Supporting Tables and Figures

Table 1 Regional average substrate mixture per power class in the state of Baden-Wuerttemberg based on (Härdtlein, Eltrop, Messner, & Dederer, 2013)

	Power class *($kW_{el, rated}$)*				
	≤ 150	> 150 & ≤ 325	> 325 & ≤ 500	> 500	total
Cow liquid manure	35.0%	32.2%	24.9%	12.1%	22.6%
Pig liquid manure	24.3%	9.0%	7.2%	11.4%	9.8%
Cow solid manure	4.3%	6.7%	5.3%	5.3%	5.6%
Pig solid manure	2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Maize silage	18.5%	34.7%	45.9%	54.0%	43.5%
Whole-crop-silage	0.0%	5.4%	5.8%	6.5%	5.6%
Grains	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Grass silage	10.2%	12.0%	11.0%	10.7%	11.0%
Forage grass	3.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SMY (Nm^3 CH4 tFM^{-1} inputmix)	50.84	66.90	76.95	84.84	75.69

Table 2 Statistical distributions for plant design over all plants in the state of Baden-Wuerttemberg based on (Härdtlein et al., 2013)

Digester Type	CSTR concrete roof 66.3%	CSTR membrane roof 30.43%	Horizontal plug flow reactor 3.26%
Secondary digester type	CSTR concrete roof	CSTR membrane roof	
if digester = CSTR with concrete roof	54.76%	45.24%	
if digester = CSTR with membrane roof	10%	90%	
Roof type (if membrane roof)	Single layer membrane (spherical cap)	Double layer membrane (cone)	
Digester	58.93%	41.07%	
Secondary digester	31,58%	68,42%	

Table 3 Temperatures distribution over all plants in the state of Baden-Wuerttemberg based on (Härdtlein et al., 2013)

Digester temperature (mean values of certain range)[°C]	37.2	41.23	43.86	48.39	52.19
Percentage of all plants	2.86%	28.57%	26.29%	25.71%	16.57%

Table 4: Specific diesel consumption for different handling machines assigned according to yearly substrate amount (KTBL, 2014)

Handling machine typ	**Power** kW	**Loading volume** m^3	**Diesel consumption** $l\ h^{-1}$	**Yearly substrate amount** $tFM\ a^{-1}$
Farm loader	37	0.65	4.30	300
	45	0.75	5.30	600
	54	0.8	6.30	800
Standard tractor	67	1	7.80	2500
	102	2	11.90	4500
	140	3	16.10	6500
Telescopic handler	65	1	7.60	2500
	70	2	8.10	4500
	80	3	9.30	7000
wheel loader	45	0.8	5.30	1000
	54	1	6.50	2000
	67	1	7.90	3000
	83	2	9.70	4000
	102	2	12.20	5000

Table 5 Statistical distributions for technologies, components, process parameters and plant design according to the power class in the state of Baden-Wuerttemberg based on (Härdtlein et al., 2013)

		Power class *($kW_{el, rated}$)*			
		≤ 150	> 150 & ≤ 325	> 325 & ≤ 500	> 500
Process type	Single-staged	27.78%	29.82%	15.38%	21.92%
	Two-staged	72.22%	70.18%	84.63%	78.08%
Type of CHP unit*	Spark-ignited gas engine	70.37%	80.95%	58.21%	66.13%
	ignition oil engine	29.63%	19.05%	41.79%	33.87%
Number of CHP units	One unit	50%	85.96%	25.64%	18.75%
	Two units	50%	12.28%	64,1%	59.38%
	Three units	0%	1.75%	10.26%	21.88%
Auxiliary el. share (used in substrate analysis)		9.5%	6.4%	7.3%	6.7%
Agitator type digester	submersible	19.23%	30.43%	30.38%	20.00%
	paddle	7.69%	6.09%	12.66%	2.50%
	central	46.15%	43.48%	44.30%	53.75%
	long axis	7.69%	0.00%	1.27%	1.25%
	rod	15.38%	20.00%	11.39%	0,21.25
	Reel mixer	3.85%	0.00%	0.00%	0.00%
Agitator type secondary digester	submersible	50.00%	62.71%	51.22%	50.00%
	paddle	0.00%	0.00%	7.32%	2.50%
	central	25.00%	25.42%	29.27%	35.00%
	long axis	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	rod	25.00%	10.17%	12.20%	12.50%
	Reel mixer	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Solid feed type	Horizontal mixer	50.00%	33.33%	47.06%	44.44%
	Vertical mixer	10.00%	22.92%	23.53%	14.81%
	Push-off trailer	30.00%	18.75%	8.82%	22.22%
	Push floor	10.00%	25.00%	20.59%	18.52%
ORL Digester (single-staged) [kg VS d^{-1} m^{-3}]		1.93	2.76	3.00	2.90
ORL Digester (two-staged)		3.18	3.44	4.10	5.52
ORL digester + secondary digester		1.40	1.69	2.28	2.91
HRT Digester (single-staged) [d]		100	88	82	92
HRT Digester (two-staged) [d]		73	72	68	63
HRT digester + secondary digester [d]		118	121	109	103
Maximal digester size [m^3]		871	1,858	1,821	2,473

*adjusted if size of single CHP unit is larger than the range of available units

Table 6 Modell sections, components and technologies in the reference state of existing BGP

Section in the process chain	Components	Technologies	Determined parameters for the reference state /Purpose of function	External data/sources used
Substrate provision	Silage silo	• Handling machines: farm loader, standard tractor, telescopic handler, wheel loader	• Dimensions: height, length, width, number of cells • Total silo volume • Type & diesel consumption loading machine	(KTBL, 2013, 2014)
	Preliminary manure tank	• Pump types: centrifugal -, rotary - & progressive cavity pump	• Pretank volume • Dimensions: height, length, width, number of cells, • Manure pump type • $P_{el,pump}$[kW]	Various manufacturer specifications
	Solid feed	• Horizontal mixer • Vertical mixer • Push-off trailer • Push floor	• Daily dosage volume • Type of solid feed depending on the daily dosage volume • Number screw conveyors (less for concrete roofs with solid feed on top) • $P_{el,solidfeed}$ [kW] • $W_{el,solidfeed,spec}$ [kWh/t FM]	(H. Bachmaier et al., 2011; Besgen, 2005; Dachs & Rehm, 2006; Gerber, 2009; Härdtlein et al., 2013; Häring et al., 2011; KTBL, 2013)
	Liquid feed (optional)	-	• $P_{el,liquidfeed}$ [kW] • Demand of recirculate for mixing	Various manufacturer specifications + (KTBL, 2013)

Gas production	Digester / Secondary digester	• continuous stirred tank reactor (non-/embedded into the ground) • horizontal plug flow reactorthe	• Assignment of target HRT/ORL according to BGP class • Net & gross volume single digester • Number of digesters • Dimensions of digester: height, radius / length & width, surface • Actual HRT/ORL after determination of volume • Demand of recirculate for mixing • Gas composition (CH_4 & CO_2 fraction according to yield, H_20 (saturated gas)) • Digestate (TS, VS composition after mixing and biogas formation, density) • CH_4 leakage by installations (agitators, etc.)	(Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) & LfL, 2007; Eder, Krieg, & Huba-Mang, 2012; Gerber & Schneider, 2015; Härdtlein et al., 2013; Liebetrau, Pfeiffer, & Thrän, 2016; Reinhold, 2005; Stenull, 2017)
	Digester roof (subcomponent)	• concrete roof • single layer membrane (spherical cap) • double layer membrane (cone)	• Dimensions: height, surface • Headspace volume (gas phase) • CH_4 permeation rate	-
	Agitators (subcomponent)	• submersible -, • paddle -, • central or long axis -, • rod -, • Reel mixer	• Type (Combination of types if more than two) • Number of agitators • $P_{el,agitators}$ [kW] • $W_{el,agitators,d}$ [kWh/d]	(Härdtlein et al., 2013)
Digestate treatment	Digestate separation (optional)	• Screw press separator	• Demand for separation • Stationary or mobile separation • Volume Capacity [m^3/h] • $P_{el,separator}$ [kW] • Liquid and solid digestate (TS, VS composition)	(Cielejewski, 2014; Drosg, Fuchs, Al Seadi, Madsen, & Linke, 2015; M. Effenberger, 2015; Häring et al., 2011; KTBL, 2013; Leifker, 2012; Theuvsen & Kröger, 2016; TU Braunschweig, Bauhaus-Universität Weimar, & UMSICHT, 2013; Waelkens & Zetzl, 2015; Wetter, 2016)

	Digestate storage	• Open storage tank • Gas tight storage tank	• Type of cover (open, gastight) • Storage volume capacity • Number of storage tanks • Dimensions of tank: height, radius, surface • Volume headspace (gastight only, gas phase) • Residual gas formation • CH_4 permeation rate (gastight only) • CH_4 leakage by installations (agitators, etc.) • Digestate (TS, VS composition after residual biogas formation) • Overall HRT/OLR for gastight system	(J. Bachmaier, 2012; Böhner, Loch, & Schleicher, 2011; Ebertsch et al., 2012; Edwards, Giuntoli, Agostini, & Marelli, 2014; FNR, 2013; Härdtlein et al., 2013; KTBL, 2013, 2014; Lehner, Effenberger, & Gronauer, 2010; Liebetrau et al., 2010; Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum, 2008; Reinhold, 2012; Reinhold & Gödeke, 2010; Sax, 2014; Vogt et al., 2008; Weißbach, Engler, & Weßeling, 2011)
Gas upgrading	Gas drying	• Gas pipe cooling • External cooling (electric)	• Length of gas pipe • Mass of condensed water • Changes in gas composition • $W_{el,\ gas\ cooling}$ [kWh/d]	(Häring et al., 2011; Ramesohl, Arnold, Althaus, & Urban, 2005; Weidenaar, 2014)
	Desulphurisation (digester subcomponent)	• Biological desulph. in the gas phase of the digester	• H_2S fraction in relation to manure content • Desulph. rate • Air flow into digester • N_2 and O_2 vol./mole fraction • $P_{el,desulphblower}$ [kW] • $W_{el,\ desulphblower}$ [kWh/d]	Various manufacturer specifications + (Besgen, 2005; M. Effenberger, Zölsmann, Mielke, Fischer, & Marx, 2013; Häring et al., 2011; Ramesohl et al., 2005)
Gas utilisation	External gas storage (optional)	-	• Gas storage capacity [m^3]	(Aschmann et al., 2013; Hahn, Ganagin, Hartmann, & Wachendorf, 2014; Holzhammer et al., 2014)
	Gas flare	-	• Gas flare loss [%]	(Gaderer, Lautenbach, Fischer, & Ebertsch, 2007; Koch, 2009)

	CHP units	• Spark-ignited gas engine
		• ignition oil engine
			• Ignition oil consumption [l/d]
			• Combustion air demand [t/d]
			• CHP coefficient
			• Thermal efficiency rate [%]
			• Thermal capacity [kW]
			  o Capacity engine cooling [kW]
			  o Capacity exhaust gas [kW]
			• Methane slip [%]
			• Exhaust gas composition
			• Auxiliary CHP demand (Cooling, Circulation pump, Container fan, gas blower) [kWh/d]
				Various manufacturer specifications + (ASUE, 2014; ASUE & Stadt Frankfurt am Main, 2005, 2011; Härdtlein et al., 2013; Lucas, Gebhardt, Kohl, & Steinrötter, 2002; Reinhold, 2017)(Dachs & Rehm, 2006; Häring et al., 2011; Lemmer, Nägele, & Oechsner, 2012; Naegele, Lemmer, Oechsner, & Jungbluth, 2012)

	Transformer	-	• Transformer capacity $P_{el,transformer}$ [kW]	-

Table 7 Financial parameters (Source for price rates: destatis.de)

Parameter	Value
Period of review	10 a
Interest rate	5 %
Inflation rate	1.88 %
Price increase rate investment (construction)	2.15 %
Price increase rate investment (technical installations)	1.43 %
Price increase rate maintenance	1.95 %
Price increase rate electricity	2,70 %
Price increase rate diesel	1.67 %
Price increase rate wages	1.50 %
Price increase rate insurance	1.50 %
Price increase rate agricultural supplies	1.81 %
Price increase rate district heat	3.88 %

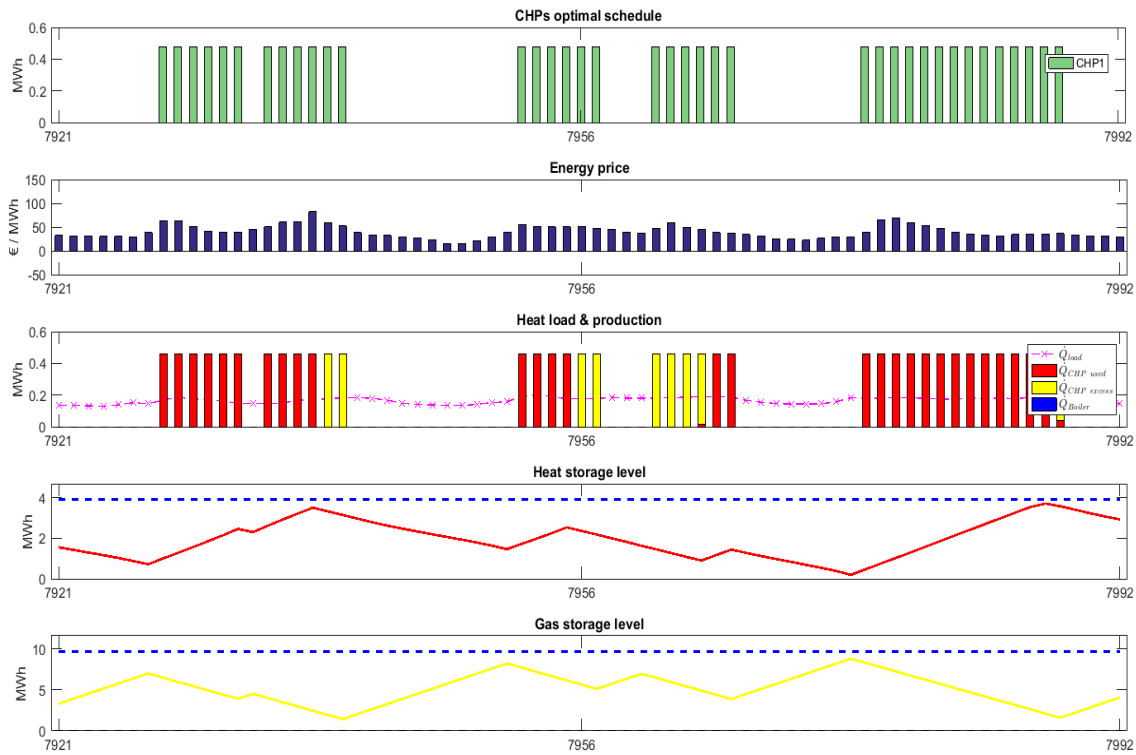

Fig. 1 Optimisation of a CHP unit over a period of 72h; showing from top down: CHP dispatch, energy price, heat load and usage, heat and gas storage level for each hour.

References

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE). (2014). *BHKW-Kenndaten 2014/2015: Module, Anbieter, Kosten.*

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), & Stadt Frankfurt am Main. (2005). *BHKW-Kenndaten 2005: Module Anbieter Kosten.*

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), & Stadt Frankfurt am Main. (2011). *BHKW-Kenndaten 2011: Module Anbieter Kosten*. Berlin.

Aschmann, V., Effenberger, M., Graf, J., Halama, M., Keymer, U., Strobl, M., & Winkler, J. (2013). *Bayernplan: Einsatz von Biogas zum Ersatz von Gaskraftwerken*. Arbeitsgruppe 1 "Potential, verfahrentechnische und ökonomische Konsequenzen für die Biogaserzeugung (No. ISSN 1611-4159). München.

Bachmaier, H., Ebertseder, F., Effenberger, M., Kissel, R., Rivera-Gracia, E., & Gronauer, A. (2011). *Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern: Fortsetzung 2008 - 2010.*

Bachmaier, J. (2012). Treibhausgasemissionen und fossiler Energieverbrauch landwirtschaftlicher Biogasanlagen: Eine Bewertung auf Basis von Messdaten mit Evaluierung der Ergebnisunsicherheit mittels Monte-Carlo-Simulation (Dissertation). Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), & Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). (2007). *Biogashandbuch Bayern - Materialienband.*

Besgen, S. (2005). Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen – Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland – (Dissertation). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Böhner, R., Loch, V., & Schleicher, R. (2011). *Gülle- und Gärresttransport (Teil 1): Grundüberlegungen und Empfehlungen zur Lagerkapazität und Ausbringung.*

Cielejewski, H. (2014). Überschüssige Gülle separieren? *Top Agrar*. (3).

Dachs, G., & Rehm, W. (2006). *Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung*. München.

Drosg, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., & Linke, B. (2015). *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing.*

Ebertsch, G., Kissel, R., Lehner, A., Gracia, E. R., Bachmaier, H., & Effenberger, M. (2012). *Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen* (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft No. 8).

Eder, B., Krieg, A., & Huba-Mang, E. (Eds.). (2012). *Biogas-Praxis: Grundlagen Planung Anlagenbau Beispiele Wirtschaftlichkeit Umwelt* (5., überarb. Aufl.). Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verl.

Edwards, R., Giuntoli, J., Agostini, A., & Marelli, L. (2014). *Solid and gaseous bioenergy pathways, input values and GHG emissions: Calculated according to methodology set in COM(2010) 11 and SWD(2014) 259. EUR, Scientific and technical research series: Vol. 26696*. Luxembourg: Publications Office.

Effenberger, M. (2015). Gärreste richtig aufbereiten. *BLW*. (34).

Effenberger, M., Zölsmann, H., Mielke, A., Fischer, S., & Marx, C. (2013). *Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* (Bayern Biogas Forum No. Nr. IV – 10/2013).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). (2013). *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*. Retrieved from www.biogasportal.info

Gaderer, M., Lautenbach, M., Fischer, T., & Ebertsch, G. (2007). *Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen: Eine Studie über die Abwärmenutzung bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit einer Leistung von 150 und 500 KWel*. Augsburg. Retrieved from http://www.worldcat.org/oclc/259816077

Gerber, M. (2009). Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses (Dissertation). Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

Gerber, M., & Schneider, N. (2015). Density of biogas digestate depending on temperature and composition. *Bioresource Technology*, *192*, 172–176. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.061

Hahn, H., Ganagin, W., Hartmann, K., & Wachendorf, M. (2014). Cost analysis of concepts for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresource Technology*, *170*, 211–220. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.085

Härdtlein, M., Eltrop, L., Messner, J., & Dederer, M. (2013). *Schwachstellen-Identifikation und Optimierungspotenziale von Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Eine technisch-ökonomische Analyse auf der Basis einer Befragung von Biogasanlagenbetreibern.* Endbericht. Stuttgart.

Häring, G., Sonnleitner, M., Zörner, W., Brügging, E., Bücker, C., Wetter, C., & Vogt, R. (2011). *Ökologische und ökonomische Optimierung von bestehenden und zukünftigen Biogasanlagen: „BGA_OPT“*. Abschlussbericht.

Holzhammer, U., Krautkremer, B., Stelzer, M., Jentsch, M., van Oehsen, A., Kirchner, D.,. . . Doderer, H. (2014). *Optimale Konzepte für eine steuerbare und bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan (OptiKobi2).*

Koch, M. (2009). *Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl*. Dissertation. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Ed.). (2013). *Faustzahlen Biogas* (3. Ausg). Darmstadt.

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Ed.). (2014). *Betriebsplanung Landwirtschaft: 2014/15* (24.th ed.). Darmstadt.

Lehner, A., Effenberger, M., & Gronauer, A. (2010). *Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen* (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft).

Leifker, A. (2012). Gepresste Gülle statt Stroh und Späne. *Top Agrar*. (8).

Lemmer, A., Nägele, H.-J., & Oechsner, H. (2012). *Intensivmessprogramm BGA: Detaillierte Datenerhebung an der Biogasanlage „Unterer Lindenhof" – Messungen zur Determination der Einflussgrößen auf den Eigenstrombedarf der Biogasanlage, der Nährstoffverteilung im Fermenter sowie den Emissionen des BHKW's.* Forschungsprojekt „Biogene Gase – Unterer Lindenhof" Endbericht.

Liebetrau, J., Clemens, J., Cuhls, C., Hafermann, C., Friehe, J., Weiland, P., & Daniel-Gromke, J. (2010). Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. *Engineering in Life Sciences*, *10*(6), 595–599. https://doi.org/10.1002/elsc.201000070

Liebetrau, J., Pfeiffer, D., & Thrän, D. (2016). *Collection of Methods for Biogas: Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector* (Energetische Biomassenutzung No. Volume 7). Leipzig.

Lucas, K., Gebhardt, M., Kohl, H., & Steinrötter, T. (2002). *Preisatlas: Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung*. Duisburg.

Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum. (2008). *Merkblatt Gülle-Festmist-Jauche-Silagesickersaft-Gärreste: Gewässerschutz (JGS-Anlagen).*

Naegele, H.-J., Lemmer, A., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2012). Electric Energy Consumption of the Full Scale Research Biogas Plant "Unterer Lindenhof": Results of Longterm and Full Detail Measurements. *Energies*, *5*(12), 5198–5214. https://doi.org/10.3390/en5125198

Ramesohl, S., Arnold, K., Althaus, W., & Urban, W. (2005). *Analyse und Bewertung von Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse: Band 3: Biomassevergasung, Technologien und Kosten der Gasaufbereitung und Potenziale der Biogaseinspeisung in Deutschland*. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen.

Reinhold, G. (2005). Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

Reinhold, G. (2012). Das Endlager unter die Haube bringen. *Top Agrar*. (06/2012), 12–16.

Reinhold, G. (2017). *Integration der Biogaserzeugung in die Landwirtschaft Thüringens*. Abschlussbericht.

Reinhold, G., & Gödeke, K. (2010). *Restgaspotential in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.*

Sax, M. (2014, June). *Methanverluste bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen.*

Stenull, M. (2017). Stand und Entwicklungspotenziale der landwirtschaftlichen Biogasnutzung in Baden-Württemberg – ein regionalspezifischer Vergleich (Dissertation). Universität Stuttgart, Stuttgart.

Technische Universität Braunschweig (TU Braunschweig), Bauhaus-Universität Weimar, & Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT). (2013). *Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe: Endbericht zu Förderprojekt 03KB022.*

Theuvsen, L., & Kröger, R. (2016). *Verbundvorhaben: Nutzung von separierter Rindergülle als alternatives Gärsubstrat in der Biogasproduktion – technische Möglichkeiten, ökonomische und ökologische Bewertung; Teilvorhaben 2*. Schlussbericht.

Vogt, R., Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G., Köppen, S., Daniel, J.,. . . Schultze, C. (2008). *Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland.*

Waelkens, B., & Zetzl, C. (2015, April). *PRODUKTIVITÄTSOPTIMIERUNG VON BIOGASANLAGEN: Hochdruckverfahren zur Stofflichen Wertschöpfung aus Gärresten und Nebenströmen*. 14. FEI-Kooperationsforum, Bonn.

Weidenaar, T. (2014). Designing the biomethane supply chain through automated synthesis.

Weißbach, F., Engler, N., & Weßeling, S. (2011). Effekte der gasdichten Abdeckung von Gärrestlagerbehältern bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik - Agricultural Engineering*. (66), 453–456.

Wetter, C. (2016). *Aktuelle Entwicklungen in der Aufbereitung von Gülle und Gärresten*. 10. Steinfurter Bioenergiefachtagung.