256
über 750	76 bis 150	-2405,025**	536,7571	0,005	-4114,1	-695,93
	151 bis 500	-2239,662*	504,3055	0,01	-3938,4	-540,931
	501 bis 750	-1307,564	771,0552	0,488	-3557,3	942,128

Signifikanzlevel: \*\*\*=p < 0,001; \*\*=p < 0,01; \*=p < 0,05

(Eigene Auswertung)

Weiter ist zu erkennen, dass im Durchschnitt die Anzahl an Volllaststunden in der Leistungsklasse 76 bis 150  $\text{kW}_{\text{el}}$  um 2405 Stunden höher ist im Vergleich zu der Leistungsklasse über 750  $\text{kW}_{\text{el}}$ . Ebenfalls ist die Anzahl an Volllaststunden in der Leistungsklasse 151 bis 500  $\text{kW}_{\text{el}}$  durchschnittlich um 2240 Stunden höher im Vergleich zu der höheren Leistungsklasse über 750  $\text{kW}_{\text{el}}$ .

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anzahl an Volllaststunden im Durchschnitt bei Anlagen mit niedriger (76 bis 150 kW<sub>el</sub>) bis mittlerer Nennleistung (bis 500 kW<sub>el</sub>) höher sind im Vergleich zu Anlagen mit hoher Nennleistung (über 750 kW<sub>el</sub>). Folglich nutzen große Anlagen nicht das Potenzial der hohen installierten elektrischen Leistung. Mögliche Begründungen werden im nachfolgenden Abschnitt aufgeführt.

### 7.3.2.3 Interpretation der Ergebnisse

Die relevantesten Unterschiede in der effizienten Stromerzeugung werden im Folgenden zusammengefasst und anschließend ausgewertet:

Anlagen mit niedriger bis mittlerer Nennleistung wirtschaften effizient. Diese erfüllen einerseits die Voraussetzungen für den Gülle-Bonus und erhalten somit den Vergütungssatz, andererseits sind die Anlagen ausgelastet, wodurch wiederum für jede in Stromnetz eingespeiste kWh die EEG-Förderung erfolgt. Zusätzlich nutzen Biogasanlagen in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> die Substratmasse effizient, da die Verweilzeit im Durchschnitt über 150 Tage beträgt, hierdurch wird prinzipiell eine höhere Methanausbeute erzielt. Demnach wird angenommen, dass diese Methanausbeute für die hohe Auslastung der Anlage mitverantwortlich ist.

Biogasanlagen in der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> wirtschaften hingegen im Hinblick auf die Volllaststunden ineffizient. Auf Grund der Volllaststunden ist zu erkennen, dass die durchschnittlich produzierte Leistung unter der installierten elektrischen Leistung liegt. Demzufolge werden die Leistungskapazitäten der Anlage nicht ausgenutzt. Je höher die Anzahl der Volllaststunden ist, umso geringer sind die Fixkosten pro erzeugte Kilowattstunde, da in der Summe die EEG-Förderung höher ist. Allerdings wird das wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenzial der hohen Nennleistung nicht genutzt. Des Weiteren nutzen diese großen Anlagen nicht das Potenzial der Methanerzeugung aus pflanzlichen Substraten. Durch eine längere Verweilzeit würde die eingespeiste Substratmenge sinken und mit dieser die Substratkosten. Womit die Rentabilität der großen Anlagen weniger sensibel auf steigende Agrarpreise reagiert.

Diese Ergebnisse werfen die Frage auf, warum wirtschaften Anlagen mit hoher Nennleistung ineffizient und kleine Anlagen effizient? Auf diese Frage ergeben sich mehrere Antwortmöglichkeiten.

Große Anlagen über 750 kW<sub>el</sub> erhalten nur geringe EEG-Förderungen im Vergleich zu kleinen Anlagen. Ausgehend von 2009 liegt die Grundvergütung für Anlagen über 750 kW<sub>el</sub> bei 8 ct/kWh, wohingegen Anlagen bis 150 kW<sub>el</sub> rund 12 ct/kWh erhalten. Die Vergütungssätze des NawaRo-Bonus weist deutlich stärkere Unterschiede auf. Anlagen über 750 kW<sub>el</sub> erhalten (4 ct/kWh) etwas über der Hälfte der Vergütung von Anlagen bis 500 kW<sub>el</sub> (7 ct/kWh).

Demnach wird die Wirtschaftlichkeit der großen Anlagen stärker durch die Substratkosten und folglich den Agrarpreisen bestimmt. Das bedeutet, diese Anlagen müssen selbständiger wirtschaften und werden von äußeren Markteinflüssen stärker gelenkt als Güllekleinanlagen, deren Rentabilität weniger sensibel auf steigende Agrarpreise reagiert.

Des Weiteren könnte die ineffiziente Biogaserzeugung der großen Anlagen im Betriebsmanagement liegen. Kleine Anlagen bis 150 kW<sub>el</sub> werden meistens von einem landwirtschaftlichen Betrieb geführt, wohingegen Anlagen mit hoher Nennleistung über 750 kW<sub>el</sub> im landwirtschaftlichen Verbund betrieben werden. Demzufolge entstammen die Substrate aus unterschiedlichen landwirtschaftlichen Betrieben. Dadurch entsteht die Vermutung, dass ein häufiger Substratwechsel bei der Substrateinspeisung erfolgt als bei kleinen Biogasanlagen. Die Opportunitätskosten für eine gleichmäßige Substrateinspeisung wären nicht tragbar. Durch einen häufigen Wechsel in der Substrateinspeisung werden jedoch nicht mehr die benötigten Methanergehalte erreicht (vgl. Abschnitt 4.3), welches wiederum zur geringen Auslastung der Anlage führt.

In einer Studie der Universität Stuttgart wurden die geringen Auslastungen von Anlagen u.a. damit begründet, dass mehrere BHKW an einer Biogasanlage installiert sind und der biologische Anlagenteil nicht optimal auf den technischen Anlagenteil abgestimmt ist (Härdtlein und Eltrop, 2013, S. 35)

Eine weitere Antwort auf die ineffiziente Bewirtschaftung der großen Anlagen in der negativen Korrelation zwischen Verweilzeit und Volllaststunden gesehen ( $r = -0,723$ ;  $p = 0,028 < 0,05$ ) (vgl. Anhang 21 und 22.). Die negative Korrelation in der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> weist darauf hin, dass zu einem hohen Wert eines Merkmals tendenziell ein niedriger Wert des anderen Merkmals gehört. Aus dem Streudiagramm ist zu erkennen, dass ein tendenziell niedriger Wert der Verweilzeit einem tendenziell hohen Wert der Volllaststunden angehört.

Dies scheint zunächst nicht plausibel, da durch eine längere Verweilzeit höhere Methanerträge erreicht werden und mit diesen die Leistung gesteigert werden kann. Jedoch wird für eine lange Verweilzeit ein ausreichend großes Gärvolumen benötigt. Weiter wird vermutet, dass bei einer längeren Verweilzeit die Anzahl der Volllaststunden sinken wird. Demnach wird angenommen, dass das Gasspeichervolumen der Anlagen in der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> nicht ausreichend groß ist. Was wiederum dazu führt, dass Anlagen mehr Substratmasse pro Tag einspeisen, um damit einen möglichst hohen Methanertrag zu erreichen, um die benötigte Leistung zu erzeugen.

Im EEG 2012 ist die Voraussetzung der längeren Verweilzeit von mind. 150 Tagen an eine weitere Voraussetzung, dem Errichten eines technisch gasdichten abgedeckten Gärrestlagers, gekoppelt. Dies belegt, dass für eine längere Verweilzeit ein zusätzliches Gärvolumen benötigt wird (vgl. Abschnitt 2.2.2.3). Bei einer längeren Verweilzeit sinkt die eingespeiste Menge an Substrat. Bereits in laufenden Projekten zur Effizienzsteigerung der FNR wurde das Gärvolumen durch einen zusätzlichen Behälter gesteigert. Womit der Betreiber 20 % des eingesetzten Substratmaterials einsparen kann (FNR, 2013d, S. 12).

Zu berücksichtigen ist, dass das Gasspeichervolumen je nach Betrieb variiert und diesem individuell angepasst werden sollte. Grundsätzlich ist jedoch die Verweilzeit ein Parameter effizienter Stromerzeugung und bei Verlängerung dieser wird ein ausreichend großes Gärvolumen benötigt.

Große Anlagen sollten das Potenzial der hohen installierten elektrischen Nennleistung verfahrenstechnisch und wirtschaftlich nutzen. Daher sollte der Grundgedanke an eine verlängerte Verweilzeit nicht verworfen werden, sondern ein Ausbau des Speichervolumens erfolgen. Das eingespeiste Substrat würde demnach reduziert werden und die Substratkosten würden sinken. Mit der gespeicherten Methanmenge würden höhere Leistungen erzielt werden und die Anlage wäre ausgelasteter. Was wiederum bedeutet, dass mit steigender Anzahl der erzielten Volllaststunden die Fixkosten langfristig geringer ausfallen würden.

Die Auslastung der großen Anlagen ist vor allem für die Umsetzung des energiepolitischen Ziels relevant, die Stromversorgung aus erneuerbaren Energien zu sichern und die effiziente Nutzung dieser zu steigern. Anlagen mit sehr hoher Nennleistung und ausgelasteten Kraftwerken könnten Stromgrundlastschwankungen ausgleichen und zu einer möglichen grundlastfähigen Stromversorgung in Deutschland beitragen.

Unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Aspekts wäre zu hinterfragen, ob die Investitionskosten, die bei dem Zu- bzw. Ausbau entstehen, durch die eingespeisten Substratkosten getragen werden. Dies jedoch ist ein Ausblick für weitere Forschungsbereiche.

Abschließend ist festzuhalten, kleineren Anlagen, die nach dem EEG höhere Vergütungssätze erhalten, wirtschaften effizient, wohingegen große Anlagen, die geringe Förderungen erhalten und stärker von Markteinflüssen wie den Agrarpreisen abhängig sind, ineffizient wirtschaften. Demzufolge entsteht die Überlegung, Anreize für große Anlagen zu schaffen effizient zu wirtschaften.



## 8 Zusammenfassung

Im internationalen Vergleich ist Deutschland bestrebt eine Vorreiterrolle im Erneuerbaren-Energien-Sektor einzunehmen (AEE, 2011). Um dies zu erreichen, wurden von der Bundesregierung Ziele für 2020 festgelegt. Diese beinhalten u.a. die Energieversorgung durch erneuerbare Energien zu sichern und dadurch einen Anteil von mind. 35 % am Bruttostromverbrauch gegenüber dem Jahr 1999 zu erreichen. Zusätzlich wird beabsichtigt, die Energieversorgung effizienter zu gestalten und den Primärenergieverbrauch um 20 % gegenüber 2008 zu senken.

Bioenergie nimmt unter den erneuerbaren Energien eine besondere Rolle ein. Die Energie aus Biomasse ist im Bereich Strom, Wärme und Kraftstoffe flexibel nutzbar und relativ einfach speicherbar (FNR, 2013, S. 4). Biogas besitzt mit über 50 % den größten Anteil an der gesamten Stromerzeugung aus Biomasse. Des Weiteren ist Deutschland innerhalb der OECD der weltweit größte Biogasproduzent (IEA, 2013, S. 17). Demzufolge ist der Schwerpunkt dieser Arbeit die Stromerzeugung aus Biogas. In Deutschland existieren regionale Unterschiede in der Biogas-erzeugung hinsichtlich der Anlagengröße und der Substrateinspeisung. Die Stromerzeugung aus Biogas wird in Deutschland durch das Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) geregelt. Anlagenbetreiber erhalten durch dieses für 20 Jahre eine Festvergütung für jede in das Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde (kWh). Die Höhe des Vergütungssatzes wird durch verschiedene Faktoren wie z.B. Anlagenleistung beeinflusst.

Das EEG wurde in den vergangenen Jahren dreimal auf Grund politischer Ziele und Marktentwicklungen novelliert. Im Jahr 2009 wurde die zweite Novellierung des EEG eingeführt. Die damit in Kraft tretende Förderung von Anlagen bis 500 kW<sub>el</sub> löste den „Biogasboom“ aus. Mit der Novellierung 2012 erfolgte hingegen ein starker Rückgang im Anlagenbau. Zurückzuführen ist dies auf die Kürzung von Boni-Vergütungen und die Förderung von sehr kleinen Anlagen bis 75 kW<sub>el</sub>. Umso relevanter ist die effiziente Stromerzeugung der bestehenden Biogasanlagen für eine mögliche grundlastfähige Stromversorgung in Deutschland. In dieser Arbeit wird untersucht, welche regionalen, wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Faktoren die effiziente Stromerzeugung aus Biogas beeinflussen, welche Effizienzunterschiede sich hieraus ergeben und wie diese zu begründen sind. Außerdem wird hinterfragt wo wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale liegen.

Die Datengrundlage beruht auf Umweltgutachten von Biogasanlagen, die für diese Forschungszwecke vom Unternehmen OmniCert GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Anhand der deskriptiven Statistik wurde die Datenverteilung in den Bundesländern ermittelt. Das Ergebnis zeigt, 85 % der Biogasanlagen im Datensatz befinden sich in Bayern. Demnach werden die Unterschiede der Substrateinspeisung unter regionalem Aspekt eingeschränkt betrachtet.

Die verfahrenstechnische und wirtschaftliche Effizienz einer Anlage wird von zwei wesentlichen Parametern bestimmt. Zum einen sind dies die Volllaststunden, Höchstleistungslaufzeit des Kraftwerkes pro Jahr und zum anderen die Substrateinspeisung. Die Verweilzeit ist eine relevante

Größe an der die Substrateinspeisung messbar wird. Je länger die Verweilzeit andauert (Richtwert: mind. 150 Tage), umso besser wird das Substrat im Gärbehälter abgebaut und desto höher ist die dadurch produzierte Biogas- bzw. Methanausbeute. Des Weiteren erfolgt die Vergütung des EEG nach der Substrateinspeisung, womit die gesetzlichen Rahmenbedingungen mit Hilfe der Vergütungsleistungsklassen in der Analyse berücksichtigt werden. Die statistische Auswertung erfolgt mit dem T-Test unabhängiger Stichproben und der einfaktoriellem Varianzanalyse.

Die größten Unterschiede in der effizienten Stromerzeugung aus Biogas ergeben sich zwischen Anlagen mit niedriger (67 bis 150 kW<sub>el</sub>) bis mittlerer (151 bis 500 kW<sub>el</sub>) elektrischer Nennleistung und Biogasanlagen mit hoher (über 750 kW<sub>el</sub>) Nennleistung.

Anlagen mit niedriger bis mittlerer Nennleistung wirtschaften effizient. Diese erfüllen einerseits die Voraussetzungen für Vergütungen wie dem Gülle-Bonus. Andererseits sind die Anlagen mit über 7000 Volllaststunden ausgelastet, wodurch wiederum für jede in das Stromnetz eingespeiste kWh die EEG-Förderung erfolgt. Zusätzlich nutzen Biogasanlagen in der Leistungsklasse 76 bis 150 kW<sub>el</sub> das Substrat effizient. Die Verweilzeit beträgt im Durchschnitt über 150 Tage, womit prinzipiell eine höhere Methanausbeute erzielt wird. Demnach wird angenommen, dass diese Methanausbeute für die hohe Auslastung der Anlagen mitverantwortlich ist.

Biogasanlagen in der Leistungsklasse über 750 kW<sub>el</sub> wirtschaften im Hinblick auf die Volllaststunden hingegen ineffizient. Die Volllaststunden liegen unter der akzeptablen Grenze von 7000 Stunden. Demnach liegt die durchschnittlich produzierte Leistung unter der installierten elektrischen Leistung. Die Leistungskapazitäten der Anlage sind daher nicht ausgenutzt und die EEG-Förderung ist in der Summe niedriger. Das wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenzial der hohen Nennleistung und das Potenzial der Methanerzeugung aus pflanzlichen Substraten, zurückzuführen auf die geringe Verweilzeit von durchschnittlich 70 Tagen, werden nicht genutzt.

Auf die Frage, warum wirtschaften kleine bis mittlere Anlagen (bis 500 kW<sub>el</sub>) effizient und große Anlagen (über 750 kW<sub>el</sub>) ineffizient, ergeben sich verschiedene Begründungen.

Eine Antwortmöglichkeit wird im Betriebsmanagement gesehen. Große Anlagen besitzen auf Grund der verschiedenen Substratlieferungen häufigere Substratwechsel als kleinere Anlagen. Hierdurch wird die Methanproduktion gehemmt und die großen Anlagen sind nicht ausgelastet. Die Opportunitätskosten für eine gleichmäßige Substrateinspeisung wären jedoch nicht tragbar.

Die nicht übereinstimmende Ausrichtung zwischen dem biologischen und technischen Anlagenteil kann eine verfahrenstechnische Ursache für die ineffiziente Bewirtschaftung der großen Anlagen darstellen. Für den technischen Anlagenteil wird z.B. ein größeres Gärspeichervolumen benötigt.

Kleine bis mittlere Anlagen erhalten durch das EEG höhere Vergütungssätze als große Anlagen. Die Wirtschaftlichkeit der großen Anlagen wird zunehmend von den Substratkosten und somit

von den Agrarpreisen bestimmt. Demnach wirken die äußeren Markteinflüsse stärker auf die Wirtschaftlichkeit der großen Biogasanlagen als auf die der Güllekleinanlagen. Hieraus entsteht die Überlegung, Anreize durch das EEG zu schaffen, damit große Biogasanlagen effizient wirtschaften und dadurch langfristig eine mögliche Absicherung der grundlastfähigen Stromversorgung entstehen kann.

## Literaturverzeichnis

- AEE, Agentur für erneuerbare Energie, Aktuelle Daten und Fakten: Erneuerbare Energien [Online]. 2011. Available:  
<http://www.unendlich-viel-energie.de/de/wirtschaft/aktuelle-daten-und-fakten.html>  
[Accessed 30. 01. 2013].
- AEE, Agentur für Erneuerbare Energie, Bedeutung der Bioenergie innerhalb der Erneuerbaren Energien 2012 [Online]. 2013. Available:  
<http://www.unendlich-viel-energie.de/de/detailansicht/article/225/bedeutung-der-bioenergie-innerhalb-der-erneuerbaren-energien-2012.html> [Accessed 01. 11. 2013 2013].
- AEE, Agentur für Erneuerbare Energien, Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland 2013a.
- AGEE-STAT, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Erneuerbare Energien 2012. Berlin.
- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE und R. WEIBER, Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, ed. 13. Heidelberg: Springer, 2011, p. 10- 185.
- BESGEN, S., Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen: Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland. Diss. agr. 2005. Bonn.
- BMELV, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland [Online]. 2010. Available:  
[http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BiomasseaktionsplanNational.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BiomasseaktionsplanNational.pdf?__blob=publicationFile) [Accessed 28. 04. 2014].
- BMELV, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Das Erneuerbare-Energien-Gesetz: Daten und Fakten zur Biomasse – Die Novelle 2012. Berlin.
- BMJ, Bundesministerium der Justiz, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energie-Gesetz-EEG) am 29. März 2000 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2000, p. 305-306.
- BMJ, Bundesministerium der Justiz, Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - Biomasse V) am 21. Juni 2001 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2001, p. 1234-1238.
- BMJ, Bundesministeriums der Justiz, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG) am 01. Januar 2009 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2008, No. 42, p. 2074-2080.
- BMJ, Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - Biomasse V) am 01. Januar 2012 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2011, p. 1634-1638.
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Mindestvergütungssätze nach dem neuen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) am 31. Juli 2004 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2004, No. 40, p. 1918-1920.
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung 2009. Berlin.
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) am 01. April 2012 in Kraft. In: Bundesgesetzblatt I. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2012a, No. 57, p. 1634-1636.

- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Energiewende global: Trend zu erneuerbaren Energien setzen sich fort [Online]. 2013. Available: <http://www.bmu.de/N50125/> [Accessed 28. 04. 2014].
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien auch im Jahr 2012 weiter angewachsen [Online]. 2013a. Available: <http://www.erneuerbare-energien.de/die-themen/datenservice/erneuerbare-energien-in-zahlen/erneuerbare-energien-im-jahr-2012/> [Accessed 02. 10. 2013].
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Klimaschutzpolitik in Deutschland [Online]. 2013b. Available: [www.bmu.de/P215/](http://www.bmu.de/P215/) [Accessed 02. 10. 2013].
- BMU UND BMWI, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung 2010. Berlin.
- BMWI, Energiekonzept [Online]. 2013. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiepolitik/energiekonzept.html> [Accessed 28. 04. 2014].
- BMWI, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energie in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung 2013a. Berlin.
- BMWI, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Internationale Energiepolitik: Ziele internationaler Energiepolitik [Online]. 2013b. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiepolitik/internationale-energiepolitik.html> [Accessed 30. 01. 2013].
- BODE, S., Erneuerbare Energien im Strommarkt. Wirtschaftsdienst, Vol. 90, (2010), p. 643-647.
- BÖTTCHEN, J., Management von Biogas-Projekten: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte. Heidelberg: Springer Gabler, 2013, p. 233-290.
- BROSIUS, F., SPSS 19. Heidelberg, München, Landsberg; Frechen, Hamburg: Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2011, p. 499-513.
- BÜHNER, M. und M. ZIEGLER, Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler 2009. München: Person Studium.
- CLEARINGSTELLE EEG, Empfehlung: EEG. am 24. September 2009 in Kraft. EEG-EmpfV, Vol. 48, (2008), p. 1-46.
- DBFZ, Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum, Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse: Endbericht 2012. Leipzig.
- DE WITTE, T., Entwicklung eines betriebswirtschaftlichen Ansatzes zur Ex-ante-Analyse von Agrarstrukturwirkungen der Biogasförderung -angewendet am Beispiel des EEG 2009 in Niedersachsen. In: Special Issue 366. Braunschweig: von Thünen-Institut, 2012, p. 1-234.
- DIEKMANN, J., Erneuerbare Energien in Europa: Ambitionierte Ziele jetzt konsequent verfolgen. Wochenbericht des DIW, Vol. 45, (2009), p. 784-792.
- DIPBT, Dokumentations- und Informationssystem für Parlamentarische Vorgänge, Deutscher Bundestag, Die Energiewende aus der Sackgasse führen. Vol. 17/9949, (2012), p. 1-8.
- DISSEMOND, H., H. EILMSTEINER und H. NOWAK, Biogasnutzung aus der Landwirtschaft 1993. Wien.
- EG, Europäische Gemeinschaft, Verordnung des Rates: Hygienevorschriften bestimmter tierischer Nebenprodukte, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind, 9. Oktober 2002, No. 1774/2002.

- EUROSERVER, Biogas Barometer. Systemes Solaires - Le Journal des Energies Renouvelables, Vol. 200, (2010), p. 104-119.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger: Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan 1997. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, Energie in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung 2010. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, Energie 2020: Eine Strategie für wettbewerbsfähige, nachhaltige und sichere Energie 2010a. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, Energiefahrplan 2050 2011. Brüssel.
- EUROPÄISCHE UNION, Vom europäischen Parlament und vom Rat gemeinsam angenommene Entscheidungen und Beschlüsse vom 23. April 2009. Luxemburg.
- EUROPÄISCHE UNION, Energie 2020: Eine Strategie für wettbewerbsfähige, nachhaltige und sichere Energie 2011. Luxemburg.
- EUROPÄISCHER RAT, EU-Richtlinie zur Förderung der Erneuerbaren Energien 2001. Brüssel.
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biogas: Bioenergie 2013. Gülzow-Prüzen.
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Basisdaten Bioenergie Deutschland: Festbrennstoffe Biokraftstoffe Biogas 2013a. Gülzow-Prüzen.
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Grafiken, Stromerzeugung und Wärmebereitstellung aus Biomasse [Online]. 2013b. Available: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/fest-biobrennstoffe/stromerzeugung-aus-biomasse.html>; <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/warme-aus-biomasse.html> [Accessed 01. 11. 2013].
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biogasgewinnung: Repowering [Online]. 2013c. Available: <http://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/repowering/> [Accessed 08. 11. 2013].
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Themenbrief: Bioenergie-Regionen 2013d. Gülzow-Prüzen.
- FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung 2013e. Gülzow-Prüzen.
- FVB, Fachverband Biogas e.V., Position des Fachverbandes Biogas e.V. zur Rolle von Biogas im künftigen Stromversorgungssystem 2013. Freising.
- GARBADE, S., SRH Heidelberg, Prüfung von Mittelwertsunterschieden: T-Test 2012.
- GAUL, C.-M. und T. GLAUBITZ, EEG-Umlage 2010. In: Aktueller Begriff. Wissenschaftlicher Dienst, Fachbereich 05, Wirtschaft und Technologie, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Tourismus, 2010, No. 21/10, p. 1-2.
- GÖMANN, T. DE WITTE, G. PETER und A. TIETZ, Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft. In: Thünen Report 10. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2013, p. 1-60.
- GÖMANN, H., P. KREIS, J. MÜNCH und R. DELZEIT, Auswirkungen der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes auf die Landwirtschaft in Deutschland. In: Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik und Thünen-Institut, Möglichkeiten und Grenzen der wissenschaftlichen Politikanalyse (Schriften der GeWiSoLa e.V. Vol. 50). Braunschweig, 2010, p. 2-3.

- HÄRDTLEIN, M. und L. ELTROP, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Schwachstellen-Identifikation und Optimierungspotenziale von Biogasanlagen in Baden-Württemberg 2013.
- HEI, Hornbachner Energie Innovation, Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) Österreich, Biogas-Netzeinspeisung [Online]. Wien, 2013. Available: <http://www.biogas-netzeinspeisung.at/technische-planung/biogasgestehung/vergaerungsverfahren.html>.
- IEA, International Energy Agency, Renewables Information 2013 2013. Paris.
- KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN, Energie aus Biomasse. Berlin: Springer Verlag, 2001, p. 345-855.
- KAPFER, M., Zukunftstrends in der Landwirtschaft. Agrarische Rundschau, Vol. 2, (2011), p. 15-18.
- KTBL, Faustzahlen: Biogas. ed. 2. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2009, p. 14-45.
- KURZWEIL, P., Brennstoffzelltechnik, ed. 2. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, p. 1-25.
- LEOPOLDINA, Nationale Akademie der Wissenschaft Leopoldina, Bioenergie-. Möglichkeiten und Grenzen. Kurzfassung und Empfehlungen 2012.
- LFL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Marktübersicht BHKW. In: Biogas Forum Bayern. 2011, Vol. IV - 9, p. 1-6.
- OSTEROTH, D., Biomasse: Rückkehr zum ökologischen Gleichgewicht 1992. Berlin.
- RAMANATHAN, R., South-Western, Introductory Economics with Applications, ed. 5. New Dehli: South-Western 2002.
- RASCH, B., M. FRIESE, W. HOFFMANN und E. NAUMANN, Quantitative Methoden: 2. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, p. 2-53.
- RASCH, B., M. FRIESE, W. HOFFMANN und E. NAUMANN, Quantitative Methoden: 1. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler, ed. 3. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, p. 43-60.
- RENSBERG, N. und W. STINNER, Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland – Substrateinsatz und regionale Differenzierung. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), 2011, p. 222-229.
- ROHRING, R.P. HOCHLOFFU. HOLZHAMMERF. SCHLÖGL, et al., Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, Flexible Stromproduktion aus Biogas und Biomethan: Die Einführung einer Kapazitätskomponente als Förderinstrument 2011.
- SCHAPER, C., Strategisches Management in der Landwirtschaft: Wettbewerbsfähigkeit – Risikomanagement - Neue Märkte. Diss. ing. agr. 2010. Göttingen.
- SCHÜNEMANN-PLAG, P., Biogas im EEG 2012 - Standardanlagen. Verden: Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2012, p. 1-9.
- SHAPIRO, S. und B. WILK, An analysis of variance test of normality. Biometrika, Vol. 52, (1965), p. 591-611.
- STATISTIK-BW, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturen in Deutschland Einheit in Vielfalt: Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010 2011. Stuttgart.

- VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Emissionsminderung Biogasanlagen in der Landwirtschaft: Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger, Richtlinien 3475, Part 4, 2010. Düsseldorf.
- WENGENMAYR, R., Erneuerbare Energie: Konzept für die Energiewende. 3 ed. Berlin: Wiley-VCH, 2011, p. 5-10.
- YAZICI, B. und S. YOLACAN, A comparison of various tests of normality. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 77, (2007), p. 175-183.



## Anhang

<b>Anhang 1</b>	<b>BiomasseV – Einsatzstoffe Klasse 0, die keinen Anspruch auf eine einsatzstoffbezogene Vergütung begründen, und der Energieertrag</b>	<b>82</b>
<b>Anhang 2</b>	<b>Biomasse V – Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungsklasse I und der Energieertrag</b>	<b>84</b>
<b>Anhang 3</b>	<b>Biomasse V – Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungsklasse II und der Energieertrag</b>	<b>85</b>
<b>Anhang 4</b>	<b>Positivliste III: NawaRo</b>	<b>86</b>
<b>Anhang 5</b>	<b>Positivliste V (Ausschnitt): Rein pflanzliche Nebenprodukte</b>	<b>87</b>
<b>Anhang 6</b>	<b>Positivliste Wärme</b>	<b>88</b>
<b>Anhang 7</b>	<b>Anlagenverteilung der Erstinbetriebnahme zwischen den Erhebungsjahren 2012 und 2013</b>	<b>89</b>
<b>Anhang 8</b>	<b>Häufigkeitsverteilung Bundesländer</b>	<b>90</b>
<b>Anhang 9</b>	<b>Deskriptive Statistik der pflanzlichen Substraten (Tonne pro Jahr)</b>	<b>90</b>
<b>Anhang 10</b>	<b>Deskriptive Statistik tierischer Substrate (Tonne pro Jahr)</b>	<b>91</b>
<b>Anhang 11</b>	<b>Häufigkeitsverteilung Verweilzeit und Gärvolumen</b>	<b>91</b>
<b>Anhang 12</b>	<b>Deskriptive Statistik Volllaststunden (Stunden pro Jahr)</b>	<b>91</b>
<b>Anhang 14</b>	<b>Häufigkeitstabelle Anlagenzuordnung Vergütungsleistungsklassen</b>	<b>92</b>
<b>Anhang 15</b>	<b>Häufigkeitstabelle Erstinbetriebnahmejahr mit EE</b>	<b>92</b>
<b>Anhang 16</b>	<b>Deskriptive Statistik Substratanteil Rindergülle</b>	<b>93</b>
<b>Anhang 17</b>	<b>Korrelation pflanzlicher Substratanteile und Substratanteil Rindergülle</b>	<b>94</b>
<b>Anhang 19</b>	<b>Deskriptive Statistik hydraulische Verweilzeit</b>	<b>95</b>
<b>Anhang 20</b>	<b>Deskriptive Statistik Volllaststunden</b>	<b>95</b>
<b>Anhang 21</b>	<b>Korrelation Verweilzeit und Volllaststunden</b>	<b>96</b>
<b>Anhang 22</b>	<b>Streudiagramm Verweilzeit und Volllaststunden</b>	<b>97</b>

**Anhang 1      BiomasseV – Einsatzstoffe Klasse 0, die keinen Anspruch auf eine einsatzstoffbezogene Vergütung begründen, und der Energieertrag**

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methan- ertrag in m <sup>3</sup> pro Tonne Frischmasse)
1.	Altbrot	254
2.	Backabfälle	344
3.	Biertreber (frisch/abgepresst)	61
4.	Casein	392
5.	Fettabscheiderinhalte	15
6.	Frittierfette	562
7.	Gemüse (aussortiert)	40
8.	Gemüseabputz	26
9.	Getreide (Ausputz)	254
10.	Getreideabfälle	272
11.	Getreideschlempe aus der Alkoholproduktion	18
12.	Getreidestaub	172
13.	Glyzerin	421
14.	Grünschnitt aus der privaten und öffentlichen Garten- und Parkpflege	43
15.	Heil- und Gewürzpflanzen (aussortiert)	58
16.	Kartoffelfruchtwasser aus der Stärkeproduktion	11
17.	Kartoffeln (aussortiert)	92
18.	Kartoffeln (gemust, mittlerer Stärkegehalt; nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	66
19.	Kartoffelprozesswasser aus der Stärkeproduktion	3
20.	Kartoffelpülpe aus der Stärkeproduktion	61
21.	Kartoffelschalen	66
22.	Kartoffelschlempe mit Ausnahme von Nummer 27	18
23.	Kartoffelschlempe aus der Alkoholproduktion	17
24.	Kleie	270
25.	Labmolke eingedickt	44
26.	Labmolke frisch	18
27.	Mageninhalt (Schwein)	27
28.	Magermilch frisch (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	33
29.	Magermilch trocken	363
30.	Melasse aus der Rübenzuckerherstellung	166
31.	Milch (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	70
32.	Milchzucker	378
33.	Milchzuckermelasse	91
34.	Molke teilentzuckert trocken	298

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methan- ertrag in m <sup>3</sup> pro Tonne Frischmasse)
35.	Obsttrester und Traubentrester (frisch/unbehandelt)	49
36.	Panseninhalt	33
37.	Quark (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	92
38.	Rapskuchen	317
39.	Rübenkleinteile (aus der Zuckerverarbeitung)	50
40.	Schnittblumen (aussortiert)	55
41.	Speisereste	57
42.	Tierblut	83
43.	Zuckerrübenpresskuchen aus der Zuckerproduktion	64
44.	Zuckerrübenschnitzel	64

## Anhang 2 Biomasse V – Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungsklasse I und der Energieertrag

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methanertrag in m <sup>3</sup> pro Tonne Frischmasse)
1.	Corn-Cob-Mix (CCM)	242
2.	Futterrübe	52
3.	Futterrübenblatt	38
4.	Getreide (Ganzpflanze)	103
5.	Getreidekorn	320
6.	Gras einschließlich Ackergras	100
7.	Grünroggen (Ganzpflanze)	72
8.	Hülsenfrüchte (Ganzpflanze)	63
9.	Kartoffelkraut	30
10.	Körnermais	324
11.	Lieschkolbenschrot	148
12.	Mais (Ganzpflanze)	106
13.	Sonnenblume (Ganzpflanze)	67
14.	Sorghum (Ganzpflanze)	80
15.	Sudangras	80
16.	Weidelgras	79
17.	Zuckerrüben	75
18.	Zuckerrübenblatt mit Anteilen Zuckerrübe	46
19.	Für sonstige Pflanzen oder Pflanzenbestandteile zur Biogaserzeugung, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biomasseanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden (nachwachsende Rohstoffe), ist folgender Energieertrag "E I" zu verwenden: 50 m <sup>3</sup> pro Tonne Frischmasse.	

### Anhang 3 Biomasse V – Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungsklasse II und der Energieertrag

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methanertrag in m <sup>3</sup> pro Tonne Frischmasse)
1.	Blühstreifen, Blühflächen, Schonstreifen, Ackerrandstreifen, Wildblumenaufwuchs	72
2.	Durchwachsene Silphie	67
3.	Geflügelmist, Geflügeltrockenkot	82
4.	Klee gras (als Zwischenfrucht von Ackerstandorten)	86
5.	Landschaftspflegematerial einschließlich Landschaftspflegegras. Als Landschaftspflegematerial gelten alle Materialien, die bei Maßnahmen anfallen, die vorrangig und überwiegend den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes dienen und nicht gezielt angebaut wurden. Marktfrüchte wie Mais, Raps oder Getreide sowie Grünschnitt aus der privaten oder öffentlichen Garten- und Parkpflege oder aus Straßenbegleitgrün, Grünschnitt von Flughafengrünland und Abstandsflächen in Industrie- und Gewerbegebieten zählen nicht als Landschaftspflegematerial. Als Landschaftspflegegras gilt nur Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland.	43
6.	Leguminosen-Gemenge	79
7.	Lupine	80
8.	Luzernegras (als Zwischenfrucht von Ackerstandorten)	79
9.	Pferdemist	35
10.	Phacelia	80
11.	Rinderfestmist	53
12.	Rindergülle	17
13.	Schafmist, Ziegenmist	59
14.	Schweinefestmist	45
15.	Schweinegülle	12
16.	Stroh. Als Stroh gilt das halmgutartige Nebenernteprodukt von Getreide, Ölsaaten oder Körnerleguminosen, wenn das Hauptprodukt (Korn) nicht energetisch genutzt wird und das halmgutartige Nebenernteprodukt vom Korn separiert vorliegt.	161
17.	Winterrüben	70

#### Anhang 4      Positivliste III: NawaRo

	Einsatzstoffe	Beschreibung
1.	Gülle im Sinne der (EG) Nr. 1774/2002	Kot und/oder Harn einschließlich Einstreu von Nutztieren, vom eigenen landwirtschaftlichen Betrieb oder von anderen landwirtschaftlichen werden. Nutztiere sind dementsprechend: Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen, Geflügel.
2.	Aufwuchs	von Wiesen und Weiden als Ganzpflanzen in Form von Grüngut, Trockengut und Silage
3.-5.	Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben Verwendung finden	Kartoffeln Ganzpflanzen: Aufwuchs von Wiesen und Weiden, Ackerfutterpflanzen einschließlich als Ganzpflanzen geerntete Getreide,
		nicht aufbereitete Gemüse, Heil- und Gewürzpflanzen, Schnittblumen
		Körner, Samen, Corn-Cob-Mix, Knollen, Rüben, Obst, Gemüse, Kartoffelkraut, Rübenblätter, Stroh als Grüngut, Trockengut und Silage
		Ölsaaten oder Leguminosen (jeweils raffiniert und unraffiniert)
6.	Pflanzenöle	Palmöl und Sojaöl, raffiniert und unraffiniert, sofern nachweislich die Anforderungen der Verordnung nach § 64 Abs. 2 Nr. 1 eingehalten sind
7.	Waldrestholz	das bei der Durchforstung und bei der Stammholzernte in forstwirtschaftlichen Betrieben angefallen ist, Rinde und Holz aus Kurzumtriebsplantagen
8.	Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die im Rahmen der Landschaftspflege anfallen (auch bei Gemeinden o.ä.)	Beispiele sind kommunaler Grasschnitt, Grünschnitt von Golf- und Sportplätzen sowie Privatgärten
9.	Gülle im Sinne der (EG) Nr. 1774/2002	Kot und/oder Harn einschließlich Einstreu von Nutztieren, vom eigenen landwirtschaftlichen Betrieb, dementsprechend: Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen

## Anhang 5      Positivliste V (Ausschnitt): Rein pflanzliche Nebenprodukte

	Rein pflanzliche Nebenprodukte	Beschreibung
1.	Biertreber (frisch oder abgepresst)	Nicht behandelt, nicht konserviert, unverdorbenes Nebenerzeugnis der Brauerei, das aus gemälztem und nicht gemälztem Getreide und anderen stärkehaltigen Erzeugnissen gewonnen wird <sup>1</sup> und dessen Wassergehalte durch mechanisches Behandeln (Abpressen) reduziert sein kann.
2.	Gemüseabputz	Rückstand aus mechanisch abgetrennten, rohen Gemüsebestandteilen, die beim Putzen des Gemüses anfallen. Gemüse sind krautartige Pflanzen, deren Teile (Blätter, Knospen, Wurzeln, Stängel, Knollen, Zwiebeln, Blüten, Früchte, Samen) im rohen, frischzubereiteten oder konserviertem Zustand der menschlichen Ernährung dienen <sup>2</sup>
3.	Gemüse (aussortiert)	Ausgesonderte Gemüse, die für den vorgesehenen Verwendungszweck nicht oder nicht mehr geeignet sind
4.	Getreide (Ausputz)	Rückstand, der bei der Getreidereinigung und -sortierung anfällt. Er besteht in der Regel aus einem in der Zusammensetzung variierenden Gemisch aus Bestandteilen, die nicht einwandfreies Grundgetreide sind (zum Ausputz gehören u.a. Bruchkörner, Schmachtkörner, Auswuchs Unkrautsamen, Strohreste, Spelzen, Mutterkorn, Brandbutten). Zum Getreide zählen Weizen, Roggen, Gerste, Triticale, Hafer, Mais, Reis und Hirse.
5.	Getreideschlempe (Weizen) aus der Alkoholproduktion	Nebenerzeugnis, das bei der Alkoholgewinnung durch Destillation aus Maische anfällt und dem ausschließlich Wasser entzogen sein kann <sup>1</sup> .
6.	Getreidestaub	In der Zusammensetzung variierende Gemische von Getreidebestandteilen und Verunreinigungen geringer Teilchengrößen (Staub).
7.	Glycerin aus der Verarbeitung von Pflanzenölen	In der Zusammensetzung variierende Gemische von Getreidebestandteilen und Verunreinigungen geringer Teilchengrößen (Staub).

<sup>1</sup> NORMENKOMMISSION FÜR EINZELFUTTERMITTEL IM ZENTRALAUSSCHUSS DER DEUTSCHEN LANDWIRTSCHAFT, Positivliste für Einzelfuttermittel, ed. 6. Berlin 2007.

<sup>2</sup> KRUG, H., Gemüseproduktion: Paul Parey, 1991

## Anhang 6      Positivliste Wärme

	Verwendungszweck
1.	Beheizung, Warmwasserbereitstellung oder Kühlung von Gebäuden bis zu einem Wärmeeinsatz von 200 kWh/m <sup>2</sup> Nutzfläche im Jahr
2.	Wärmeeinspeisung in ein Netz mit einer Länge von mind. 400 m und mit Wärmeverlusten unter 25 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmekunden
3.	die Nutzung als Prozesswärme für industrielle Prozesse im Sinne der [ ] Anlage der 4. BImSchV und die Herstellung von Holzpellets zur Nutzung als Brennstoff
4.	die Beheizung von Betriebsgebäuden für die Geflügelaufzucht [ ]
5.	die Beheizung von Tierställen mit den Obergrenzen: a) Geflügelmast: 5 Kilowattstunden pro Tierplatz, b) Sauenhaltung: 350 Kilowattstunden pro Tierplatz, c) Ferkelaufzucht: 75 Kilowattstunden pro Tierplatz, d) Schweinemast: 45 Kilowattstunden pro Tierplatz
6.	die Beheizung von Unterglasanlagen für die Aufzucht und Vermehrung von Pflanzen, [ ].
7.	Trocknung von Gärresten als Düngemittel



### Anhang 7 Anlagenverteilung der Erstinbetriebnahme zwischen den Erhebungsjahren 2012 und 2013

Erstinbetriebnahme mit Erneuerbaren-Energie-Gesetz						
Erhebungsjahr			Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
2013	Gültig	2003	1	1,7	3,2	3,2
		2005	1	1,7	3,2	6,5
		2006	2	3,3	6,5	12,9
		2007	1	1,7	3,2	16,1
		2009	1	1,7	3,2	19,4
		2010	11	18,3	35,5	54,8
		2011	12	20,0	38,7	93,5
		2012	2	3,3	6,5	100,0
		Gesamt	31	51,7	100,0	
	Fehlend	System	29	48,3		
Gesamt			60	100,0		
2012	Gültig	2000	1	0,1	0,3	0,3
		2001	1	0,1	0,3	0,5
		2004	5	0,7	1,4	1,9
		2005	5	0,7	1,4	3,2
		2006	12	1,7	3,2	6,5
		2007	6	0,8	1,6	8,1
		2009	45	6,3	12,2	20,3
		2010	90	12,7	24,3	44,6
		2011	186	26,2	50,3	94,9
		2012	18	2,5	4,9	99,7
		2013	1	0,1	0,3	100,0
		Gesamt	370	52,2	100,0	
		Fehlend	System	339	47,8	
	Gesamt			709	100,0	

**Anhang 8 Häufigkeitsverteilung Bundesländer**

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	Mecklenburg-Vorpommern	13	1,7	1,7	1,7
	Schleswig-Holstein	7	0,9	0,9	2,6
	Niedersachsen	14	1,8	1,8	4,4
	Hessen	4	0,5	0,5	4,9
	Nordrhein-Westfalen	4	0,5	0,5	5,5
	Brandenburg	3	0,4	0,4	5,9
	Sachsen	1	0,1	0,1	6,0
	Thüringen	5	0,7	0,7	6,6
	Baden-Württemberg	39	5,1	5,1	11,7
	Bayern	679	88,3	88,3	100,0
	Gesamt	769	100,0	100,0	

**Anhang 9 Deskriptive Statistik der pflanzlichen Substraten (Tonne pro Jahr)**

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
Futterrüben	2	2,30	2660,19	1331,24	1879,41
Grassilage	636	0,00	7623,46	1539,50	854,15
Getreidekorn	398	0,11	4392,00	170,54	361,10
GPS-Getreide	518	0,00	6395,60	588,37	666,07
Getreideschlempe	3	232,50	358,50	296,33	63,01
Mais(korn)silage	757	15,10	53626,90	3481,47	3080,55
CCM	100	2,10	3718,00	265,33	525,81
CCM_Maiskornsilage	4	5,34	266,00	126,05	119,62
Lieschkolbensilage	20	10,55	1149,25	209,76	267,62
Maiskolbenschrot	5	9,30	1378,00	323,29	591,53
Kartoffeln	23	5,00	1376,80	235,64	346,34
Kartoffelpülpe	1	97,17	97,17	97,17	
Kartoffelschlempe	4	89,50	365,00	207,22	118,77
Landschaftspflegegras	1	6878,00	6878,00	6878,00	

**Anhang 10 Deskriptive Statistik tierischer Substrate (Tonne pro Jahr)**

Deskriptive Statistik					
	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
Rindergülle	612	99,00	130053,00	3255,32	5919,69
Rindermist	425	0,30	6097,60	487,67	774,24
Schweinegülle	121	288,91	21900,00	3717,10	3154,72
Schweinemist	41	0,40	7575,50	519,22	1201,41
Hühnertrockenkot	21	15,74	4228,07	1064,38	1153,58
Hähnchenmastmist	12	85,60	2295,09	847,78	707,79
Putenmist	23	59,80	2317,00	1070,07	764,75
Schafmist	7	134,00	1490,30	468,03	469,87
Pferdekot	34	6,00	3730,19	344,89	627,23

**Anhang 11 Häufigkeitsverteilung Verweilzeit und Gärvolumen**

		Verweilzeit	Größe Fermenter (m <sup>3</sup> )	Größe Nachgärer (m <sup>3</sup> )
N	Gültig	190	235	190
	Fehlend	575	531	576

**Anhang 12 Deskriptive Statistik Volllaststunden (Stunden pro Jahr)**

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
Volllaststunden	747	977,36	8758,99	7159,97	1473,71
Gültige Werte (Listenweise)	747				

**Anhang 14 Häufigkeitstabelle Anlagenzuordnung Vergütungsleistungsklassen**

Leistungsklassen		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	bis 75	23	3,4	3,4	3,4
	76 bis 150	103	15,4	15,4	18,8
	151 bis 500	469	69,9	69,9	88,7
	501 bis 750	53	7,9	7,9	96,6
	über 750	23	3,4	3,4	100,0
	Gesamt	671	100,0	100,0	

**Anhang 15 Häufigkeitstabelle Erstinbetriebnahmejahr mit EE**

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	2000	1	0,1	0,3	0,3
	2001	1	0,1	0,3	0,6
	2003	1	0,1	0,3	0,9
	2004	4	0,6	1,1	2,0
	2005	6	0,9	1,7	3,7
	2006	14	2,1	4,0	7,7
	2007	6	0,9	1,7	9,4
	2009	39	5,8	11,1	20,5
	2010	95	14,2	27,0	47,4
	2011	167	24,9	47,4	94,9
	2012	17	2,5	4,8	99,7
	2013	1	0,1	0,3	100
	Gesamt	352	52,5	100	
Fehlend	System	319	47,5		
Gesamt		671	100		

## Anhang 16      Deskriptive Statistik Substratanteil Rindergülle

Substrat_Rindergülle						
	N	Mittelwert	Standard- abweich- ung	Standard- fehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert	
					Untergrenze	Obergrenze
bis 75	20	73,49	17,73	3,96	65,18	81,79
76 bis 150	92	45,79	15,37	1,60	42,61	48,98
151 bis 500	387	38,05	10,38	0,52	37,01	39,09
501 bis 750	30	36,43	6,05	1,10	34,17	38,69
über 750	24	32,85	10,28	2,09	28,51	37,19
Gesamt	553	40,31	13,53	0,57	39,17	41,44

### Anhang 17 Korrelation pflanzlicher Substratanteile und Substratanteil Rindergülle

Korrelationen nach Pearson						
		Getreide- korn	Grassilage	GPS_ Getreide	Maissilage	Rindergülle
Substrat_ Getreidekorn	Korrelation	1	-0,059	-0,023	-0,050	-0,221**
	Signifikanz (2-seitig)		0,399	0,764	0,432	0,002
	N	248	206	171	248	202
Substrat_ Grassilage	Korrelation	-0,059	1	0,006	-0,500**	-0,100*
	Signifikanz (2-seitig)	0,399		0,909	0,000	0,034
	N	206	546	380	541	450
Substrat_GPS_ Getreide	Korrelation	-0,023	0,006	1	-0,307**	-0,137**
	Signifikanz (2-seitig)	0,764	0,909		0,000	0,009
	N	171	380	440	439	365
Substrat_ Maissilage	Korrelation	-0,050	-0,500**	-0,307**	1	-0,511**
	Signifikanz (2-seitig)	0,432	0,000	0,000		0,000
	N	248	541	439	667	538
Substrat_ Rindergülle	Korrelation	-0,221**	-0,100*	-0,137**	-0,511**	1
	Signifikanz (2-seitig)	0,002	0,034	0,009	0,000	
	N	202	450	365	538	544
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.						
* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.						

**Anhang 19      Deskriptive Statistik hydraulische Verweilzeit**

Hyd_Verweilzeit						
	N	Mittelwert	Standard- abweich- ung	Standard- fehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert	
					Untergrenze	Obergrenze
76 bis 150	27	183,77	54,88	10,56	162,06	205,48
151 bis 500	129	132,65	49,74	4,37	123,98	141,31
501 bis 750	13	92,86	48,61	13,48	63,48	122,23
über 750	9	76,12	40,73	13,57	44,81	107,44
Gesamt	178	134,64	56,04	4,20	126,35	142,93

**Anhang 20      Deskriptive Statistik Volllaststunden**

Volllaststunden						
	N	Mittelwert	Standard- abweich- ung	Standard- fehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert	
					Untergrenze	Obergrenze
76 bis 150	27	7576,31	1114,21	214,43	7135,54	8017,07
151 bis 500	122	7410,94	1219,81	110,43	7192,30	7629,58
501 bis 750	13	6478,85	2140,36	593,63	5185,43	7772,26
über 750	9	5171,28	1476,19	492,06	4036,58	6305,98
Gesamt	171	7248,32	1408,75	107,73	7035,65	7460,98

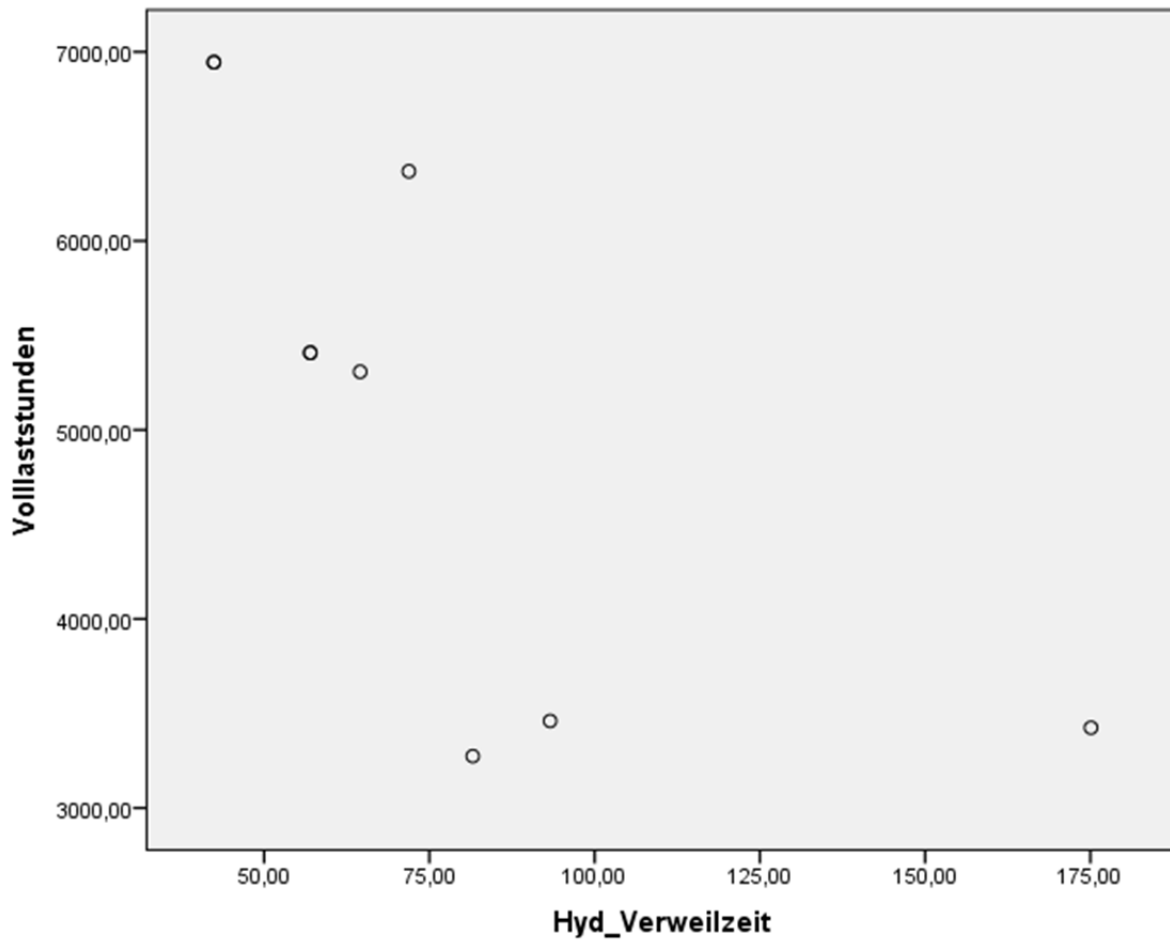
## Anhang 21 Korrelation Verweilzeit und Volllaststunden

Korrelationen nach Pearson				
Leistungsklasse_neu			Hyd_ Verweilzeit	Volllast- stunden
76 bis 150	Hyd_Verweilzeit	Korrelation	1	0,097
		Signifikanz (2-seitig)		0,629
		N	27	27
	Volllaststunden	Korrelation	0,097	1
		Signifikanz (2-seitig)	0,629	
		N	27	27
151 bis 500	Hyd_Verweilzeit	Korrelation	1	-0,179*
		Signifikanz (2-seitig)		0,048
		N	122	122
	Volllaststunden	Korrelation	-0,179*	1
		Signifikanz (2-seitig)	0,048	
		N	122	122
501 bis 750	Hyd_Verweilzeit	Korrelation	1	-0,624*
		Signifikanz (2-seitig)		0,023
		N	13	13
	Volllaststunden	Korrelation	-0,624*	1
		Signifikanz (2-seitig)	0,023	
		N	13	13
über 750	Hyd_Verweilzeit	Korrelation	1	-0,723*
		Signifikanz (2-seitig)		0,028
		N	9	9
	Volllaststunden	Korrelation	-0,723*	1
		Signifikanz (2-seitig)	0,028	
		N	9	9

\*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.



**Anhang 22      Streudiagramm Verweilzeit und Volllaststunden**



**Bibliografische Information:**  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

*Bibliographic information:*  
*The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliographie; detailed bibliographic data is available on the Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de)*

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter [www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)

*Volumes already published in this series are available on the Internet at [www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)*

**Zitationsvorschlag – Suggested source citation:**  
**Becker J (2014)** Unterschiede effizienter Biogasfermentation - wirtschaftliche und verfahrenstechnische Potenziale. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 97 p, Thünen Working Paper 33

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

*The respective authors are responsible for the content of their publications.*



## Thünen Working Paper 33

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*  
Johann Heinrich von Thünen-Institut  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Germany

[thuenen-working-paper@ti.bund.de](mailto:thuenen-working-paper@ti.bund.de)  
[www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)

DOI:10.3220/WP\_33\_2014  
urn:urn:nbn:de:gbv:253-201411-dn054256-8