



**Betriebs-Monitoring: Vergleichende
Untersuchung für die Einwerbung und
Vergärung von Grünlandaufwüchsen
Abschlussbericht -
Schwerpunkt Anlagen-Monitoring**

**Rainer Kissel
K.K.L.B. Adikaram
Amelie Pohl
Eunice Rivera Gracia
Mathias Effenberger**

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstraße 2
86179 München

Auftragsdatum: 22.08.2011

Förderkennzeichen: K/11/05

Projektleitung: Dr.-Ing. Mathias Effenberger
M.Sc. Stefan Thurner

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Rainer Kissel
M.Sc. K.K.L.B. Adikaram
B.Eng. Amelie Pohl
Dipl.-Ing. (FH) Eunice Rivera Gracia

Berichtsabschluss: 15.07.2015

Berichtsumfang: 135 Seiten

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	12
1 Einleitung	17
2 Zielsetzung	18
3 Material und Methoden	19
3.1 Anlagenauswahl	19
3.2 Geographische Lage der Grünlandbetriebe	21
3.3 Beschreibung der Pilotbetriebe	22
3.3.1 Beschreibung von Pilotbetrieb #17	23
3.3.2 Beschreibung von Pilotbetrieb #18	25
3.3.3 Beschreibung von Pilotbetrieb #19	28
3.3.4 Beschreibung von Pilotbetrieb #20	30
3.3.5 Beschreibung von Pilotbetrieb #21	32
3.4 Messtechnische Ausstattung der Pilot-Biogasanlagen	35
3.4.1 Nachrüstung von Messgeräten	35
3.4.2 Messverfahren	35
3.5 Datenerfassung und Datenübermittlung	36
3.5.1 Probenahme und chemische Analysen	36
3.5.2 Datenlogger	38
3.5.3 Betriebstagebuch	38
3.6 Zeichnerische Dokumentation der „Grünland-Pilotanlagen“	41
3.6.1 Darstellung von Pilotanlage #17	42
3.6.2 Darstellung von Pilotanlage #18	44
3.6.3 Darstellung von Pilotanlage #19	46
3.6.4 Darstellung von Pilotanlage #20	48
3.6.5 Darstellung von Pilotanlage #21	49
3.7 Berechnung der Treibhausgasbilanz und des kumulierten Energieverbrauchs für die Energiebereitstellung aus Biogas	51
4 Ergebnisse und Diskussion	53
4.1 Einzelbetrachtung der „Grünland-Pilotanlagen“	53
4.1.1 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #17	54
4.1.1.1 Substrateinsatz	54
4.1.1.2 Prozessparameter	56
4.1.1.3 Leistungsparameter	61

4.1.2	Einzelbetrachtung von Pilotanlage #18.....	63
4.1.2.1	Substratzugabe	63
4.1.2.2	Prozessparameter.....	65
4.1.2.3	Leistungsparameter	69
4.1.3	Einzelbetrachtung von Pilotanlage #19.....	71
4.1.3.1	Substratzugabe	71
4.1.3.2	Prozessparameter.....	73
4.1.3.3	Leistungsparameter	76
4.1.4	Einzelbetrachtung von Pilotanlage #20.....	78
4.1.4.1	Substratzugabe	78
4.1.4.2	Prozessparameter.....	81
4.1.4.3	Leistungsparameter	85
4.1.5	Einzelbetrachtung von Pilotanlage #21	86
4.1.5.1	Substrateinsatz.....	86
4.1.5.2	Prozessparameter.....	89
4.1.5.3	Leistungsparameter	93
4.2	Horizontaler Anlagenvergleich	95
4.2.1	Zusammensetzung und Handhabung der Einsatzstoffe	95
4.2.2	Raubelastung und hydraulische Verweilzeit.....	96
4.2.3	Methanausbeute aus den Einsatzstoffen und Methanproduktivität.....	98
4.2.4	Restmethanpotential in den Gärresten.....	99
4.2.5	Elektrische Arbeitsausnutzung.....	101
4.2.6	Energieverwertung	102
4.2.7	THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas.....	105
4.2.8	Effizienzbewertung mit dem Biogas Doc	108
5	Schlussfolgerungen.....	110
	Literaturverzeichnis	113
	Anhang	115

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Geographische Lage der Pilotbetriebe zur Biogaserzeugung vom Grünland/Ackergrasland	21
Abb. 2: Pilotbetrieb 17: Fermenter und Gärrestlager (rechts vorne); Fahrsilo (linke Bildmitte)	23
Abb. 3: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 17	25
Abb. 4: Ansicht der Pilotanlage 18 mit Eintragstechnik, Fermenter und Gärrestlager	25
Abb. 5: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 18	27
Abb. 6: Biogasanlage auf Pilotbetrieb 19: Fermenter (links), Biogasleitung (Mitte) und Nachgärbehälter (rechts)	28
Abb. 7: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 19	30
Abb. 8: Pilotanlage 20: Fermenter (Vordergrund), Gasleitung und Nachgärbehälter (linke Bildmitte).....	30
Abb. 9: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 20	31
Abb. 10: Fermenter (rechts) und Nachgärbehälter (Bildmitte) auf Pilotbetrieb 21	33
Abb. 11: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 21	34
Abb. 12: Start- und Eingabemasken des elektronischen Betriebstagebuchs für PDA	39
Abb. 13: Grundriss Pilotanlage 17	42
Abb. 14: Pilotanlage 17 - Westseite	43
Abb. 15: Pilotanlage 17 – Südseite	43
Abb. 16: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 17	43
Abb. 17: Grundriss von Pilotanlage 18	44
Abb. 18: Schnittdarstellung und Dimensionierung der Behälter von Pilotanlage 18	44
Abb. 19: Gerenderte Darstellung der Pilotanlage 18 - Kocher (oben), isometrische Darstellung (unten).....	45
Abb. 20: Grundriss von Pilotanlage 19	46
Abb. 21: Pilotanlage 19 - Schnittdarstellung und Ansicht von Südost	47
Abb. 22: Pilotanlage 19 – Ansicht von Nordwest	47
Abb. 23: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 19	47
Abb. 24: Grundriss von Pilotanlage 20	48
Abb. 25: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 20 (gerendert)	48
Abb. 26: Grundriss von Pilotanlage 21	49
Abb. 27: Pilotanlage 21 - Ansicht von Nordwest.....	50
Abb. 28: Pilotanlage 21 - Schnittdarstellung der Nordwest-Ansicht	50
Abb. 29: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 21	50
Abb. 30: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 17	54
Abb. 31: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) für Pilotanlage 17	55
Abb. 32: Verweilzeit und Raumbelastung in Stufe 1 von Pilotanlage 17	56
Abb. 33: Essig-, Propionsäure- und NH ₃ -N -Gehalte in Stufe 1 von Pilotanlage 17	57
Abb. 34: Essig-, Propionsäure- und NH ₃ -N-Gehalte in Stufe 2 von Pilotanlage 17	58
Abb. 35: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus Stufe 1 von Pilotanlage 17	58
Abb. 36: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus Stufe 2 von Pilotanlage 17	59
Abb. 37: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 17	60
Abb. 38: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 17	60

Abb. 39: Betriebsstunden der BHKW und tägliche Gesamtleistung von Pilotanlage 17 (gleitende Mittelwerte über 30 Tage).....	61
Abb. 40: Elektrische Arbeitsausnutzung und CH ₄ -Gehalt im Biogas von Pilotanlage 17.....	62
Abb. 41: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 18.....	63
Abb. 42: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der organischen Trockensubstanz für Anlage 18.....	64
Abb. 43: Verlauf von Verweilzeit (VWZ), oTM-Raumbelastung (B _R)und Temperatur in der ersten Vergärungsstufe sowie des Methangehalts im Biogas von Pilotanlage 18.....	65
Abb. 44: Essigsäure-, Propionsäure- und Ammoniak-N-Gehalte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 18	66
Abb. 45: Essigsäure-, Propionsäure- und NH ₃ -N-Gehalte in Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage 18	67
Abb. 46: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Stufe 1 von Pilotanlage 18	68
Abb. 47: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Gärrestlager von Pilotanlage 18.....	68
Abb. 48: Tägliche Betriebsstunden und elektrische Gesamtleistung des BHKW von Pilotanlage 18.....	69
Abb. 49: Verlauf der elektrischen Arbeitsausnutzung und des elektrischen Nutzungsgrads für Pilotanlage 18	70
Abb. 50: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 19.....	71
Abb. 51: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute bei Pilotanlage 19.....	72
Abb. 52: Verlauf von Verweilzeit (VWZ) und Raumbelastung (B _R) in der ersten Vergärungsstufe und CH ₄ . Gehalt des Biogases von Pilotanlage 19.....	73
Abb. 53: Essigsäure-, Propionsäure- und Ammoniak- Gehalte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 19	74
Abb. 54: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 19	75
Abb. 55: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 19.....	75
Abb. 56: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 19	76
Abb. 57: Verlauf der täglichen Betriebsstunden der einzelnen BHKW und der Gesamtleistung beider BHKW von Pilotanlage 19 (gleitender Mittelwert über 30 Tage)	77
Abb. 58: Verlauf des elektrischen Nutzungsgrades und der Arbeitsausnutzung der BHKW von Pilotanlage 19.....	78
Abb. 59: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 20.....	79
Abb. 60: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der zugeführten organischen Trockensubstanz für Anlage 20	80
Abb. 61: Verlauf der hydraulischen Verweilzeit und Raumbelastung in der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20	81
Abb. 62: Essigsäure-, Propionsäure- und NH ₃ -N-Gehalte in Proben aus dem Fermenter (Stufe 1) von Pilotanlage 20	82
Abb. 63: Essigsäure-, Propionsäure- und NH ₃ -N-Gehalte in Proben aus dem Nachgärer (Stufe 2) von Pilotanlage 20	82
Abb. 64: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 20	83

Abb. 65: Trockenmassegehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 20.....	84
Abb. 66: Temperaturverlauf in den Gärbehältern von Pilotanlage 20.....	84
Abb. 67: Verlauf des elektrischen Nutzungsgrades und der Arbeitsausnutzung des BHKW sowie des Methangehaltes im Biogas von Pilotanlage 20.....	85
Abb. 68: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 21.....	87
Abb. 69: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der oTM für Pilotanlage 21.....	88
Abb. 70: Verlauf der Verweilzeit und Raumbelastung in Stufe 1 (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) sowie des Methangehalts im Biogas von Pilotanlage 21.....	89
Abb. 71: Essigsäure-, Propionsäure- und NH ₃ -N-Gehalte in Proben aus der ersten Vergärungsstufe (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) von Pilotanlage 21.....	90
Abb. 72: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus der ersten Vergärungsstufe (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) von Pilotanlage 21.....	91
Abb. 73: TS-Gehalte in Proben aus den Gärbehältern von Pilotanlage 21.....	91
Abb. 74: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 21 (gleitende Mittelwerte über 30 Tage).....	92
Abb. 75: Elektrische Leistung und Arbeitsausnutzung der BHKW von Pilotanlage 21.....	93
Abb. 76: Elektrische Nutzungsgrade der beiden BHKW-Motoren von Pilotanlage 21.....	94
Abb. 77: Mittlere Zusammensetzung der Futterrationen für zwölf Pilot-Biogasanlagen.....	95
Abb. 78: Kennwerte zur organischen Raumbelastung und hydraulischen Verweilzeit der Pilotanlagen.....	97
Abb. 79: Mittlere hydraulische Verweilzeiten im Fermentersystem und Restmethanpotentiale der Gärrückstände aus zwei/drei Untersuchungsjahren („kalt“: Gärtests bei 20 °C; „warm“: Gärtests bei 37 °C; *) Proben nach Temperaturbehandlung im Kocher).....	100
Abb. 80: Mittlere erreichte elektrische Arbeitsausnutzung aufgetragen gegen die spezifische installierte elektrische Leistung für die „Grünland“-Pilotanlagen im Vergleich zu den sechs Pilotanlagen aus dem Monitoring von 2010 bis 2012. Darstellung nach Effenberger et al. (2008).....	102
Abb. 81: Aufteilung des Strombedarfs der Biogasanlagen auf die wichtigsten Anlagenkomponenten.....	104
Abb. 82: Aufteilung der CO ₂ -Äquivalente (schraffierte Säulen) und des KEV (ausgefüllte Säulen) auf die beiden Prozessbereiche Substratbereitstellung (untere Säulenabschnitte) und Biogasproduktion/-verwertung (obere Säulenabschnitte).....	105
Abb. 83: Aufteilung der CO ₂ -Äquivalente der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse.....	106
Abb. 84: Aufteilung des KEV der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse.....	107

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Einsatzstoffe und elektrische BHKW-Nennleistung der ursprünglich zur Auswahl stehenden Biogasanlagen	20
Tab. 2: Kenndaten der fünf Pilotbetriebe zur Biogaserzeugung aus Grasbiomasse.....	22
Tab. 3: Art und Anzahl der nachgerüsteten Messgeräte an den Pilot-Biogasanlagen	35
Tab. 4: Messgeräte und Methoden zur Bestimmung der Substratflüsse	36
Tab. 5: Übersicht der Analyseparameter für Proben von Substraten, Gärgemischen und Gärrückständen	37
Tab. 6: Übersicht der Methoden zur Analyse der Substrate und Gärreste	37
Tab. 7: Einheitliche Annahmen für die Berechnung der THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas für die Grünland-Pilotbetriebe.....	51
Tab. 8: Gängige Warnwerte und Interpretationshinweise für ausgewählte chemische Prozessindikatoren in Rührkesselfermentern (nach Effenberger & Lebuhn, 2008; Effenberger et al., 2011)	53
Tab. 9: Mittlere Belastung mit organischer Trockenmasse für zwölf Pilotanlagen (Angaben in $\text{kg} (\text{m}^3 \text{d})^{-1}$). Von links nach rechts aufsteigend sortiert hinsichtlich Hauptfermenterbelastung (oben) bzw. Gesamtbelastung (unten); Anlagen mit Einsatz von Kleegrassilage schraffiert.....	97
Tab. 10: Mittlere hydraulische Verweilzeit in Tagen für zwölf Pilotanlagen, von links nach rechts aufsteigend sortiert hinsichtlich der Verweilzeit im gasdichten System (Anlagen mit Einsatz von Kleegrassilage schraffiert).....	98
Tab. 11: Methanausbeuten (Standardbedingungen) aus der Gesamtmenge der Einsatzstoffe für zwölf Pilotanlagen (Anlagen mit Einsatz von Kleegrassilage schraffiert).....	98
Tab. 12: Methanproduktivität (Standardbedingungen) des Fermentersystems von zwölf Pilotanlagen, von links nach rechts aufsteigend sortiert	99
Tab. 13: Anteilige Methanausbeute aus den Gärresten im Gärtest bei 37 °C im Vergleich zur gemessenen Methanausbeute aus der eingetragenen Frischmasse (Mittelwert aus einer bis drei Bestimmung(en)) für zwölf Pilotanlagen	101
Tab. 14: Mittlere elektrische Arbeitsausnutzung der BHKW für zwölf Pilotanlagen.....	101
Tab. 15: Mittlere Werte für den spezifischen Strombedarf und für den anteiligen Wärme-/ Strombedarf von zwölf Pilotanlagen.....	103
Tab. 16: Anteiliger Wärmeabsatz und Methannutzungsgrad von zwölf Pilotanlagen	104
Tab. 17: Berechnete THG-Emissionen und KEV für die Biogasketten der Grünland-Pilotbetriebe im Jahr 2013	105
Tab. 18: Spezifische Werte für die THG-Emissionen und den KEV bezogen auf die Netto-Strombereitstellung aus Biogas für die Grünland-Pilotbetriebe	108
Tab. 19: Ergebnisse der Effizienzbewertung der fünf „Grünland“-Pilotanlagen mit dem Biogas Doc	108
Tab. 20: Zusammenstellung verfahrenstechnischer Kenngrößen für die Pilotanlagen (Mittelwerte für die einzelnen Anlagen über die gesamte Beobachtungsperiode; $\bar{\varnothing}$: Durchschnitt der fünf Pilotanlagen; \varnothing : Durchschnitt von sechs Pilotanlagen aus 2012).....	115
Tab. 21: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 17	120

Tab. 22: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 17.....	121
Tab. 23: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 17	122
Tab. 24: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 18.....	124
Tab. 25: Analysenergebnisse der Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage 18	125
Tab. 26: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 18	126
Tab. 27: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 19.....	127
Tab. 28: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 19.....	128
Tab. 29: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 19	129
Tab. 30: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20.....	130
Tab. 31: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20.....	131
Tab. 32: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 20	132
Tab. 33: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 21	133
Tab. 34: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 21	134
Tab. 35: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 21	135

Abkürzungsverzeichnis

ADF	<i>Engl.</i> Acid detergent fibre („Säure-Detergentien-Faser“)
ADL	<i>Engl.</i> Acid detergent lignin (Lignin)
BHKW	Blockheizkraftwerk
Ca	Kalzium
CCM	Corn-Cob-Mix
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FFS	Flüchtige Fettsäuren
FM	Frischmasse
FOS/TAC	Quotient aus flüchtigen organischen Säuren und Carbonatpuffer
GPS	Getreide-Ganzpflanzensilage
K	Kalium
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
N	Stickstoff
NDF	<i>Engl.</i> Neutral detergent fibre („Neutral-Detergentien-Faser“)
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
N _{org}	Organischer Stickstoff
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
OS	Originalsubstanz
oTM	organische Trockenmasse
oTS	organische Trockensubstanz
P	Phosphor
V _N	Gasvolumen bei Standardbedingungen ($\vartheta = 0\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$)

Zusammenfassung

Mit Aufnahme der „Grünlandbetriebe“ in das Biogas-Monitoring der LfL wurde der Kreis der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion um fünf Betriebe erweitert, die Biogas auf der Basis von Grünlandflächen oder Klee gras im ökologischen Landbau erzeugen. Spezifische Ziele dieser Fortsetzung des Biogas-Monitorings waren das Aufspüren technischer und organisatorischer Schwachstellen bei der Nutzung von Grasbiomasse für die Biogasgewinnung, die Untersuchung der Prozessstabilität bei der Vergärung der stickstoff- und faserreichen Biomasse und die Ableitung von Empfehlungen für die erfolgreiche Ausgestaltung von Biogasketten auf Basis von Grünlandaufwuchs oder Ackergräsern. Natürlich sollten auch die Daten und Erfahrungen von diesen Betrieben zu anderen Pilotanlagen, die überwiegend Stärke haltige Energiepflanzen oder tierische Wirtschaftsdünger verwerten, in Vergleich gesetzt werden.

Für das Monitoring wurden drei konventionell wirtschaftende Betriebe in Grünlandgebieten des Allgäus und des Bayerischen Waldes und zwei ökologisch wirtschaftende Betriebe im Tertiär-Hügelland ausgewählt. Der Massenanteil von Grünlandaufwuchs/Klee grassilage am Substrateintrag in die Biogasanlagen der Betriebe betrug im Mittel über die Beobachtungsperiode 26 bis 59 %. Weitere bedeutende Substrate (Massenanteil > 5 %) waren Rindergülle, Rindermist, Geflügelmist und Maissilage. Der Massenanteil von Gras an der Gesamtmasse der pflanzlichen Einsatzstoffe betrug 61 bis 95 %.

Vier der Biogasanlagen werden von Landwirten betrieben, die größte Anlage von einer Betreibergesellschaft. Das Spektrum der installierten elektrischen BHKW-Leistung der Biogasanlagen reicht von 100 bis 625 kW. In den fünf Anlagen kommen ausschließlich Rührkesselfermenter in klassischer landwirtschaftlicher Bauweise zum Einsatz. Das Anlagen-Layout ist in einem Fall einstufig, ansonsten zweistufig. Bezogen auf das vorhandene Gärraumvolumen ergibt sich eine Spanne der spezifischen installierten elektrischen Leistung von 0,06 bis 0,21 kW m⁻³. Die überschüssige BHKW-Wärme wird für die Bereitstellung von Heizwärme und für die Trocknung landwirtschaftlicher/forstwirtschaftlicher Güter genutzt.

Zu Beginn des Monitorings der Pilotbetriebe wurden die Stammdaten der einzelnen Biogasanlagen, d. h. die vorhandenen Einrichtungen und ihre Dimensionierung im Detail dokumentiert und es wurden schematische Darstellungen der Anlagen erstellt. Auf Basis eines Aufmaßes wurden hochwertige Dokumentationsunterlagen angefertigt, die den Betreibern zur Präsentation ihrer Anlagen zur Verfügung stehen.

Während der ca. zweieinhalb Jahre währenden Beobachtungsperiode wurden auf den Betrieben kontinuierlich die Bewegungsdaten über ein (elektronisches) Betriebstagebuch und Datenlogger erfasst. Die Betriebe wurden monatlich aufgesucht, um mit dem Betreiber den Status der Anlagen zu diskutieren und Proben für die chemische Analyse der Einsatzstoffe, der Gärgemische und der Gär rückstände zu gewinnen. Aus den gewonnenen Daten wurde in einer Einzelbetrachtung der Verlauf des Anlagenbetriebs hinsichtlich der Stabilität der Gärbiologie, der Biogasproduktion und der Arbeitsausnutzung des BHKW dargestellt und auf dem Hintergrund der Interventionen durch den Anlagenbetreiber interpretiert (Kapitel 4.1). Für den horizontalen Vergleich der Anlagen untereinander und mit früheren Pilotanlagen wurden grundlegende verfahrenstechnische Kennwerte über den gesamten Beobachtungszeitraum ausgewertet (Kapitel 4.2).

Im Folgenden werden die fünf „Grünland-Pilotbetriebe“ und speziell der Betriebserfolg der Biogasanlage auf Basis der Beobachtungen während des Monitorings kurz charakterisiert.

Pilotbetrieb #17: Herausragendes Merkmal dieses ökologisch wirtschaftenden Betriebs ist die für die Vergärung äußerst anspruchsvolle Substratmischung von Rinder- und Geflügelmist mit dem Hauptsubstrat Klee gras. Im Vergleich zu den anderen vier Anlagen war die organische Raumbelastung in der ersten Stufe signifikant höher. Obgleich wiederholt deutliche Anzeichen für eine Hemmung des Gärprozesses beobachtet wurden, erzielte die Anlage eine respektable Auslastung des BHKW von knapp 91 %. Dem Betriebsleiter gelang es, Biolandwirte aus der Region als Substratlieferanten zu integrieren. Da er die Ernte des Klee grasses übernimmt und die beteiligten Landwirte mit Gärrest aus der Biogasanlage beliefert, konnte eine Situation geschaffen werden, die alle Beteiligten zufrieden stellt. Erwähnenswert ist, dass dieser Betrieb als einziger unter den fünf hier betrachteten Pilotbetrieben während der Beobachtungsperiode ein zusätzliches BHKW für die flexible Stromeinspeisung installierte, welches während der letzten Monaten jeweils an sieben Stunden pro Tag produzierte. Für diesen Betrieb wurden die geringsten spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen aus der Biogaskette errechnet. Wegen des eingeschränkten Wärmenutzungsgrades erreichte er im Saldo dann nur den dritten Rang bezüglich der spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen der Strombereitstellung. Verbesserungsbedarf besteht in diesem Betrieb vor allem für die Wärmeverwertung sowie die Stabilisierung der Gärbiologie.

Pilotbetrieb #18: Dieser Biobetrieb verwertete in seiner einstufigen Biogasanlage neben der betriebseigenen Milchviehgülle nahezu ausschließlich Klee gras. Damit erreichte er unter den fünf Betrieben mit knapp 63 % den höchsten Anteil an Grasbiomasse in der Futtermischung für die Biogasanlage (übertroffen nur von Betrieb #15 aus dem vorausgegangenen Monitoring mit 77 % Klee grasanteil). Trotz einer längeren Phase mit gärbiologischen Problemen konnte auch diese Anlage mit knapp 90 % insgesamt noch eine respektable elektrische Arbeitsausnutzung erzielen. Der Wegfall des Landschaftspflegebonus im letzten Jahr der Untersuchung bewog die beiden Betreiber dazu, den zunächst marginalen Anteil an Mais in der Futtermischung zu erhöhen, um den Gärprozess zu stabilisieren und den Kontrollaufwand für die Biogasanlage herabzusetzen. Für die Ausweitung des Wärmeabsatzes wurde zusätzlich zu der Trocknungsanlage für Holzhackschnitzel eine Anlage zur Trocknung von Rundballen eingerichtet. Dies geschah auch zur Verbesserung der Qualität des Futters für die Tiere zur Produktion von Milch aus ökologischer Landwirtschaft. Das einstufige, klassische Anlagenkonzept funktionierte mit dem hohen Grasanteil erstaunlich gut. Die Methanproduktivität des Fermentersystems ist mit Abstand die höchste, wobei die Anlage von dem großvolumigen Gärrestlager mit Gaserfassung profitiert. Die Anlage zeichnete sich durch einen geringen Eigenenergiebedarf aus. Im Saldo erreichte dieser Betrieb wegen des guten Wärmenutzungsgrades den zweiten Rang bei den spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen der Strombereitstellung. In der Bewertung mit dem *Biogas Doc* erzielte die Anlage als einzige ein „gut“ und setzte sich deutlich von den anderen vier Anlagen ab.

Pilotbetrieb #19: Dieser konventionelle Betrieb in der klassischen Grünlandregion des Allgäus betreibt die Biogasanlage mit Gülle aus der eigenen Milchviehhaltung sowie mit Grassilage von eigenen Grünlandflächen. Da die Flächenausstattung des Betriebs für einen ganzjährigen Volllastbetrieb des BHKW nicht ausreichte, wurde für die Wintermonate Maissilage zugekauft. Der Anteil von Grassilage in der Futtermischung betrug für diese Anlage im Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum lediglich 26 %. Daher kann in diesem Fall nur mit Einschränkung von einer „Gras-Anlage“ gesprochen werden. Die Bi-

ogasanlage ist aufgrund ihrer zwölfjährigen Historie etwas „verbaut“. Der Hauptgärbehälter ist in etwa doppelt so groß wie der Nachgärbehälter und es steht ein außerordentlich großzügiger Gärraum zur Verfügung, was zu sehr niedrigen Raumbelastungen führte. Daher und aufgrund des vergleichsweise hohen Anteils an Maissilage gab es während des Monitorings keinerlei Anzeichen für eine Hemmung der Gärbiologie. Der niedrige Gesamt-Auslastungsgrad der installierten elektrischen Leistung wurde hauptsächlich durch den Mangel an Substrat verursacht. Die Anlage erzielte insgesamt ein „ausreichend“, Verbesserungsbedarf besteht bei der Ausnutzung des vorhandenen Gärraums und der Wärmeverwertung. Wegen des hohen Mineraldüngereinsatzes und des beschränkten Wärmeabsatzes landete die Anlage bei den beiden hier betrachteten spezifischen Umweltwirkungen der Strombereitstellung auf dem letzten Rang.

Pilotbetrieb #20: Dieser konventionelle Betrieb ohne Tierhaltung bezieht den zur Versorgung der Biogasanlage erforderlichen flüssigen Wirtschaftsdünger von den Landwirten aus seiner nächsten Umgebung. Das Gras von den eigenen Grünlandflächen wird mit Ladewagen geborgen, ohne weitere Zerkleinerung einsiliert und dann in der Biogasanlage eingesetzt. Die Betriebsphilosophie besteht in einem möglichst geringen technischen Aufwand und einer Produktion auf angepasstem Niveau, um Problemen vorzubeugen, die in einer Region durch hohen Flächendruck entstehen können. Die Anlage ist die einzige unter den fünf hier untersuchten Biogasanlagen, die über keine Gaserfassung aus dem Gärrestlager und keine Förderpumpe verfügt. Außerdem wurden hier über den längsten Zeitraum ausschließlich Gülle und Grassilage verwertet. Die mangelhafte Abstimmung von Anlagentechnik und Substrat verursachte massive Probleme und trieb den Eigenstrombedarf in die Höhe. Die ursprünglich vorhandene Rührtechnik konnte die Entmischung des Substrates im Gärbehälter nicht verhindern. Es entstand immer wieder eine ausgeprägte Schwimmschicht. Außerdem bildete sich ein großvolumiger Sedimentkörper, so dass der Fermenter schließlich komplett gereinigt werden musste. Die technischen Defizite führten zu einem ineffektiven Gärprozess, so dass nur eine BHKW-Auslastung von knapp 59 % erreicht wurde. Der Austausch des Stabmixers im Fermenter durch ein Paddelrührwerk im Zuge der Revision konnte zwar die Durchmischung deutlich verbessern, dennoch kam es auch in der zweiten Hälfte der Beobachtungsperiode zu erheblichen gärbiologischen Instabilitäten. Die insgesamt „ungenügende“ Effizienzbewertung mit dem *Biogas Doc* war in diesem Fall ganz klar der ineffektiven Fermentertechnik zuzuschreiben. Die Wärmeverwertung war hingegen vorbildlich und brachte die Anlage auf den ersten Rang bei den CO₂-Äq.-Emissionen und dem KEV der Strombereitstellung.

Pilotbetrieb #21: Diese Pilotanlage wurde als einzige nicht von Privatpersonen, sondern von einer Investment-Gesellschaft für Projekte zur Produktion von grünem Strom betrieben. Das Konzept bestand darin, den umliegenden Landwirten als Biomasselieferanten eine Verwertungsmöglichkeit für ihre Grünlandflächen auf Grenzertragsstandorten zu bieten. Insgesamt traten erhebliche Mängel technischer und konzeptioneller Art auf. Beispiele hierfür sind ungeeignete Einrichtungen zur Feststoffeinbringung, zur Durchmischung, zur Substratförderung und zur Gärbehälterbeheizung. Mehrere Anlagenkomponenten mussten daher ausgetauscht werden. Das Heizungssystem mit externem Wärmetauscher führte in Verbindung mit langen Pumpstrecken zu einem starken Pumpenverschleiß. Ein nachträglich installiertes Satelliten-BHKW konnte mit dem Substrat von den umliegenden Flächen der ortsansässigen Landwirte nicht ausgelastet werden. Hinzu kam ein schlechtes Erntejahr 2013. Deshalb musste mit zunehmender Projektlaufzeit immer mehr Maissilage zugekauft werden und es kam zu einem wirtschaftlichen Ungleichgewicht zwischen den Erlösen aus dem Energieabsatz und den Kosten für die Substratbeschaffung und Instandhaltung der Anlage. Insgesamt konnten die BHKW nur zu 70 % ihrer Kapazität ausgelas-

tet werden. Das insgesamt unausgereifte Anlagenkonzept führte auch zu einer relativ schlechten THG- und KEV-Bilanz der Strombereitstellung aus dieser Anlage. Verbesserungsbedarf besteht hinsichtlich der effektiveren Ausnutzung des vorhandenen Gärraums und der Wärmeverwertung. Letztlich ist die Anlage wohl für den gewählten Standort überdimensioniert.

Im horizontalen Vergleich lag die organische Belastung des Fermentersystems (inklusive Nachgärer) bei drei der Grünland-Anlagen (19, 20 und 21) unter $1,5 \text{ kg m}^{-3}$ und damit in einem sehr extensiven Bereich, in dem keine biologischen Probleme zu erwarten sind. Die Gesamtanlagen der Betriebe 17 und 18 waren mit 2,2 bzw. $3,1 \text{ kg m}^{-3}$ deutlich höher, aber keinesfalls außergewöhnlich hoch belastet. Der Durchschnitt der Gesamt-Raumbelastung lag für die Anlagen 17 bis 21 mit $1,8 \text{ kg m}^{-3}$ erkennbar unter dem Durchschnitt der Pilotanlagen 2012 (##11 bis 16).

Die Methanausbeute aus der eingetragenen Frischmasse fiel bei den Anlagen 12, 15, 16 und 17 am höchsten aus, da dort keine Gülle eingesetzt wurde. Methanausbeuten aus der oTM unter $300 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ wurden in den Anlagen mit hohen Anteilen vergleichsweise schwer abbaubarer Einsatzstoffe in Form von strohreinem Rinder-Festmist (#17) bzw. langfasriger Grassilage (#20) gemessen. In diesen beiden Biogasanlagen traten auch erhebliche Prozessstörungen auf.

Bei dem wiederholt durchgeführten Silo-Controlling wurden zeitweise Mängel an der Gärqualität der (Klee)Grassilagen festgestellt. Klare Zusammenhänge zwischen einer mangelhaften Silagequalität und den beobachteten gärbiologischen Störungen konnten anhand der Datenlage jedoch nicht nachgewiesen werden. In Betrieb #20 war die deutlich zu trockene Silage mit zu geringer Dichte sicherlich eine wichtige Ursache für die schwerwiegenden technischen Probleme in der Biogasanlage.

Bezüglich der Methanproduktivität des Fermentersystems wiesen vier der Anlagen mit den höchsten Gülleanteilen Werte von unter $0,4 \text{ m}^3 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$ auf, die höchsten Werte wurden für einstufige Anlagen mit hohen Anteilen an Gras oder Stärke reichen Energiepflanzen ermittelt.

Das Spektrum der in den Gärrückständen aus elf Pilotanlagen ermittelten Methanerträge aus einer Tonne Originalsubstanz ist weit und reicht von $V_N = 1,0$ bis $11,7 \text{ m}^3$. Die Anlagen ##17 und 19 bis 21 reihten sich in den unteren Bereich dieses Spektrums ein.

Bezüglich der Auslastung der installierten elektrischen Leistung ergab sich für die fünf Grünland-Pilotbetrieb ein uneinheitliches Ergebnis, das insgesamt schlechter ausfiel als für die zuvor untersuchten Pilotbiogasanlagen. Für zwei Betriebe war die BHKW-Auslastung durch die Verfügbarkeit der Einsatzstoffe limitiert, was zuvor im Monitoring noch nie beobachtet worden war.

Auch beim Eigenstrombedarf der fünf Pilotanlagen war das Bild uneinheitlich. Während drei Anlagen sehr günstige Werte zeigten, war bei den beiden anderen der Strombedarf überdurchschnittlich hoch. Als Ursache hierfür konnte in einem Fall die nicht auf das Substrat abgestimmte Anlagentechnik, im anderen Fall ein insgesamt sehr energieintensives Anlagenkonzept verbunden mit einer schlechten Auslastung ausgemacht werden. Größter Stromverbraucher war in allen Fällen die Rührtechnik.

Die mit dem ‚THG-Rechner‘ der LfL berechneten CO_2 -Äquivalentemissionen der Biogaskette stammten in vier von fünf Betrieben mit einem Anteil von 63 bis 69 % überwiegend aus der Substratbereitstellung. Der weitaus überwiegende Anteil des KEV hingegen wurde bei vier von fünf Betrieben mit 68 bis 82 % durch die Biogasproduktion-/verwertung ver-

ursacht. Eine weitere Aufgliederung der Substratbereitstellung zeigte für alle Betriebe die dominierende Rolle der Lachgasemissionen sowie gegebenenfalls der Bereitstellung von Mineraldünger für die berechneten CO₂-Äq.-Emissionen. Im Bereich Biogasproduktion/-verwertung war entweder der Methanschlupf des BHKW oder der Strombezug aus dem Netz die größte Quelle für CO₂-Äquivalente.

Die berechneten spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen der Stromeinspeisung aus den Grünland-Pilotanlagen liegen in der Nähe des Emissionsfaktors für die Strombereitstellung aus Erdgas von 446 g kWh⁻¹ und variieren nur wenig. Erst wenn für die externe Wärmenutzung eine Substitution von Erdgas (für die Wärmeerzeugung) angerechnet wird, ergibt sich für die den „Biogasstrom“ eine Netto-Vermeidung von CO₂-Äq.-Emissionen gegenüber der Strombereitstellung aus Erdgas (eine Gutschrift für vermiedene Emissionen aus der offenen Lagerung von Gülle/Mist wurde nicht vorgenommen). Beim KEV fallen die Unterschiede zwischen den Betrieben deutlicher aus.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass bei der Vergärung hoher Anteile von Grasbiomasse – mehr als bei anderen Substratkombinationen – die Abstimmung der Anlagentechnik auf das schwieriger zu handhabende Substrat der entscheidende Faktor für einen funktionssicheren und effizienten Anlagenbetrieb ist. Hierbei ist die Fermenterbauweise eindeutig von nachrangiger Bedeutung gegenüber der Auswahl der übrigen Anlagenkomponenten und dem Gesamtkonzept. Mit einer solchen, optimal abgestimmten Anlage und einer sorgfältigen Prozesskontrolle lassen sich die gärbiologischen Herausforderungen bei der Vergärung hoher Anteile an Grasbiomasse meistern. Ein erfolgreicher dauerhafter Einsatz von ausschließlich Grasbiomasse – auch in Kombination mit Wirtschaftsdünger – konnte im Rahmen des Biogasanlagen-Monitorings der LfL bisher allerdings nicht beobachtet werden.

1 Einleitung

Der Rückgang der Rinderbestände in Bayern um rund 10 % von 2003 bis 2008 hatte zur Folge, dass im Jahr 2008 ca. 100.000 ha Dauergrünlandfläche nicht mehr für die Tierernährung benötigt wurden (Würfl et al., 2008). Diese Entwicklung wird sich weiter fortsetzen, so dass bis 2020 voraussichtlich weitere 166.000 bis 209.000 ha Grünland freigesetzt werden (LfL, 2011).

Zur Erhaltung und Pflege der betroffenen Flächen sowie zur Aufrechterhaltung landwirtschaftlicher Strukturen in den betroffenen Gebieten ist eine wirtschaftliche Alternativnutzung anzustreben. Die Biogaserzeugung könnte hierfür eine Option sein.

Gras ist schon lange ein begehrtes Substrat für die Biogaserzeugung. In einer deutschlandweiten Befragung gaben 12 % der Betreiber an, in ihrer Biogasanlage Gras einzusetzen (Daniel-Gromke et al., 2014). Gras war damit nach Mais der zweithäufigste nachwachsende Rohstoff für die Biogasproduktion. Für Bayern ermittelt die LfL auf Basis einer Stichprobe einen durchschnittlichen Anteil von Grassilage am Substrateinsatz in Biogasanlagen von 10 % in Bezug auf die Masse bzw. 14 % in Bezug auf den Methanertrag (Aschmann et al., 2013).

Allerdings stellt der Einsatz hoher Anteile an Grünlandaufwuchs oder Ackergräsern bei der Vergärung im Vergleich zu Gülle und stärkebetonten Energiepflanzen höhere Anforderungen an die Technik und das Anlagenmanagement. Dies resultiert aus der chemischen Zusammensetzung und der Struktur dieses Rohstoffes. Der Rohproteingehalt in Grassilage erreicht Werte bis 20 % und kann damit mehr als doppelt so hoch sein wie der von Maissilage. Beim anaeroben Abbau der Grasbiomasse wird daher verhältnismäßig viel ammoniakalischer Stickstoff gebildet, der hemmend auf die Biozönose wirken kann. Hohe Anteile von Lignocellulose und die faserige Beschaffenheit erfordern spezielle technische Lösungen, damit die Betriebssicherheit der Rühr- und Fördertechnik gewährleistet werden kann.

Auf Basis einer stichprobenartigen Erfassung der Betriebsdaten von ca. 1200 Biogasanlagen stellte Hölker (2015) fest, dass oberhalb eines Massenanteils von 50 - 60 % Grassilage die BHKW-Auslastung mit zunehmendem Grasanteil deutlich abnahm. Der Anteil der Biogasanlagen in der Stichprobe, die mehr als 50 % Grassilage einsetzten, lag unter 10 %, und diese Anlagen hatten eine deutlich geringere installierte elektrische BHKW-Leistung. Die organische Raumbelastung der Hauptfermenter dieser Anlagen lag unter ca. $4 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$, bei den wenigen Anlagen mit mehr als 80 % Grassilage in den Einsatzstoffen unter $2,7 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$. Da gleichzeitig die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Proben aus diesen Gärbehältern vergleichsweise gering war, schien der Grund für die mangelhafte BHKW-Auslastung nicht in einer Hemmung des Gärprozesses, sondern in einer zu niedrigen Biogasproduktion zu liegen. Ob die Betreiber ihre Anlagen aus übertriebener Vorsicht oder aus Mangel an Substrat nicht höher belasteten, konnte nicht geklärt werden.

Im Labormaßstab konnten Andrade & Weber (2013) bei einer organischen Raumbelastung von $2,5 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ eine stabile Ko-Vergärung von Gras mit Rindergülle oder Stärkebetonten Energiepflanzen bis zu einem Grassilageanteil von 50 % an der oTM etablieren. Bei der ausschließlichen Vergärung von Grassilagemischungen (Deutsches Weidelgras / Rotklee) wurde bereits ab einer organischen Raumbelastung von $2,0 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ eine Hemmung der Methanbildung beobachtet (Andrade et al., 2014).

2 Zielsetzung

Mit Aufnahme der „Grünlandbetriebe“ in das Biogas-Monitoring der LfL wurde der Kreis der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion um fünf Betriebe erweitert, die überwiegend „Grasbiomasse“ einsetzen: vom Grünland oder in Form von Klee gras von ökologische bewirtschafteten Ackerflächen. Ein generelles Ziel war es, die Daten und Erfahrungen von diesen Betrieben mit anderen Pilotanlagen in Vergleich zu setzen, die überwiegend Stärke haltige Energiepflanzen oder tierische Wirtschaftsdünger verwerten.

Ein spezifisches Ziel war das Aufspüren technischer und organisatorischer Schwachstellen bei der Nutzung von Grünland für die Biogasgewinnung. Ferner galt es herauszufinden, unter welchen Umständen die Prozessstabilität durch die stickstoff- und faserreiche Grasbiomasse gefährdet ist und wie in solchen Fällen einer Beeinträchtigung der Biozönose in der Praxis begegnet werden kann. Neben Betrieben in klassischen Grünlandregionen ist dies vor allem für den ökologischen Landbau von Belang, da hier in der Regel das normalerweise als Gründünger verwendete Klee gras geerntet und dann vergoren wird. Dessen Stickstoffgehalt liegt höher als der von Grassilage, weshalb auch das Risiko einer Hemmwirkung zunimmt.

Mit den erarbeiteten Kenndaten sollten Empfehlungen für die technische Ausstattung und das Management von Biogasanlagen gegeben werden, die überwiegend Grasbiomasse einsetzen.

3 Material und Methoden

3.1 Anlagenauswahl

Zunächst wurden die Regionen festgelegt, in denen die Betriebe gelegen sein sollten. Von entscheidender Bedeutung war dabei, dass die gewonnenen Erkenntnisse von möglichst vielen potentiellen Biogasproduzenten genutzt werden können, bei denen ähnliche Bedingungen vorherrschen. Diesem Kriterium entsprachen der Bayerische Wald, das Alpenvorland und das Allgäu. Für die auszuwählenden Betriebe wurde im Kreise der Projektbearbeiter ein „Wunschkatalog“ erstellt, der im Wesentlichen die folgenden Punkte enthielt (in der Reihenfolge abnehmender Wichtigkeit):

1. Mindestens ein Pilotbetrieb mit intensiv genutztem Grünland und einer mit extensiv genutztem Grünland. Mindestens ein Pilotbetrieb im Grünlandgürtel entlang der bayerischen Alpen, ein weiterer im Bayerischen Wald und einer in Franken. Mindestens einer der Pilotbetriebe sollte ökologisch wirtschaften.
2. Der Grasanteil an der Gesamtmasse der eingesetzten pflanzlichen Substrate sollte größer als 60 % sein.
3. Der Betrieb sollte zur exakten Erntemengenerfassung über eine Fuhrwerkswaage verfügen.
4. Es sollte mindestens je ein Betrieb mit den folgenden Ernteketten dabei sein: Häcksler, Kurzschnittladewagen, Überladeverfahren (und eventuell Ballenkette).
5. Es sollte mindestens je ein Betrieb mit Zerkleinerungstechnik vor dem Eintrag in den Fermenter bzw. nach der Hydrolysestufe dabei sein.
6. Zu bevorzugen wären Betriebe, die bereits über eine gute messtechnische Ausstattung verfügen.

Trotz intensiven Bemühens gestaltete sich die Suche nach Betrieben, die den gewünschten Anforderungen entsprachen, als schwierig. Dies lag unter anderem daran, dass nicht nur das für das Monitoring wichtige Kriterium eines möglichst hohen Anteils an Grünlandaufwuchs erfüllt werden musste, sondern auch die Eignung der Betriebe für das Teilprojekt „Erntelogistik“ zu berücksichtigen war. Mit Unterstützung von Anlagenherstellern sowie den Mitarbeitern der staatlichen Beratung aus den entsprechenden Regionen konnten schließlich 15 Betrieben identifiziert werden, die hinsichtlich Anlagenstruktur, Einsatzstoffen, Ernteverfahren und Region geeignet erschienen.

Diese in Tab. 1 gelisteten Anlagen lagen vorwiegend in der Südhälfte Bayerns. Ausnahmen waren jeweils ein Betrieb in Mittelfranken, Unterfranken und in der nördlichen Oberpfalz. Nach Besichtigung und Erhebung der Basisdaten jedes einzelnen Betriebs wurde eine LfL-interne Präsentation unter Teilnahme der Bearbeiter und Leiter der Teilprojekte Wirtschaftlichkeit, Erntelogistik und Biogas-Monitoring durchgeführt. Im Anschluss an diese Präsentation erfolgte die Auswahl nach den genannten Kriterien. Von den klassischen Grünlandregionen konnten nur Anlagen aus dem Allgäu und dem Bayerischen Wald ausgewählt werden. Im oberbayerischen Voralpenland wurden keine geeigneten Betriebe gefunden. Nach der Absage eines bereits ausgewählten Betriebs im Bayerischen Wald aufgrund arbeitstechnischer Gründe konnte kurzfristig ein Ersatz in der gleichen Region gefunden werden.

Tab. 1: Einsatzstoffe und elektrische BHKW-Nennleistung der ursprünglich zur Auswahl stehenden Biogasanlagen

Elektr. BHKW-Nennleistung, kW	Massenanteile der Einsatzstoffe, %			
	Gras	Mais	Gülle	Mist
500	60		40	
160	70 - 80		20-30	
300	60	7	33	
500	60 - 70	30 - 40		
60	47	9	44	
60	60	7	33	
100	44	14	42	
110	28	12	60	
265	>60			30
1000	>60		30	
40	70-80		20-30	
180	66		34	
190	65 - 70	15	15	
366	>60		30	
600	70		30	

Der Hauptgrund für das Aussortieren von Betrieben lag in den Einsatzstoffen. Die im Vorfeld eingeholten Informationen bezüglich der eingesetzten Rohstoffe erwiesen sich bei den Anlagenbesuchen wiederholt als nicht mehr zutreffend. Hauptsächlich aufgrund technischer Probleme, die durch hohe Grasanteile verursacht wurden, hatten sich die betreffenden Betriebsleiter für einen Substratwechsel entschlossen, so dass ein Anteil von 60 % Grasbiomasse an den eingesetzten Energiepflanzen nicht mehr erreicht wurde.

Zwei der fünf ausgewählten Betriebe befinden sich nicht in klassischen Grünlandregionen, sondern im Tertiär-Hügelland. Bei diesen handelt es sich um Biobetriebe, die hohe Anteil von Klee gras einsetzen und auf diese Weise die Stickstoffversorgung ihrer Felder sichern. Durch die Vergärung des Aufwuchses bietet sich diesen Landwirten die Möglichkeit gezielter zu düngen, als es sich durch einfaches Einarbeiten der gesamten Pflanzenmasse realisieren ließe. Der positive Nebeneffekt dieser Maßnahme ist ein zusätzliches Einkommensfeld durch die Energieproduktion. Für das Anlagenmonitoring waren diese beiden Betriebe besonders interessant, da sich die Biogasproduktion aus Klee grassilage wegen des höheren Stickstoffgehalts noch schwieriger gestaltet als aus Wiesengrassilage.

Im Anschluss an die Auswahl der Betriebe wurde mit den Betriebsleitern eine schriftliche Vereinbarung über die Zusammenarbeit mit der LfL getroffen. In dieser Vereinbarung wurden die jeweiligen Rechte und Pflichten der beiden Projektpartner vertraglich abgesichert (siehe Anhang 2). Da die Daten der Grünlandanlagen in den Datenpool der bisher 16 Pilotanlagen integriert werden sollten, wurden sie mit den Nummern 17 bis 21 versehen.

3.2 Geographische Lage der Grünlandbetriebe

Alle fünf ausgewählten Betriebe befinden sich in der Südhälfte Bayerns in den Landkreisen Oberallgäu, Landsberg, Landshut und Freyung-Grafenau (Abb. 1).

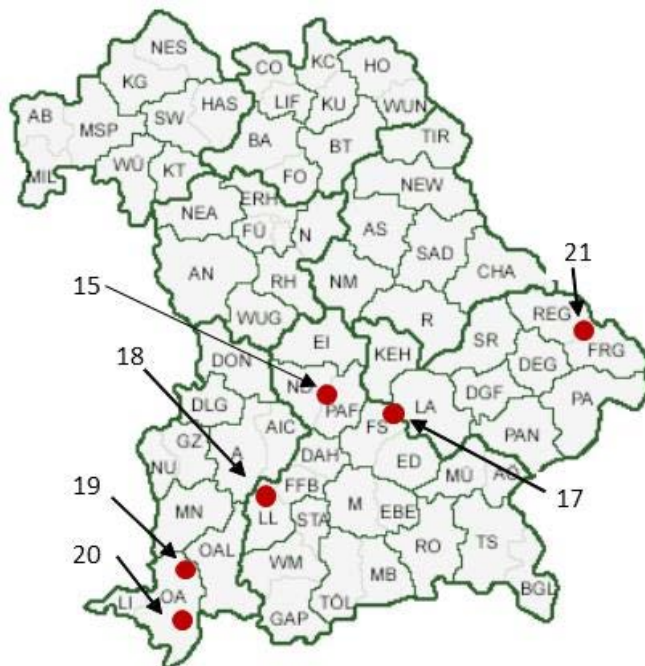


Abb. 1: Geographische Lage der Pilotbetriebe zur Biogaserzeugung vom Grünland/Ackergrasland

3.3 Beschreibung der Pilotbetriebe

Das Spektrum der installierten elektrischen BHKW-Leistung der ausgewählten Biogasbetriebe reicht von 100 bis 625 kW. In den Anlagen wurden insgesamt fünf Gas-Otto und drei Zündstrahlmotoren zur Stromproduktion eingesetzt. Bezogen auf das vorhandene Gärraumvolumen ergibt sich eine Spanne der spezifischen installierten elektrischen Leistung von 0,06 bis 0,21 kW m⁻³ (Tab. 2). Bis auf Anlage 19 verfügen alle beteiligten Betriebe über mehr oder weniger ausgebaute Wärmenutzungspfade.

Tab. 2: *Kenndaten der fünf Pilotbetriebe zur Biogaserzeugung aus Grasbiomasse*

Anlage	17	18	19	20	21
BHKW: Elektr. Nennleistung, kW	265 (+530)*	250	147	100	625
BHKW: Motorausstattung	1 GO; 1 ZS (Abgasturb.)	1 ZS	2 GO	1 GO	1 GO; 1ZS
Nutzvolumen Fermenter, m ³	1.200	1.200	1.200	770	2.400
Nutzvolumen Nachgärer, m ³	1.200	-	600	770	2.400
Nutzvolumen Gärrestlager, m ³	3.000	2.700	1.200	600	3.600
Spezifische installierte elektr. Leistung, kW m ⁻³	0,11 (0,17)*	0,21	0,08	0,06	0,13
Hauptsächliche Einsatzstoffe (im Mittel > 5 % an der Gesamtmasse)	Kleegrassilage Rindermist Geflügelmist Maissilage	Kleegrassilage Rindergülle	Rindergülle Grassilage Maissilage	Grassilage Rindergülle	Grassilage Rindergülle Maissilage Rindermist
Massenanteil von Grasbiomasse an den pflanzlichen Einsatzstoffen, %	86,6	93,0	63,1	94,8	60,8
Massenanteil von Grasbiomasse am Gesamt-Input, %	55,8	62,8	26,0	53,4	37,3
Wärmenutzung	Getreide- und Holztrocknung, Wohnhaus, Gaststätte, Gärrestaufbereitung (Unkrautsamen)	Scheitholz- und Hack-schnitzeltrocknung, Gärrestaufbereitung (Unkrautsamen), Heutrocknung	2 Wohngebäude, Stallungen und Werkstätte	52 Wohngebäude, Schule (Kombination mit genossenschaftlicher Hackschnitzelheizung)	25 Wohngebäude (aufgeteilt auf stationärem und Satelliten-BHKW)

F: Fermenter (Hauptgärbehälter); GO: Gas-Otto-Motor; N: Nachgärer (Nachgärbehälter); ZS: Zündstrahlmotor; *) Zusatzaggregat zur flexiblen Stromerzeugung ab Januar 2014

Alle Betriebe erfüllten das Auswahlkriterium von mindestens 60 % Massenanteil Grasbiomasse an den eingesetzten Energiepflanzen. Die Angaben zum Grasanteil in Tab. 2 beziehen sich auf die pflanzlichen Einsatzstoffe. Allen Betrieben gemeinsam war der Einsatz

von tierischen Wirtschaftsdüngern: in vier Anlagen wurde Rindergülle, in einer Anlage Hühnermist und Rindermist verwertet.

Die Grasbiomasse wurde in vier von fünf Betrieben bei der Ernte gehäckselt und dann einsiliert. Nur ein Betrieb setzte Material ein, das direkt nach der Ernte mit einem Kurzschnittladewagen einsiliert wurde. Das Temperaturniveau in den Gärbehältern der ausgewählten Biogasanlagen lag mit 42 bis 52 °C im oberen mesophilen bzw. unteren thermophilen Bereich. Nach Aussagen der Betreiber wurden diese Prozesstemperaturen gewählt, um das hochviskose Gärgemisch besser homogenisieren zu können und den Strombedarf für das Rühren zu verringern.

3.3.1 Beschreibung von Pilotbetrieb #17

Die von der Firma Agrikomp geplante und errichtete BGA befindet sich im Nordosten des Landkreises Freising (Ansicht der Anlage siehe Abb. 2). Die Anlage wird seit Oktober 2010 auf einem biologisch bewirtschafteten Hof betrieben, der nicht in einer klassischen Grünlandregion liegt. Neben der Strom- und Wärmeproduktion dient die Biogasanlage der Bereitstellung von Wirtschaftsdünger für die Versorgung derjenigen Ackerflächen, die im Lauf der Fruchtfolge nicht für die Biogasproduktion verwendet werden. Dies gilt sowohl für die Flächen des Betreibers als auch für die der Substratlieferanten.

Der Energiepflanzeneinsatz umfasst hauptsächlich die Verwertung von Klee gras, das aufgrund der Fähigkeit, Stickstoff aus der Umgebung aufzunehmen, die Düngewirkung des Gärückstands verbessert. Dies stellt im biologischen Landbau einen wichtigen Faktor für die Pflanzenernährung dar. Zusätzlich werden in der Anlage Geflügelmist aus der hofeigenen Eierproduktion und angelieferter Rindermist verwertet.

Die Anlage besteht aus einem Fermenter, einem Nachgärer (je 1.200 m³) und einem Gärrestlager (3.000 m³). Alle drei Behälter sind mit Folienhauben abgedeckt, die als Gasspeicher dienen. Ein weiterer Behälter, der vormals als Güllegrube diente, wird jetzt als zusätzliches Gärrestlager genutzt. Dieser Behälter hat keine Abdeckung und wird nur im Bedarfsfall befüllt, etwa wenn die Wetterlage im Frühjahr ein Befahren der Felder nicht zulässt.



Abb. 2: Pilotbetrieb 17: Fermenter und Gärrestlager (rechts vorne); Fahrsilo (linke Bildmitte)

Da in der Biogasanlage keine flüssigen Wirtschaftsdünger eingesetzt werden, gibt es für den Eintrag der Substrate nur einen Feststoffdosierer. Dieser stellt eine Kombination aus

dem „Vielfraß“-Aggregat der Fa. Agrikomp und einem Abschiebewagen dar. Durch diese Lösung ist das Fassungsvermögen mit 40 m³ gegenüber dem normalen „Vielfraß“ deutlich erhöht, wodurch der zeitliche Aufwand für die Beschickung reduziert wird.

Die schräg angeordnete Eintragschnecke ist in einem Rohr mit einem Durchmesser von 70 cm gelagert und somit sehr großzügig dimensioniert. Ebenfalls großzügig bemessen ist die im Hauptgärbehälter („Fermenter“) installierte Rührwerksleistung von 0,025 kW pro m³ Gärraum. In Kombination mit den verwendeten Rühraggregaten (horizontale Paddelrührwerke) ermöglichte diese hohe Leistung trotz eines sehr hohen Trockensubstanzgehalts des Fermenterinhalts (im Mittel 17,1 %) eine effektive Durchmischung. Der identisch dimensionierte Nachgärbehälter ist mit nur einem dieser Rührwerke ausgestattet. Dass auch in diesem Behälter keine Probleme mit Schwimmschichten auftraten, überraschte, da der TS-Gehalt im Gärgemisch mit durchschnittlich 16 % dort immer noch sehr hoch war.

Beide Gärbehälter werden mit an der Fermenterinnenwand angebrachten Kunststoffheizrohren temperiert (mehrere Heizkreisläufe). Das Gärrestlager mit Gaserfassung ist mit zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattet. Trotz der Größe dieses Behälters war die installierte Rührtechnik ausreichend, da das eingetragene Material vorher einer Fest-Flüssigtrennung unterzogen wurde, so dass der TS-Gehalt im Behälter unter 10 % lag. Das vormals als Güllegrube genutzte offene Gärrückstandslager kann nur mit Hilfe eines Zapfwellenrührwerks durchmischt werden. Das Homogenisieren dieses Lagerbehälters war mit der eingerichteten Technik stets problemlos möglich.

Von Stufe 1 in Stufe 2 wird das Gärgemisch mit einer Exzentrerschneckenpumpe gefördert und kann optional durch einen Kocher geleitet werden, der das Material zur Inaktivierung von Unkrautsamen für eine Stunde auf 70 °C erhitzt. Eine weitere Pumpe gleicher Bauart fördert aus dem Nachgärer in das geschlossene Gärrestlager. Hier kann zwischen einer direkten Einleitung oder einer vorherigen Separierung gewählt werden. Das geschlossene Gärrestlager ist mit einer Gülleleitung mit dem offenen Lager verbunden, welches ausschließlich durch das Betätigen eines Schiebers aus Lager 1 befüllt wird. In diesen Behälter wird außerdem das anfallende Sickerwasser aus den Silostöcken geleitet. Die Güllefässer zur Ausbringung von Gärrest werden ausschließlich aus dem offenen Lager beschickt. Dafür steht eine Kreiselpumpe zur Verfügung, mit der auch eine Rezirkulation zurück in den Fermenter durchgeführt werden kann. Zur Verdeutlichung sind die Pumpenwege in Abb. 3 dargestellt.

Zur Verstromung des aufkommenden Biogases dient ein Zündstrahlaggregat mit einer installierten elektrischen Leistung von 250 kW. Dieses ist mit einer Abgasturbine mit einer Nennleistung von 30 kW gekoppelt. Durch den Strömungswiderstand im Abgastrakt wird die Leistung der Zündstrahlmaschine um ca. 6 % reduziert, so dass insgesamt eine elektrische Nennleistung des Aggregats von 265 kW resultiert. Seit Anfang 2014 wird zur flexiblen Stromproduktion ein weiteres BHKW (Gas-Otto-Motor) mit einer Nennleistung von 530 kW für bis zu sieben Stunden am Tag betrieben. Insgesamt wird so eine elektrische Bemessungsleistung von 420 kW angestrebt.

Die Abwärme der BHKW dient zur Beheizung der Wohngebäude und zur Versorgung einer Trocknungsanlage für Getreide oder Scheitholz (zwei Container). Weitere Besonderheiten der Anlage sind der aktive Kühler zur Entfeuchtung des Biogases und eine anschließende Nachreinigung in einem Aktivkohlefilter. Des Weiteren ist eine Fuhrwerkswaage eingerichtet, mit der alle angelieferten Substrate gewogen werden können.

Das Funktionsprinzip, die einzelnen technischen Einrichtungen und die Stoffströme von Pilotanlage 17 sind schematisch in Abb. 3 dargestellt.

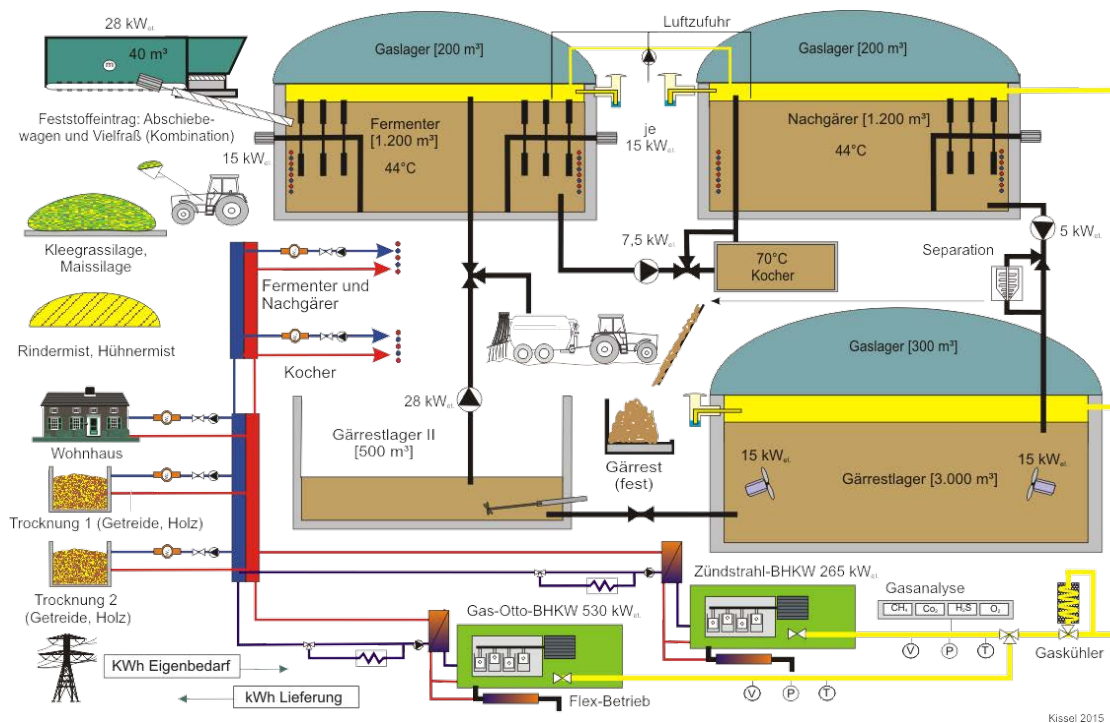


Abb. 3: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 17

3.3.2 Beschreibung von Pilotbetrieb #18

Die ebenfalls von der Firma Agrikomp geplante und errichtete BGA wurde im Oktober 2010 in Betrieb genommen und befindet sich im Landkreis Landsberg a. Lech. Sie besteht aus einem Fermenter (1.200 m³) und einem gasdichten und unbeheizten Gärrestlager (2.700 m³). Beide Behälter sind mit Folienhauben abgedeckt, die zur Speicherung des Biogases dienen. Das zur Stromproduktion eingesetzte Zündstrahlaggregat besitzt eine elektrische Nennleistung von 250 kW (Ansicht der Anlage siehe Abb. 4).



Abb. 4: Ansicht der Pilotanlage 18 mit Eintragstechnik, Fermenter und Gärrestlager

Die im Außenbereich errichtete Anlage wird gemeinsam von zwei Biolandwirten betrieben, von denen einer seine Stallungen für die Milchviehhaltung unmittelbar an der Anlage errichtet hat. Der Viehbesatz umfasst ca. 100 GV inklusive Nachzucht. Die Tiere liefern den eingesetzten Wirtschaftsdünger in Form von Rindergülle und geringer Mengen Festmist. Als Energiepflanzen werden Kleegrassilage und in geringen Mengen Mais und Getreide eingesetzt. Das Klee gras soll wie bei Betrieb 17 den Gärrückstand mit Stickstoff anreichern. Für Biolandwirte, für die sich eine ausreichende Stickstoffversorgung der Felder zur rechten Zeit stets problematisch darstellt, ist die Verfügbarkeit eines schnell wirkenden organischen Stickstoffdüngers von hohem Nutzen.

Pilotbetrieb 18 wurde aus drei Gründen ausgewählt. Zum ersten stellen die in dieser Anbauform eingesetzten Substrate hohe Anforderungen an das Anlagenmanagement. Zum zweiten dürfte die Biogasproduktion im biologischen Landbau aufgrund der Düngerproblematik künftig noch stärker nachgefragt werden. Der dritte Punkt betrifft den Vergleich zwischen Pilotanlage 17 und 18. Dieser ist insofern von Relevanz, als sich beide Objekte zu Beginn des Monitorings auf gleichem Leistungsniveau befanden, jedoch bezüglich TS-Gehalt der Einsatzstoffe sowie spezifischer installierter elektrischer Leistung stark voneinander unterschieden. Anfang 2014 wurde die auf den Gärraum bezogene Leistung von Anlage 17 angehoben und damit dem Niveau von Betrieb 18 angeglichen, da eine zweite Maschine zur flexiblen Stromeinspeisung installiert wurde.

In Abb. 5 ist die gesamte Biogasanlage schematisch dargestellt. Die flüssigen Einsatzstoffe (Wirtschaftsdünger vom Betrieb) werden dem Fermenter aus einer Sammelgrube mit einer Tauchschneidpumpe zugeführt. Die Feststoffe werden mit einem Feststoffdosierer („Vielfraß“, Fa. Agrikomp) eingebracht. Das Volumen des Annahmehubers dieser Einheit beträgt 13 m³ und die tägliche Energiepflanzen-Ration wird auf 21 Gaben verteilt. Die schräg angeordnete Eintragschnecke ist in einem Rohr mit einem Durchmesser von 70 cm gelagert und entsprechend der eingesetzten Substrate großzügig ausgelegt.

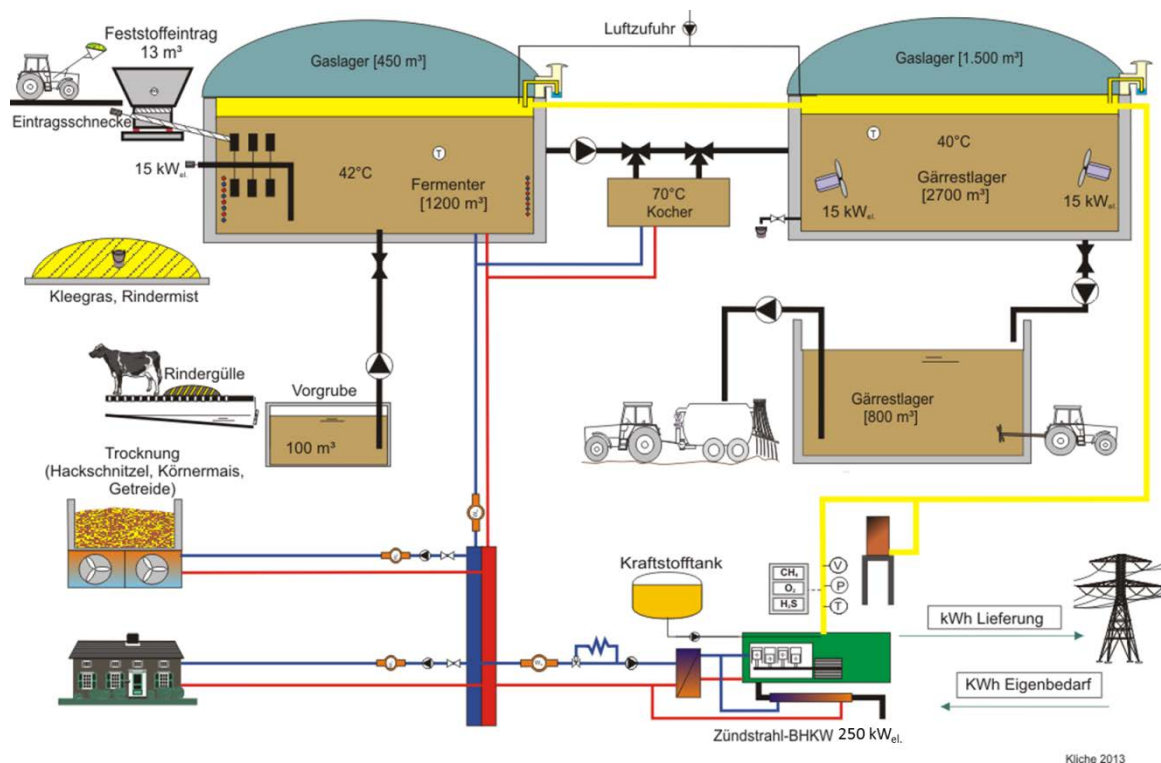


Abb. 5: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 18

Die im Fermenter installierte Rührwerksleistung beträgt nur 0,013 kW pro m³ Gärraum, reichte jedoch aus, den Fermenterinhalt mit einem mittleren TS-Gehalt von 10,9 % effektiv zu durchmischen. Durch das eingesetzte horizontale Paddelrührwerk konnte über den gesamten Untersuchungszeitraum eine Schwimmdeckenbildung im Fermenter verhindert werden. Die Heizung besteht aus mehreren an der Fermenterwand fixierten Heizkreisläufen aus Kunststoff. Das Gärückstandslager ist mit zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattet. Für diesen Behälter beträgt die installierte Rührwerksleistung knapp 0,01 kW pro m³ Gärraum. Der Inhalt wies im Mittel einen TS-Gehalt von 8,8 % auf. Hier waren ebenfalls keine Durchmischungsprobleme zu verzeichnen. Als zweites Gärückstandslager wird ein alter Behälter aus dem Bestand genutzt, in dem vormals die im Stall anfallende Gülle aufgefangen wurde. Dieses 800 m³ fassende Lager ist offen und von dort werden die Vakuumfässer zur Gärrestausrückführung beschickt. Die Durchmischung vor dem Befüllen der Güllefässer erfolgt mit einem Zapfwellenrührwerk. Vom Fermenter wird der Gärrest mit einer Exzentrerschneckenpumpe in das Gärrestlager befördert. Eine Rezirkulation kann durch einen Rückwärtsbetrieb der Pumpe erfolgen, wurde aber nur in Ausnahmefällen durchgeführt. Für die Überleitung vom abgedeckten zum offenen Gärrestlager ist eine weitere Pumpe gleicher Bauart im Einsatz. Beim Überleiten vom Fermenter in das Gärrestlager wird das Gärgemisch normalerweise einer einstündigen Temperaturbehandlung bei 70 °C unterzogen, um Unkrautsamen zu inaktivieren. Das Material kann jedoch auch am Kocher vorbei geleitet werden.

Die Abwärme des BHKW dient zur Beheizung einer Wohneinheit und zur Versorgung eines Spalntrockners, der zur Trocknung von Getreide, Hackschnitzeln und in Ausnahmefällen von Scheitholz verwendet werden kann. Dieser wurde während des Beobachtungszeitraums um eine Einheit zur Trocknung von Rundballen (Heu) erweitert. Eine weitere Besonderheit der Anlage ist die aktive Kühlung zur Entfeuchtung des aufkommenden Biogases mit nachgeschaltetem Aktivkohlefilter. Die Anlage verfügt über eine Notfackel und im Sommer 2013 wurde eine Achslastwaage installiert.

3.3.3 Beschreibung von Pilotbetrieb #19

Die von der Firma Hochreiter geplante und errichtete BGA befindet sich im nördlichen Landkreis Oberallgäu. Die Anlage ist seit mehr als zwölf Jahren in Betrieb und wurde mehrmals modifiziert (Ansicht der Anlage siehe Abb. 6). Sie besteht aktuell aus einem Fermenter (1.200 m³), einem Nachgärbehälter (600 m³) und einem Gärrestlager (1.200 m³). Dass der Nachgärbehälter nur das halbe Fassungsvermögen des Fermenters aufweist, ist ungewöhnlich und dem Umstand geschuldet, dass es sich um eine gewachsene Anlage handelt, bei der bereits bestehende bauliche Einrichtungen in die Anlage integriert wurden. Der Fermenter ist mit einem Tragluftdach ausgestattet, unter dem das produzierte Gas gespeichert werden kann. Alle übrigen Behälter besitzen eine Betondecke und sind an die Gaserfassung angeschlossen.



Abb. 6: Biogasanlage auf Pilotbetrieb 19: Fermenter (links), Biogasleitung (Mitte) und Nachgärbehälter (rechts)

Die direkt in den Milchviehbetrieb (100 GV) des Betreibers integrierte Einzelhofanlage liegt in einer klassischen Grünlandregion und wird entsprechend der Betriebsstruktur vorwiegend mit Rindergülle und Grassilage betrieben. Nur in den Wintermonaten wird zusätzlich zugekaufte Maissilage eingesetzt, da die verfügbaren Grünlandflächen für eine ganzjährige Versorgung mit Grünlandaufwuchs nicht ausreichen. Anlage 19 ist der einzige teilnehmende Betrieb, der nicht über ein schlagkräftiges Wärmekonzept verfügt. Hier kann die Wärme bislang lediglich an zwei Wohnhäuser, die Stallung und die Werkstatt abgesetzt werden.

Pilotbetrieb 19 wurde vor allem deshalb ausgewählt, weil er in einer klassischen Grünlandregion gelegen ist. Ebenfalls von Interesse war die geplante Anschaffung einer mechanischen Aufbereitungsanlage zur Vorbehandlung der eingesetzten Energiepflanzen. Die Anschaffung einer solchen Einrichtung sollte das Häckseln bei der Ernte ersetzen, was enorme Vorteile bezüglich Logistik, Ökonomie sowie Arbeits- und Zeitaufwand zur Folge hätte. Im Frühjahr 2014 wurde eine solche Maschine probeweise eingesetzt. Die Resultate werden im folgenden Kapitel beschrieben.

Der flüssige Wirtschaftsdünger aus der Milchviehhaltung fließt über einen absperrbaren Gülleschacht, in dem auch angelieferte Gülle zwischengelagert wird, direkt in die Vorgrube. In diese Grube werden außerdem alle festen Materialien mit Hilfe der Frontladereinrichtung des Schleppers eingebracht. Um Gerüche zu vermeiden, ist die Grube mit einem verschließbaren Stahldeckel ausgestattet. Die Fütterung erfolgt zweimal täglich.

Alle Gärbehälter sowie die Gärrestlager sind mit dieser Grube verbunden und können von dort mit einer Flügelpumpe beschickt werden. Ebenso ist es möglich, mit der gleichen Pumpe Gärsubstrat aus allen Behältern in die Vorgrube zu fördern. Zusätzlich sind auch Fermenter und Nachgärer mit einer Gülleleitung verbunden und die Füllstände der beiden

Behälter lassen sich durch eine Pendelleitung mit Schieber ausgleichen. Für den gesamten Anlagenbetrieb ist somit nur eine einzige Pumpe erforderlich.

Aufgrund der ungünstigen Lage der Vorgrube waren für deren Beschickung weite Wege zurückzulegen, weshalb im Winter 2013/14 eine Direkteinbringung für Feststoffe unmittelbar am Fermenter installiert wurde. Die Konstruktion wurde betriebsintern geplant, gebaut und so ausgeführt, dass eine Zerkleinerungseinheit integriert werden konnte, die der Hersteller für den Probetrieb kostenlos zur Verfügung stellte. Der erhebliche zeitliche, materielle und finanzielle Aufwand, der zur Inbetriebnahme des Zerkleinerers betrieben werden musste, wurde dadurch gerechtfertigt, dass die Vorrichtung den Häckselvorgang am Feld ersetzen sollte. Der Probetrieb startete im Frühjahr 2014 und wurde nach zwei Wochen wieder eingestellt, da der von der Herstellerfirma angegebene stündliche Durchsatz von 5 t Frischmasse nicht annähernd erreicht werden konnte. Bei einer Anschlussleistung von 35 kW erreichte die Maschine lediglich 0,8 t pro Stunde. Der Routinebetrieb hätte so zu einem Stromverbrauch von täglich rund 220 kWh geführt. Die hierdurch entstehenden Zusatzkosten können den finanziellen Aufwand für die Häckselkette nicht kompensieren. Die Firma plant jedoch einen weiteren Probetrieb mit einer modifizierten, leistungsstärkeren Zerkleinerungseinheit im Frühjahr 2015. In der Zwischenzeit erfolgt die Fütterung weiterhin durch die Vorgrube (siehe Abb. 7). So werden zwar keine verschleißanfälligen Transportschnecken betrieben, jedoch muss das frisch eingetragene Material mit einem Tauchmotorrührwerk untergemischt werden.

Im Fermenter sind ein langsam und ein schnell laufendes Stabrührwerk installiert. Die spezifische Rührwerksleistung ist mit mehr als $0,02 \text{ kWm}^{-3}$ Gärraum großzügig bemessen. Innerhalb des Beobachtungszeitraums wurden keine Probleme mit der Durchmischung des Fermenterinhalt bei einem mittleren TS-Gehalt von 7 % festgestellt. Im Nachgärer wurde der ursprünglich installierte Stabmixer umgebaut, indem der Antriebsmotor entfernt und durch eine Vorrichtung für den Anschluss einer Zapfwelle ersetzt wurde. Gleichzeitig wurde ein zweites Rührgerät installiert. Für die Durchmischung des relativ kleinen Behälters, dessen Inhalt einen mittleren TS-Gehalt von 5,0 % aufwies, erwies sich die vorhandene Rührtechnik als ausreichend.

In beiden Gärbehältern sind Heizkreise aus Edelstahlrohren an der Fermenterinnenwand angebracht. Das erste Gärrestlager mit Gaserfassung verfügt über nur einen Stabmixer. Auch hier wurden keinerlei Probleme mit der Durchmischung festgestellt. Zur Ausbringung des Gärrests werden die Güllefässer mit der auch zur Fermenterbeschickung verwendeten Pumpe beschickt.

Die Abwärme der BHKW (elektrische Nennleistung: 110/37 kW) dient zur Beheizung zweier Wohngebäude, eines Stalls und einer Werkstatt. Die Reinigung des Biogases erfolgt durch Lufteinblasung und Trocknung über eine Gaskühlstrecke. Noch im ersten Betreuungsjahr wurde eine Achslastwaage installiert, mit der alle angelieferten Substrate verwogen werden. Die spezifische elektrische Leistung dieser Anlage beträgt lediglich $0,08 \text{ kW m}^{-3}$ Gärraum.

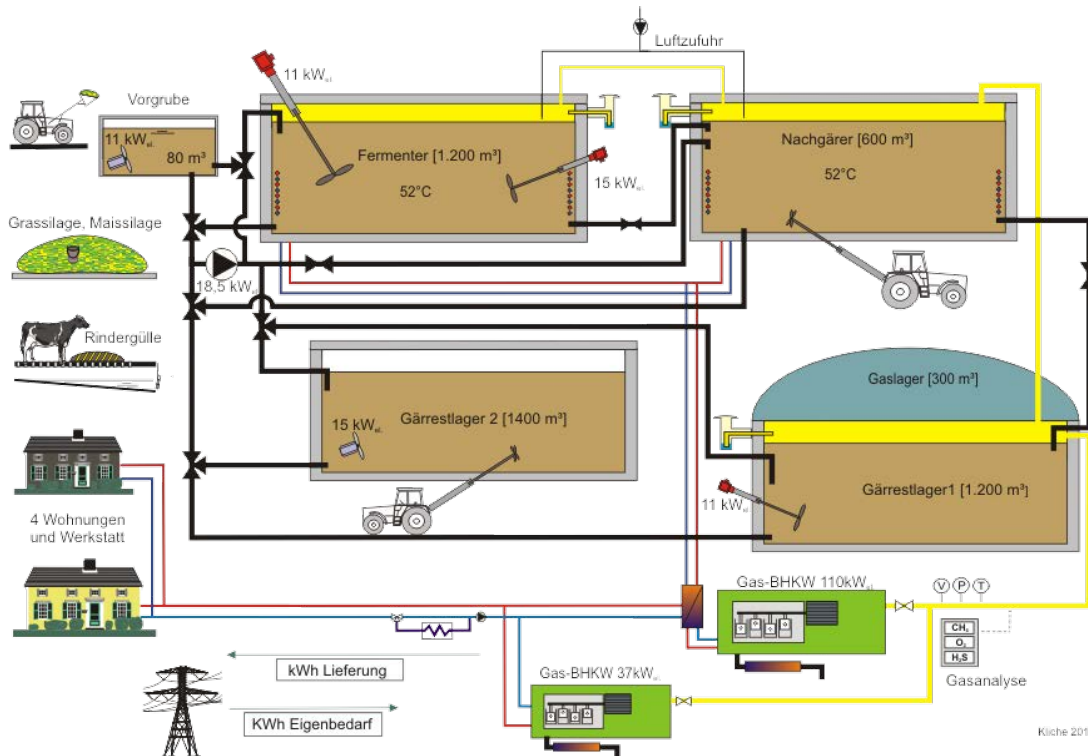


Abb. 7: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 19

3.3.4 Beschreibung von Pilotbetrieb #20

Die von der Firma Agrikomp geplante BGA befindet sich im südlichen Landkreis Oberallgäu und wurde zu großen Teilen durch Eigenleistung errichtet (Ansicht der Anlage siehe Abb. 8). Sie ist seit 2006 in Betrieb und besteht aus einem Fermenter, einem Nachgärbehälter (je 770 m³) und einem Gärrestlager (600 m³). Da das Gärrestlager zu klein ist, müssen vor der kalten Jahreszeit Teilmengen des Nachgärbehälters ausgebracht werden, um genügend Lagervolumen zur Verfügung zu haben. Alle drei Behälter sind mit Betondecken versehen, die befahren werden können. Das Gärrestlager ist nicht an das Gassystem angeschlossen.



Abb. 8: Pilotanlage 20: Fermenter (Vordergrund), Gasleitung und Nachgärbehälter (linke Bildmitte)

Die Tierhaltung wurde an diesem Betrieb aufgegeben, weshalb die eingesetzte Rindergülle ausschließlich aus Betrieben der Nachbarschaft stammt. Die eingesetzte Grassilage wird aufgrund der steilen Hanglagen der umliegenden Grünlandflächen nicht mit dem Häcksler, sondern mit dem Kurzschnittladewagen geerntet und ohne weitere Zerkleinerung einsiliert. In Jahren mit mäßiger Ernte muss für die Wintermonate Substrat (Maissilage) zugekauft werden, da die eingelagerte Grassilage nicht für eine ganzjährige Versorgung der Biogasanlage ausreicht. Pilotbetrieb 20 wurde vor allem deshalb ausgewählt, weil er in einer klassischen Grünlandregion gelegen ist und es bisher wenig Erfahrung bezüglich der Verwendung von Ladewagengras in Biogasanlagen gibt.

Für die Wärmenutzung hat der Betreiber ein genossenschaftlich organisiertes Nahwärmenetz mit Hackschnitzelheizung errichtet. Die gesamte verfügbare BHKW-Wärme wird in dieses Nahwärmenetz eingespeist.

Die Biogasanlage PB 20 ist in Abb. 9 schematisch dargestellt und hinsichtlich der elektrischen Nennleistung von 100 kW vergleichbar mit Betrieb 19. Mit einer spezifischen elektrischen BHKW-Leistung von lediglich $0,06 \text{ kW m}^{-3}$ ist der Gärraum großzügig dimensioniert.

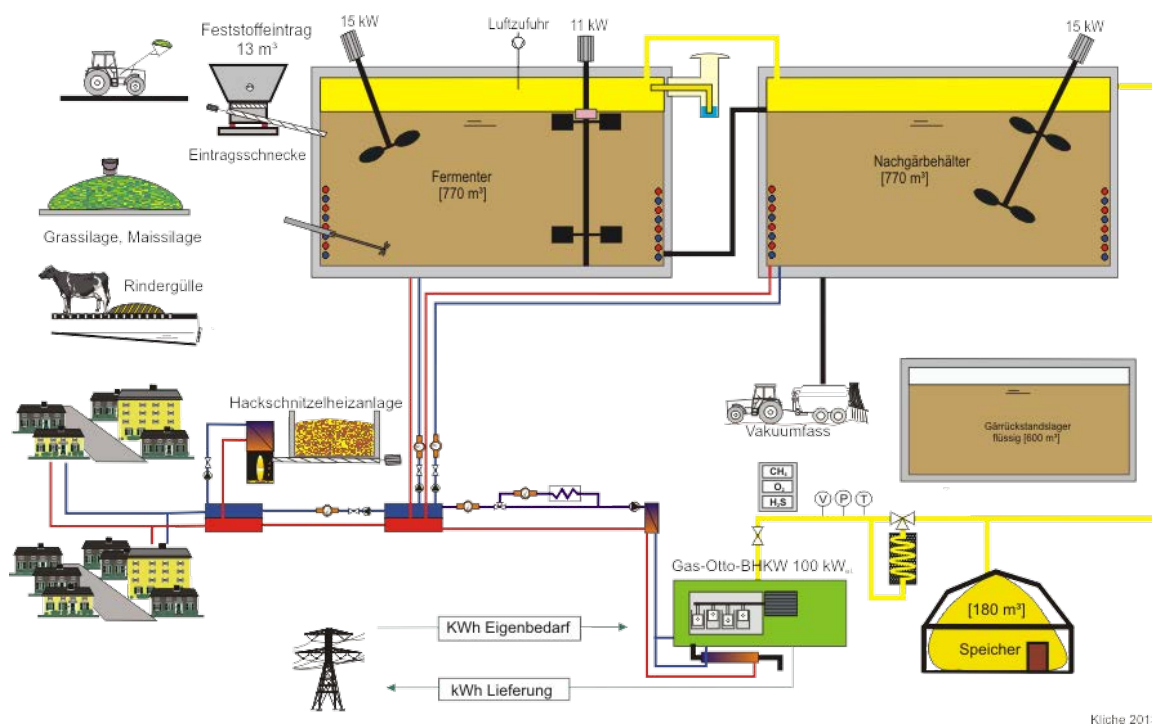


Abb. 9: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 20

Da es keine Vorgrube gibt, muss die Gülle bei Anlieferung direkt vom Fass in die erste Stufe eingeleitet werden. Von dort gelangt das Material durch freien Überlauf in den direkt daneben angeordneten Nachgärbehälter. Diesem Behälter wird das Gärgemisch mit Hilfe von Vakuumfässern entnommen und bei Bedarf in eine ca. 50 m entfernte Grube umgelagert, die vormals als Güllelager für die Milchviehhaltung diente.

Ungewöhnlich ist der Verzicht auf den Einsatz einer Pumpe zur Substratförderung. Dies wurde jedoch bewusst so gewählt, da das eingesetzte Ladewagengras der langen Fasern wegen einen hohen Verschleiß der eingesetzten Pumpen nach sich zieht. Andererseits erfordert der Verzicht auf eine Pumpe einen hohen Arbeitsaufwand, da der Substrattransport

den Einsatz von Traktor und Güllefass erfordert, falls rezirkuliert oder ein Behälter gereinigt werden muss.

Die Feststoffe gelangen über einen Feststoffdosierer in Form eines Futtermischwagens mit schräg angeordneter Einpressschnecke in den Fermenter. Die Einrichtung verfügt über einen Annahmehopper mit einem Fassungsvermögen von 13 m³. Der Hauptgärbehälter ist mit zwei Rührwerken ausgestattet. Zu Beginn der Untersuchung waren ein Langwellenrührwerk mit zwei Propellern und ein Stabmixer installiert. Aufgrund massiver Probleme mit aufschwimmender Grassilage wurde ersteres gegen ein vertikales Paddelrührwerk ausgetauscht. Die spezifische Rührwerksleistung beträgt nach wie vor 0,03 kW m⁻³ Gärraum. Die vergleichsweise hohe Rührleistung ist jedoch keine Garantie für eine effiziente Durchmischung. Tatsächlich dürfte der mittlere TS-Gehalt im Fermenter höher gelegen haben als der ermittelte Wert von 10,1 %, da nur bei der Hälfte der 28 durchgeführten Probenahmen die z. T. massive Schwimmdecke untergerührt werden konnte. Durch den Einbau des neuen Rührwerks konnte dieses Problem gelöst werden.

Der Nachgärer wird mit einem zweiflügeligen Langwellenrührwerk durchmischt und wies einen mittleren TS-Gehalt von 9,5 % auf. Das Gärrestlager kann nur mit einem Zapfwellenrührwerk durchmischt werden.

Die Reinigung des Biogases erfolgt durch Luftereinblasung und Trocknung über eine Gaswäscherstrecke. Im zweiten Betreuungsjahr wurde von der LfL eine mobile Achslastwaage installiert, mit der alle angelieferten Substrate verwogen werden konnten.

Die Philosophie dieses Betriebes, den technischen Aufwand zur Biogasproduktion so gering wie möglich zu halten, führte zu großen Problemen in der ersten Vergärungsstufe. Die Substratbeschaffenheit in Verbindung mit der unzureichenden Rührtechnik führte zur Bildung eines mehr als 320 m³ großen Sedimentkörpers, entsprechend einer Verringerung des effektiven Gärraums um mehr als 40 %. Hierdurch kam es zu einer starken Einschränkung des Wärmeübergangs, da die Heizleitungen verdeckt waren. Im Sommer 2013 musste daher der Hauptgärbehälter ausgeräumt werden.

3.3.5 Beschreibung von Pilotbetrieb #21

Die von einem Ingenieurbüro geplante BGA befindet sich im nördlichen Landkreis Freyung-Grafenau (Ansicht der Anlage siehe Abb. 10). Sie ist mit einer installierten elektrischen Leistung von 625 kW die leistungsstärkste unter den fünf untersuchten Anlagen. Verwalter der Anlage ist das Energiedienstleistungs-Unternehmen „Green City e.V.“ Die Anlage verfügt über zwei Fermenter (je 1.200 m³), die beide mit Substrat beschickt werden können, einen Nachgärer (2.400 m³) und ein Gärrestlager (3.600 m³). Alle Behälter sind mit Doppelfoliendächern versehen, unter denen das produzierte Biogas gespeichert werden kann. Zur Aufnahme von angelieferter Gülle ist außerdem noch eine Vorgrube (150 m³) vorhanden. Zusätzlich zu dem Gas-Otto-BHKW vor Ort zur Verstromung des Biogases wurde ein Satelliten-BHKW mit Zündstrahlmotor installiert, das über eine ca. 1,5 km lange Gasleitung versorgt wird.



Abb. 10: Fermenter (rechts) und Nachgärbehälter (Bildmitte) auf Pilotbetrieb 21

Da es sich um eine Anlage eines Energiedienstleistungs-Unternehmens handelt, welches weder eine Tierhaltung betreibt noch über eigene Flächen verfügt, müssen alle eingesetzten Materialien angeliefert werden. Im Fall der Energiepflanzen werden die Lieferanten bezahlt. Die angelieferte Gülle wird in Form von Gärrest vergütet. Ursprünglich sollten neben Wirtschaftsdüngern ausschließlich Grassilage und nur in Ausnahmefällen andere Energiepflanzen eingesetzt werden. Dieser Plan musste nach der Installation des Satelliten-BHKW aufgegeben werden, da die Flächen der Lieferanten für einen ganzjährigen Vollastbetrieb der Maschinen nicht ausreichten. Der Mangel an Grassilage wird seither durch den Zukauf von Maissilage kompensiert.

Die Nutzungsmöglichkeiten für die Abwärme aus dem an der BGA lokalisierten BHKW sind aufgrund des ausgelagerten Standorts stark eingeschränkt. Über eine Fernwärmeleitung können lediglich acht Wohnhäuser versorgt werden. Mit der zweiten ausgelagerten Maschine können 20 Wohnhäuser mit Wärme beliefert werden. Die Reinigung des Biogases erfolgt durch Lufteinblasung, die Trocknung über eine Gaskühlstrecke. Das Gas für die Zündstrahl-Maschine passiert zusätzlich einen Aktivkohlefilter.

Pilotanlage 21 wurde vor allem aus zwei Gründen in das Monitoring aufgenommen: die Lage in einer klassischen Grünlandregion und die relativ hohe installierte elektrische Leistung von 625 kW. Aus ökonomischer Sicht sind hier die Risiken durch Beeinträchtigungen der Gärbiologie weitreichender als bei kleineren Betrieben. Für die Beschaffung der Substrate müssen weite Wegstrecken in Kauf genommen werden, was für die Fragestellungen zur Erntelogistik von besonderem Interesse erschien. Ein Pluspunkt dieser Biogasanlage ist die vorhandene umfangreiche messtechnische Ausstattung.

Abb. 11 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage. Als Basissubstrat dienen Rindergülle und Rindermist. Die flüssigen Wirtschaftsdünger werden in Fasswagen angeliefert und in einer Vorgrube (150 m³) zwischengelagert. Nachdem diese mittels einer Umwälzpumpe homogenisiert wurden, werden sie mit einer Drehkolbenpumpe mit Zerkleinerungseinrichtung (Rotacut®, Fa. Vogelsang) in die erste Stufe eingebracht, die aus zwei parallel betriebenen Gärbehältern besteht. Für die korrekte Abrechnung mit der Vielzahl von Lieferanten werden alle angelieferten Substrate auf einer Fuhrwerkswaage verwogen.

Für den Eintrag der festen Inputmaterialien steht für jeden Hauptgärbehälter ein auf Wägezellen installierter Feststoffdosierer zur Verfügung. Die Annahmehäuser dieser Einrichtungen sind so angeordnet, dass sie mit einem Teleskoplader beschickt werden können,

wodurch kein vertikaler Transport durch Schneckentechnik erforderlich ist. Das Fassungsvermögen der Bunker beträgt je 20 m³. Das Volumen reicht nicht aus, um eine ganze Tagesration zu fassen. Deshalb müssen die Bunker zweimal täglich beschickt werden. Die Fermenter werden von dort aus 32mal pro Tag gefüttert (alle 45 Minuten). In beiden Gärbehältern, in welchen mittlere Trockensubstanzgehalte von 10 bzw. 9,7 % bestimmt wurden, sind je zwei Rührwerke (Langachsührwerk und Stabmixer) gleicher Bauart installiert. Die gleichen Aggregate, jedoch mit geringerer Leistung, durchmischen den Nachgärbehälter und das Gärrestlager.

Alle Gärbehälter werden durch einen externen Wärmetauscher beheizt. Dafür ist es erforderlich, dass Material aus allen Gärbehältern durch die eingesetzte Exzentrerschneckenpumpe abgesaugt werden kann. Die Gülleleitungen sind außerdem so angeordnet, dass auch alle Behälter von der Pumpenstation aus beschickt werden können. Dies hat den Vorteil, dass biologische Störungen durch die Zugabe von Material aus einem „gesunden“ Fermenter korrigiert werden können. Außerdem können frisch angelieferte flüssige Wirtschaftsdünger in beliebige Behälter eingebracht werden. Von Fermenter 1 zu Fermenter 2, von diesem zum Nachgärbehälter und von dort zum Gärrestlager sind zusätzlich Überlaufrohre installiert. Für alle aktiven Fördervorgänge von Gärsubstrat innerhalb der Anlage wird die gleiche Pumpe verwendet. Nur am Gärrestlager ist eine zusätzliche Pumpe für die Befüllung der Fasswagen vorhanden.

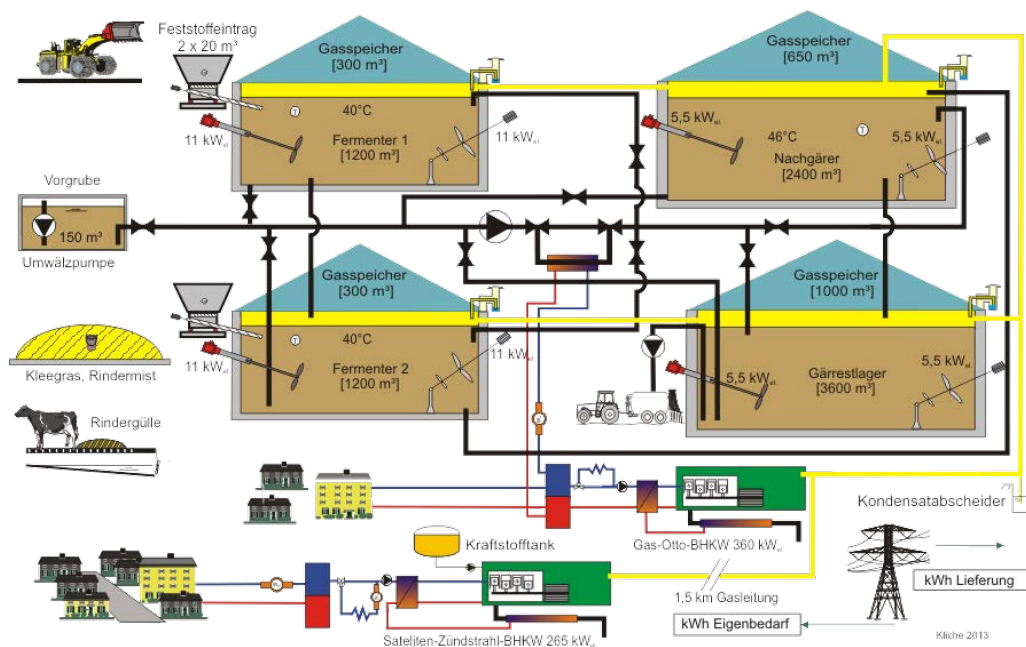


Abb. 11: Schematische Darstellung der Biogasanlage von Pilotbetrieb 21

3.4 Messtechnische Ausstattung der Pilot-Biogasanlagen

3.4.1 Nachrüstung von Messgeräten

Wie in vorausgegangenen Untersuchungen festgestellt wurde, reicht die an den landwirtschaftlichen Biogasanlagen installierte Messtechnik für die Durchführung eines Monitorings in der Regel nicht aus (Effenberger et al. 2010, Ebertseder et al. 2012). Die messtechnische Ausstattung ist zwar ein Kriterium für die Anlagenauswahl, jedoch haben im Zweifelsfall die spezifischen Projektziele Vorrang vor einer Ersparnis der Kosten für die Nachrüstung von Messtechnik. Für die vorliegende Untersuchung der Biogaserzeugung vom Grünland wurden an den Pilotanlagen die in Tab. 3 aufgelisteten Messgeräte nachgerüstet.

Tab. 3: Art und Anzahl der nachgerüsteten Messgeräte an den Pilot-Biogasanlagen

ID Anlage	17	18	19	20	21
Messgerät					
Gasdurchflussmesser	1	-	2	1	1
Wärmemengenzähler	1	1	1	1	1
Stromzähler	14	10	11	8	10
Gasanalysator	1	1	1	1	-
Wiegeeinrichtung	-	-	1	-	-

Die Installationsarbeiten für die Messgeräte zur Erfassung des Stromverbrauchs und der Gaszusammensetzung wurden durch Mitarbeiter der LfL durchgeführt. Wärmemengenzähler wurden ausschließlich zur Messung der zur Fermenterbeheizung erforderlichen Wärmemengen eingebaut. Hiermit wurden, ebenso wie mit dem Einbau der Gasmengensmesser, die lokalen mit der jeweiligen Biogasanlage vertrauten Installateure beauftragt. Die Aufträge erteilten die Anlagenbetreiber. Einzige Ausnahme war Betrieb 19, bei dem die zunächst durch den Anlagenbetreiber installierten Gaszähler den Strömungswiderstand in der Gasleitung soweit erhöhten, dass ein Gasverdichter und zwei Nulldruckregler nachgerüstet werden mussten. Aufgrund dieser kosten- und zeitintensiven Maßnahme konnte die Datenaufnahme an diesem Betrieb erst im Januar 2013 begonnen werden.

Zur Normierung der gemessenen Gasmengen wurden in allen Anlagen zusätzlich Druck- und Temperatursensoren installiert. Außer bei Betrieb 19, bei dem diese Arbeiten beim Umbau der Gasstrecke mit erledigt wurden, erfolgte der Einbau durch die Mitarbeiter der LfL.

3.4.2 Messverfahren

Soweit sich die im bisherigen Biogas-Monitoring angewandten Messverfahren bewährt hatten, wurden diese auch in den vorliegenden Anlagen wieder eingesetzt. Zur Erfassung der Gasmengen wurden ausschließlich Durchflussmesser eingesetzt, die auf dem Prinzip des Wirbelstroms beruhen. Für die Temperaturmessungen im Gärgemisch und im Biogas kamen Pt 100-Fühler zum Einsatz. Für die Messung von Differenz- und Absolutdruck wurden piezoelektrische Druckmessumformer verwendet. Zur Bestimmung der Wärmemengen wurden Wärmemengenzähler mit Flügelrad und Pt 100 Temperaturfühlern eingesetzt. Die Zusammensetzung des produzierten Biogases wurde mit automatischen Gasanalysatoren der Firma AWITE Bioenergie GmbH, Langenbach gemessen, bei denen die Komponenten CH₄ und CO₂ mit Infrarotsensoren, die Komponenten O₂ und H₂S mit elekt-

rochemischen Sensoren erfasst werden. Diese wurden vor Ort halbjährlich überprüft und kalibriert.

Die Stromverbräuche wurden mit elektronischen Zählern (bis 50 A) bzw. mit Wandlerzählern (über 50 A) gemessen. Dementsprechend kamen erstere für die Bestimmung des Verbrauchs einzelner Aggregate und letztere für die Messung der Stromeinspeisung zum Einsatz. Zur Bestimmung der Mengen an eingetragenen flüssigen und festen Substraten dienten die in Tab. 4 angegebenen Messsysteme. Schwierig gestaltete sich dabei die Messung der zugegebenen flüssigen Wirtschaftsdünger. Die herkömmlich verwendeten magnetisch-induktiven Systeme liefern nur bei bestimmten Einbausituationen verlässliche Werte. Bei leer laufenden Rohrleitungssystemen z. B. beeinträchtigt die in den Leitungen befindliche Luft das Messergebnis so stark, dass dieses nicht verwertet werden kann. Es wurde deshalb beschlossen, auf die an den Betrieben bereits verwendeten Systeme zur Gülleerfassung zurück zu greifen, da diese ausreichend genaue Ergebnisse liefern. In Pilotanlage 17 wurden keine flüssigen Substrate eingesetzt. Entsprechend fehlt die Angabe in Tab. 4.

Tab. 4: Messgeräte und Methoden zur Bestimmung der Substratflüsse

ID Anlage	Feste Inputstoffe + Erntemenge	Flüssige Wirtschaftsdünger
17	Wägezellen + Fuhrwerkswaage	-
18	Wägezellen + Achslastwaage	Pumpenlaufzeit
19	Achslastwaage	Pumpenlaufzeit
20	Wägezellen + Achslastwaage*	Anzahl der Güllefässer
21	Wägezellen + Fuhrwerkswaage	Magnetisch induktiv

*) sporadisch im Rahmen des Projekts „Erntelogistik“

3.5 Datenerfassung und Datenübermittlung

Soweit nicht bereits im Zuge der Anlagenauswahl geschehen, wurden die Stammdaten der einzelnen Biogasanlagen, d. h. die vorhandenen Einrichtungen und ihre Dimensionierung im Detail dokumentiert. Auf dieser Basis wurden schematische Darstellungen der Anlagen erstellt (siehe Kapitel 0).

Die fortlaufende Gewinnung der Bewegungsdaten während der Beobachtungsphase erfolgte im Wesentlichen auf drei verschiedene Arten:

- Probenahme und chemische Analyse im Labor der LfL (zyklisch)
- Datenlogger (kontinuierlich)
- Betriebstagebuch (kontinuierlich)

3.5.1 Probenahme und chemische Analysen

Im Juli 2012 wurden die ersten Proben an den Grünland-Biogasanlagen genommen. Die Probenahmen erfolgten im monatlichen Zyklus. Beprobte wurden alle Ausgangsmaterialien, die Gärgemische in den Gärbehältern und der Gärrest. In Tab. 5 sind die chemischen und physikalischen Parameter dargestellt, die in den unterschiedlichen Proben analysiert wurden. Die bei der Analyse der Proben angewandten Methoden sind in Tab. 6 aufgelistet und kurz beschrieben.

Tab. 5: Übersicht der Analyseparameter für Proben von Substraten, Gärgemischen und Gärrückständen

Probenart	Feststoffe	Gülle	Gärgemisch	Gärrest
TM in der Frischmasse, %	x	x	x	x
oTM in der TM, %	x	x	x	x
FOS/TAC, 1			x	
FFS gesamt, mg L ⁻¹			x	
pH-Wert, 1			x	x
Essigsäure, mg L ⁻¹			x	
Propionsäure, mg L ⁻¹			x	
iso-Buttersäure, mg L ⁻¹			x	
Buttersäure, mg L ⁻¹			x	
iso-Valeriansäure, mg L ⁻¹			x	
Valeriansäure, mg L ⁻¹			x	
NH ₄ ⁺ -N, mg L ⁻¹	(x)	(x)	x	x
Rohprotein/-faser/-fett in der TM, %	x	x		
N _{org} in der TM, %	(x)	(x)		x
C in der TM, %	(x)	(x)		
P in der TM, %				x
K in der TM, %				x
NDF/ADF/ADL in der TM, %	(x)	(x)		

(x): Unregelmäßig bestimmte Parameter

Tab. 6: Übersicht der Methoden zur Analyse der Substrate und Gärreste

Parameter	Methode	Enthalten in	Kurze Beschreibung
TS	DIN 12880	Handbuch der Boden-	Trocknung bei (105±2)°C
	DIN 38414-S2	untersuchung; DEWAS*	bis zur Gewichtskonstanz,
oTM	DIN 12879	Handbuch der Boden-	Veraschung der TS bei
	DIN 38414-S3	untersuchung; DEWAS	550°C, TS – Asche = oTM
pH	DIN 38404-C5	DEWAS	Elektrode
	DIN 12176		
TAC	DIN 38409 H7	DEWAS	Titration
FOS/TAC		Nordmann (1977)	Titration
FFS-GC	Hausmethode, verändert nach Methode der SCHMACK BIOGAS AG		Gas-Chromatograph
NH ₄ ⁺	verändert nach DIN 38406 E5-2	DEWAS	Wasserdampfdestillation, anschließende Titration
Rohprotein	VDLUFA 4.1.1	VDLUFA M.Band III	Kjeldahl-Methode
Rohfett	VDLUFA 5.1.1/2	VDLUFA M.Band III	
Rohfaser	VDLUFA 6.1.1/2	VDLUFA M.Band III	
NfE	VDLUFA 7	VDLUFA M.Band III	
NDF	VDLUFA 6.5.1	VDLUFA M.Band III	
ADF	VDLUFA 6.5.2	VDLUFA M.Band III	
ADL	VDLUFA 6.5.3	VDLUFA M.Band III	
C, N, S	VDLUFA 4.1.2	VDLUFA M.Band III	Dumas-Verbrennung
P, K, Ca	VDLUFA MB I	VDLUFA M.Band I	ICP

*) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung

Während der Projektlaufzeit fand jeweils im Winter die Bestimmung der Restgaspotentiale der einzelnen Anlagen im Biogaslabor der LfL statt. Hierzu wurden an einem Tag Proben der Gärreste aus allen teilnehmenden Anlagen beschafft.

3.5.2 Datenlogger

Automatisch erfassbare Daten wurden über Datenlogger gespeichert. Dies betraf im Wesentlichen Daten zu Temperatur, Druck, Stromverbrauch, Stromproduktion und Wärmeverbrauch. In drei Fällen wurden auch die Durchflussmengen der Gaszähler auf dieses Medium gespeichert. Das Aufzeichnungsintervall betrug 12 Stunden. Dies bedeutet, dass in diesen Zeitabständen die aktuellen Werte der Zähler und die 12 Stunden Mittelwerte absoluter Größen (z. B. Temperatur) aufgezeichnet wurden.

Die Übermittlung der Daten erfolgte täglich. Hierfür wurde auf dem Computer des Anlagenbetreibers ein Programm installiert, das zu einer bestimmten Tageszeit die Daten von den Loggern herunterlädt und per E-Mail an die Projektbearbeiter versendet. Falls erforderlich wurde hierfür ein PC von der LfL zur Verfügung gestellt. Der entscheidende Vorteil dieses Systems ist die Möglichkeit zeitnaher Auswertungen, wodurch etwaige Fehler innerhalb kurzer Frist erkannt werden können. Nachteilig machte sich der erhöhte Zeitaufwand bemerkbar, der zur Programmierung und Installation erforderlich war.

3.5.3 Betriebstagebuch

Erstmalig wurde den Teilnehmern des Monitorings ein elektronisches Betriebstagebuch in Form eines PDA („Personal Digital Assistant“) zur Verfügung gestellt. Dieses System bot für die Zusammenarbeit zwischen Betreibern und Projektbearbeitern sowie die Weiterverarbeitung der Daten einige Vorteile:

- Zeitnahe Überprüfung der eingetragenen Daten;
- sofortige Information, ob das Tagebuch regelmäßig geführt wird;
- Verfügbarkeit der Daten in elektronischer Form zur Weiterverarbeitung;
- sofortige Verfügbarkeit der Daten für die Betreiber (in elektronischer Form).

Abb. 12 zeigt unterschiedliche Eingabemasken der PDA-Anwendung. Im ersten Bild (links) ist die Startmaske zu sehen. Dort kann ein neuer Tag aufgerufen oder ein bereits fertiger Tagebucheintrag bearbeitet werden. Das zweite Bild (Mitte) zeigt die Vorgehensweise beim Eintragen der Daten. Aufgerufen ist der Betriebsparameter „Rindergülle“. Nachdem für diesen ein Wert eingetragen wurde, ist das ‚W‘-Feld zu betätigen, wodurch der nächste Parameter erscheint (‚Z‘ führt zum vorherigen Parameter). Die Reihenfolge der Parameter kann vom Nutzer beliebig verändert werden. Bei den Substratmengen besteht die Möglichkeit, zwei Werte pro Tag einzutragen (Bild rechts). Diese Option wurde eingerichtet, da einige Betreiber zweimal pro Tag füttern. Die eingetragenen Massen werden dann automatisch addiert und abgespeichert. Durch Betätigen des Feldes ‚GÜB‘ (Güllebonus) bekommt der Betreiber die Information, ob die Masse an zugegebenem Wirtschaftsdünger für diesen Tag ausgereicht hat, um die Vorgaben zum Erhalt des Güllebonus zu erfüllen. ‚Speichern‘ sichert alle eingetragenen Werte. Auf Wunsch können vom Projektbearbeiter Parameter hinzugefügt werden.



Abb. 12: Start- und Eingabemasken des elektronischen Betriebstagebuchs für PDA

Die an den Betrieben zur Übermittlung der Loggerdaten vorhandenen Computer wurden auch für die PDA genutzt. Zunächst wurden die auf täglicher Basis eingetragenen Daten gespeichert und auf den PC vor Ort übertragen. Sie standen dann sofort in Form einer Tabelle in MS[®]Excel für den Betreiber zur Verfügung und wurden per E-Mail an die Projektbearbeiter übermittelt.

Nach etwa einjährigem Betrieb erwies sich diese Lösung jedoch als unsicher, da die Computer auch für den Zugang ins Internet genutzt wurden und wiederholt ausfielen. Es war deshalb notwendig, die Bildschirme zu entfernen, woraufhin die Rechner nicht mehr abstürzten. Ein Nachteil dieses Vorgehens war, dass den Betreibern die Datentabellen nicht mehr unmittelbar vorlagen. Deswegen wurden diese in regelmäßigen Abständen von den Projektbearbeitern verschickt. Dennoch war eine Vereinheitlichung der Datenaufnahme nicht möglich, da in einem Fall (#21) die Nutzung des PDA abgelehnt wurde, weil dort bereits mit einem computergestützten Datenerfassungssystem gearbeitet wurde. Des Weiteren wurde auf PB 18 die Benutzung des PDA im Frühjahr 2014 auf Wunsch des Betreibers abgebrochen.

Über den gesamten Zeitraum hinweg wurde das PDA-System also auf drei Betrieben ohne Unterbrechung eingesetzt. Die praktische Handhabung und die Zeitersparnis durch das Wegfallen der Datenübertragung wurden dort durchweg positiv bewertet. Entsprechend wurden die Betriebstagebücher sehr zuverlässig geführt und es waren nur vereinzelt - vor allem an Sonn- und Feiertagen - Datenlücken zu verzeichnen. Direkt auf den Betrieben installierte Messrechner für die Übertragung der Daten erwiesen sich als vorteilhaft, da die Datensätze sehr regelmäßig versandt wurden. Wo eine solche Installation aus technischen Gründen nicht möglich war und der PC des Betreibers genutzt wurde, kam es häufig zu einer verzögerten Weitergabe der Daten an die LfL, da die Tagebücher nicht täglich mit den Bürorechnern verbunden wurden.

Auch für die Projektbearbeitung stellte sich das System durchweg positiv dar. Die Vorteile lagen vor allem in der kurzfristigen Datenübermittlung und den verbesserten Kontrollmöglichkeiten. Die eingesetzten Geräte funktionierten zuverlässig: bei einem Einsatz über mehr als 400 Tage war nur ein einziger Störfall zu verzeichnen. In diesem Fall musste das betreffende Gerät ausgetauscht werden. Da keine Daten mehr zu übertragen waren, konnte

deutlich mehr Zeit eingespart werden, als für Wartung und Betreuung aufgewendet werden musste. Zudem entfiel das Einsammeln der Wochentagebücher in Papierform. Hier hatte es in der Vergangenheit immer wieder Probleme durch lückenhafte Dokumentationen bzw. schlechte Lesbarkeit im Falle handschriftlicher, per Telefax übermittelter Aufzeichnungen gegeben. Solche Schwierigkeiten konnten durch den Einsatz der PDAs erfolgreich vermieden werden. Für künftige Anwendungen erscheint der Einsatz dieser Geräte jedoch nicht mehr sinnvoll, da diese mittlerweile veraltet, nur noch schwer erhältlich und vergleichsweise teuer in der Anschaffung sind.

3.6 Zeichnerische Dokumentation der „Grünland-Pilotanlagen“

Auch für die Grünland-Pilotbetriebe wurden, wie für die Biogas-Pilotanlagen üblich, hochwertige Dokumentationsunterlagen angefertigt. Mit der Architektur-Software ARCHline® 2015 (IT-Concept Software GmbH, Perg, Österreich) wurde von allen Pilotanlagen auf Basis vorhandener Planunterlagen und eines Aufmaßes ein dreidimensionales Modell erstellt. Aus diesem 3D-Modell können isometrische Darstellungen, Grundrisse und Schnitte der Anlagen gezeichnet werden. Das 3D-Modell wurde genutzt, um mit der Software Thea Render (Solid Iris Technologies, Attiki, Griechenland) eine naturnahe Abbildung der Anlage zu erzeugen.

Aus den erarbeiteten Planunterlagen, Stammdaten und Fotos wurden unter MS Publisher für jede Pilotanlage zwei Poster (DIN A0) nach einheitlichem Aufbau gestaltet. Auf diesen Postern werden die Anlagen mit den wichtigsten technischen Daten, einem Lageplan, einem Grundriss, zeichnerischen Darstellungen und Detailfotos vorgestellt. Die Betreiber können diese Poster nutzen, um Besuchern ihre Anlage zu präsentieren. Im Folgenden werden die Grundrisse sowie ausgewählte Darstellungen der fünf Pilotanlagen gezeigt. Die vollständigen Dokumentationsunterlagen sind separat auf CD verfügbar.

3.6.1 Darstellung von Pilotanlage #17

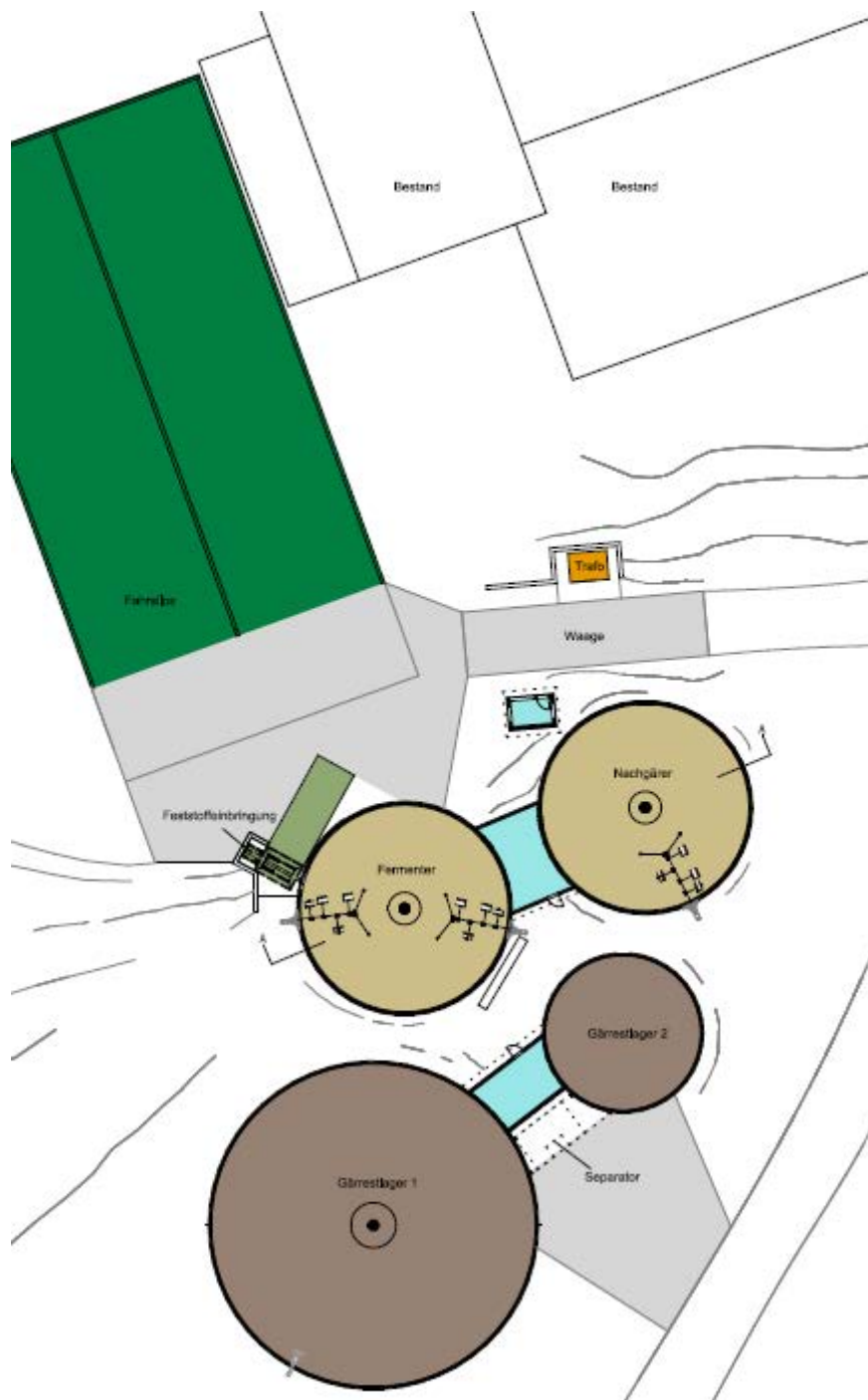


Abb. 13: Grundriss Pilotanlage 17

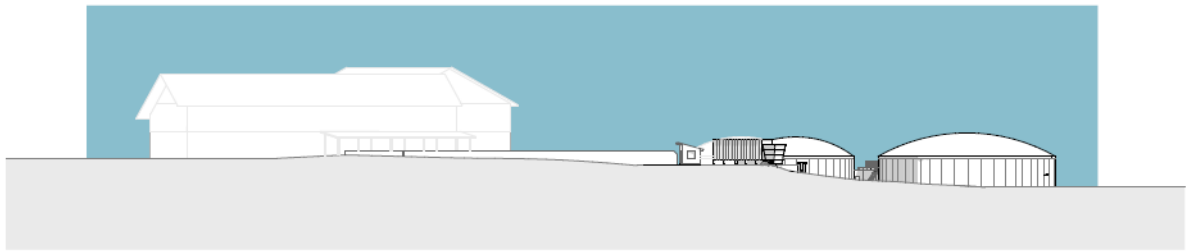


Abb. 14: Pilotanlage 17 - Westseite



Abb. 15: Pilotanlage 17 – Südseite

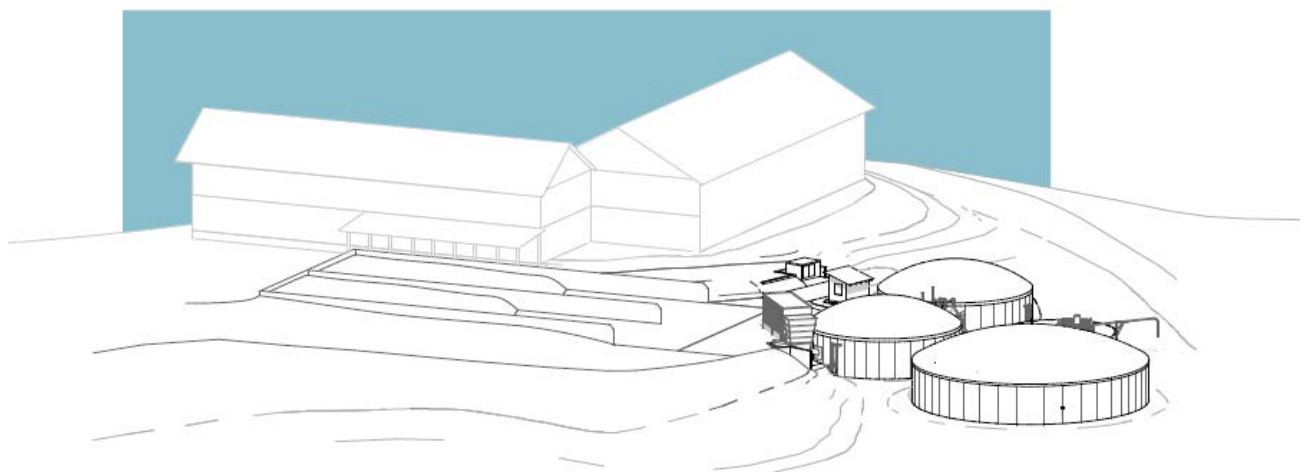


Abb. 16: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 17

3.6.2 Darstellung von Pilotanlage #18



Abb. 17: Grundriss von Pilotanlage 18

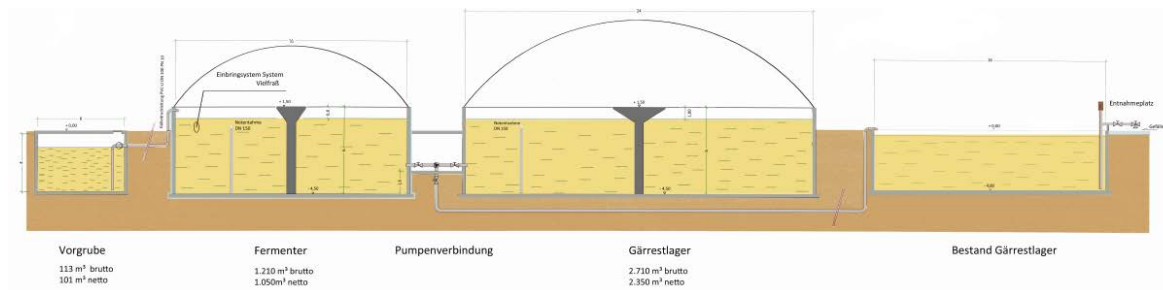


Abb. 18: Schnittdarstellung und Dimensionierung der Behälter von Pilotanlage 18

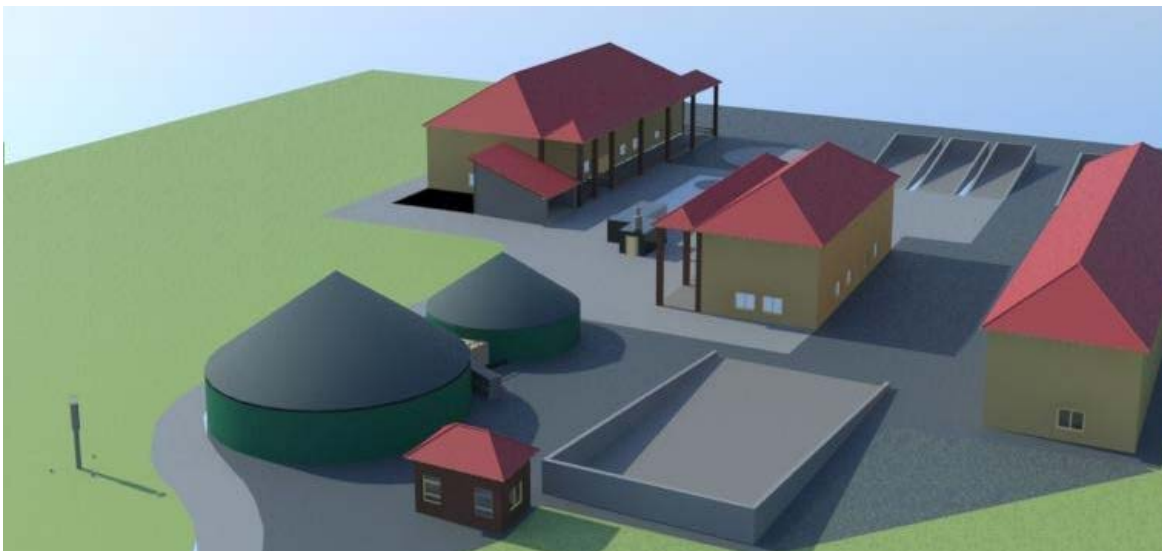
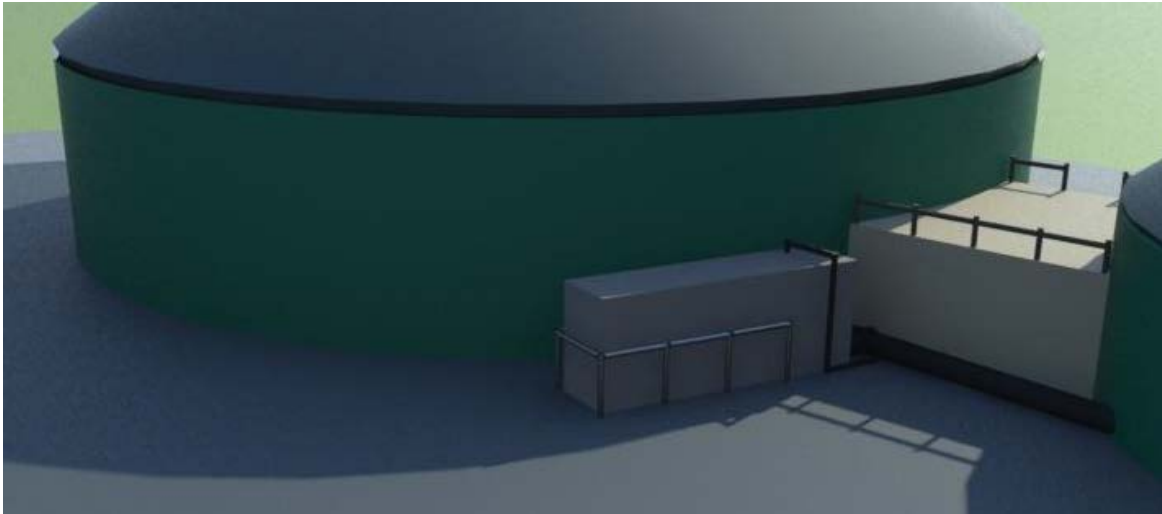


Abb. 19: Gerenderte Darstellung der Pilotanlage 18 - Kocher (oben), isometrische Darstellung (unten)

3.6.3 Darstellung von Pilotanlage #19

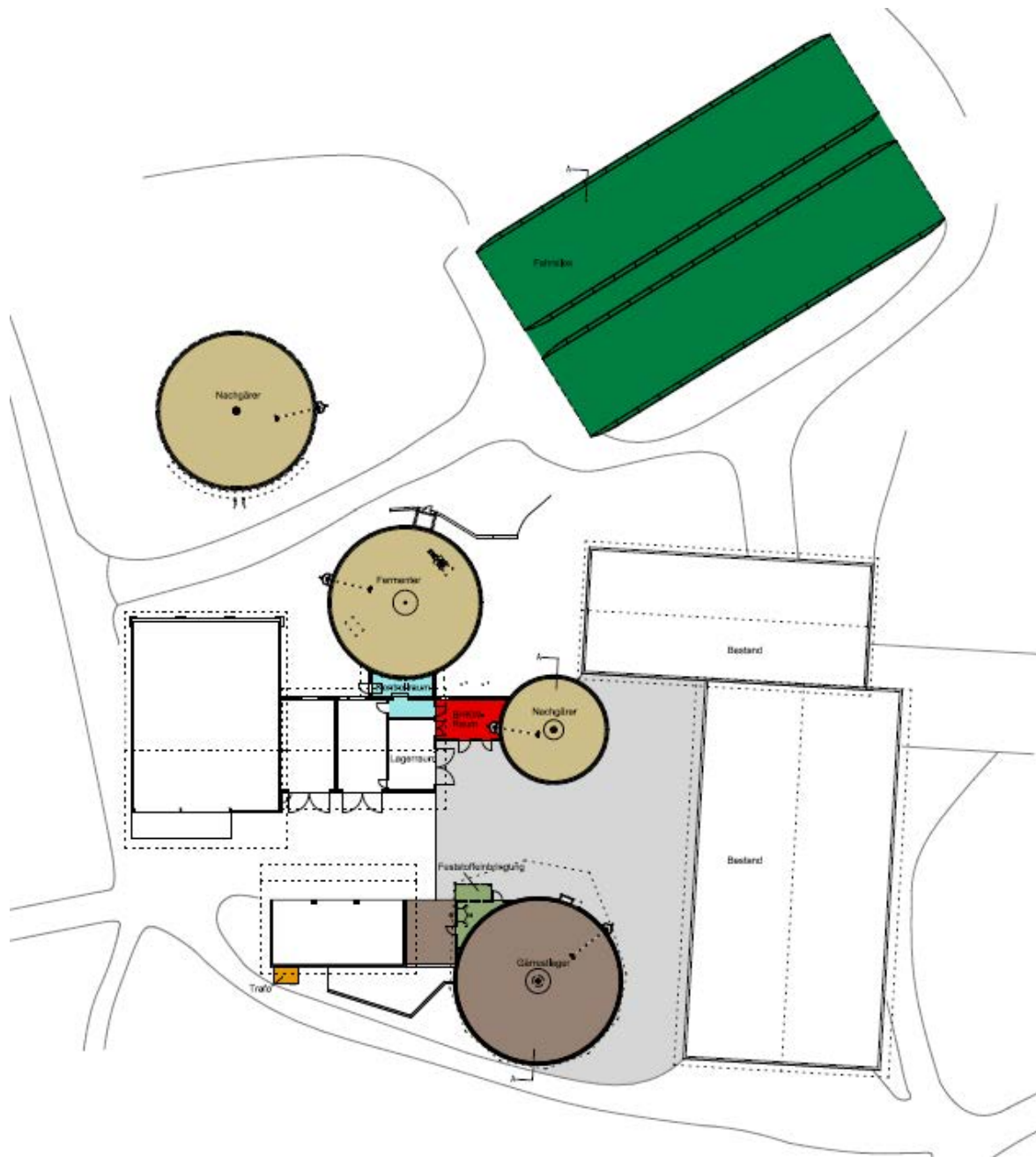


Abb. 20: Grundriss von Pilotanlage 19

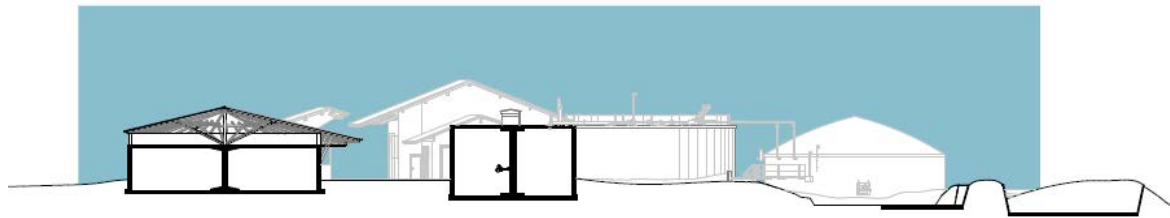


Abb. 21: Pilotanlage 19 - Schnittdarstellung und Ansicht von Südost

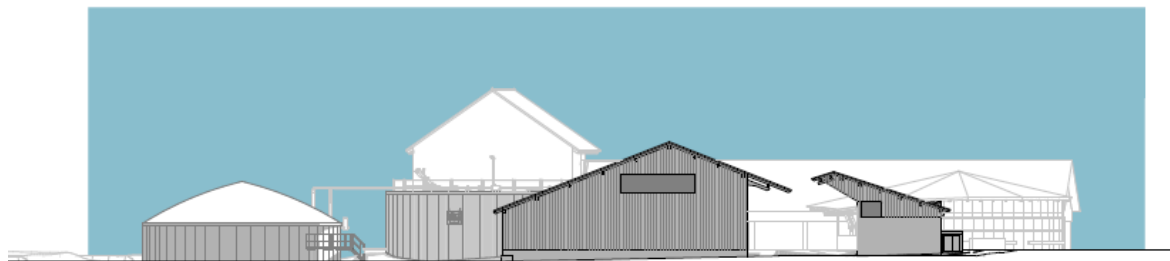


Abb. 22: Pilotanlage 19 – Ansicht von Nordwest

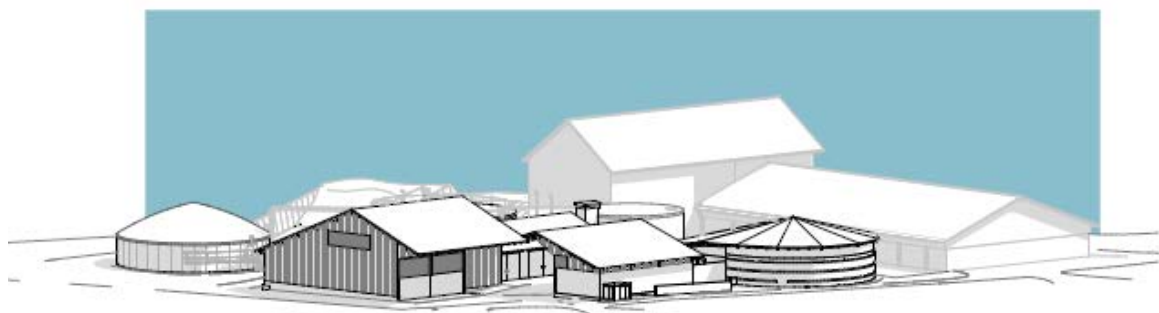


Abb. 23: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 19

3.6.4 Darstellung von Pilotanlage #20



Abb. 24: Grundriss von Pilotanlage 20



Abb. 25: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 20 (gerendert)

3.6.5 Darstellung von Pilotanlage #21

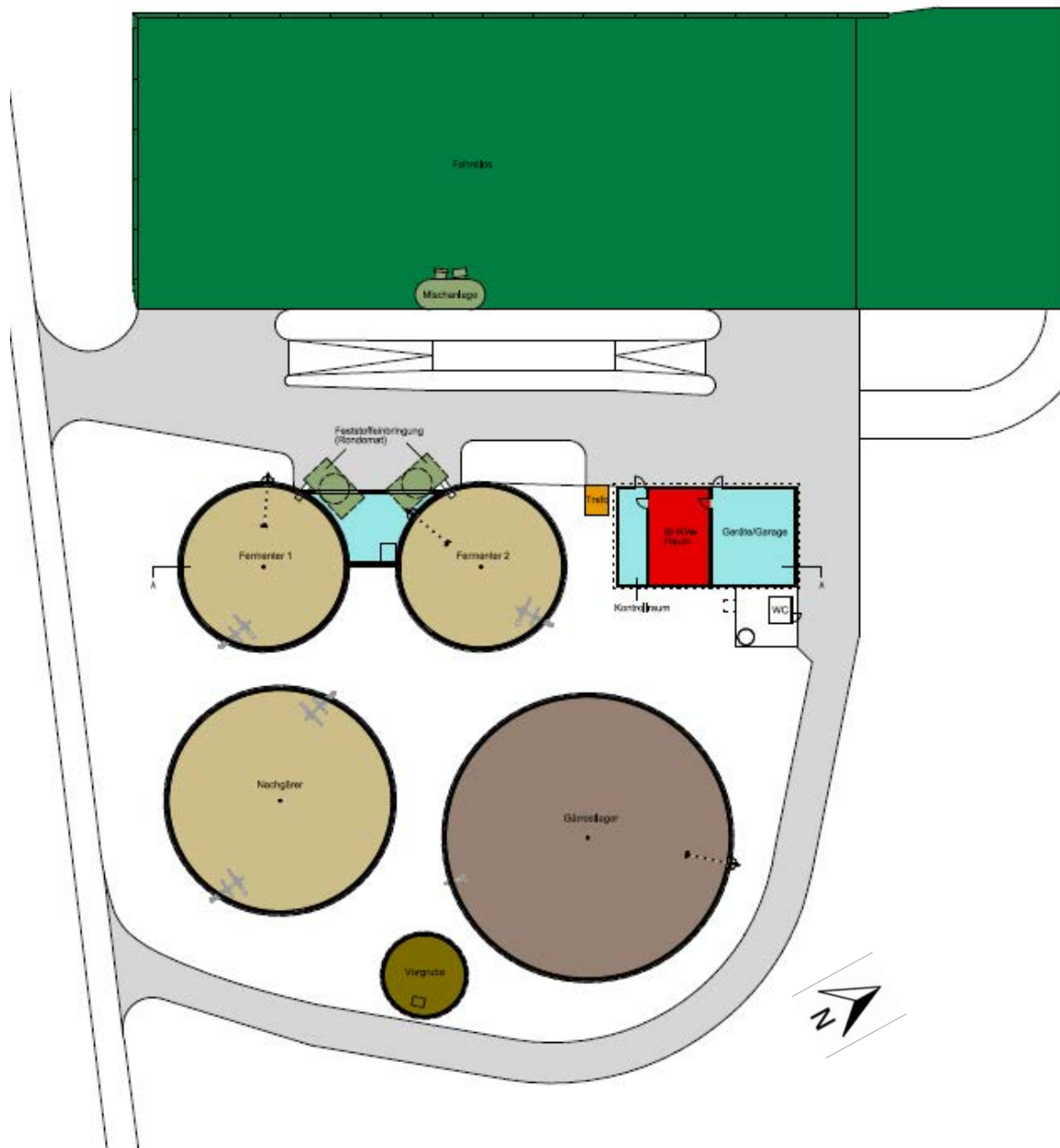


Abb. 26: Grundriss von Pilotanlage 21

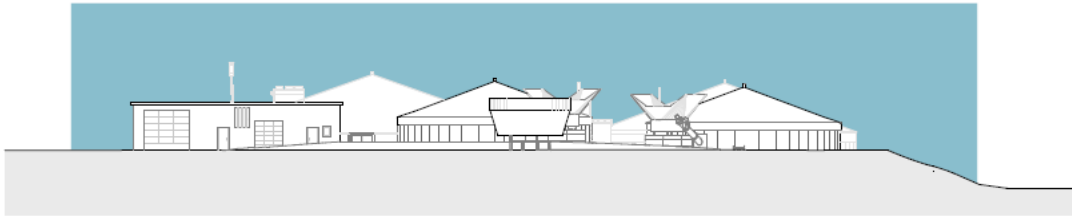


Abb. 27: Pilotanlage 21 - Ansicht von Nordwest

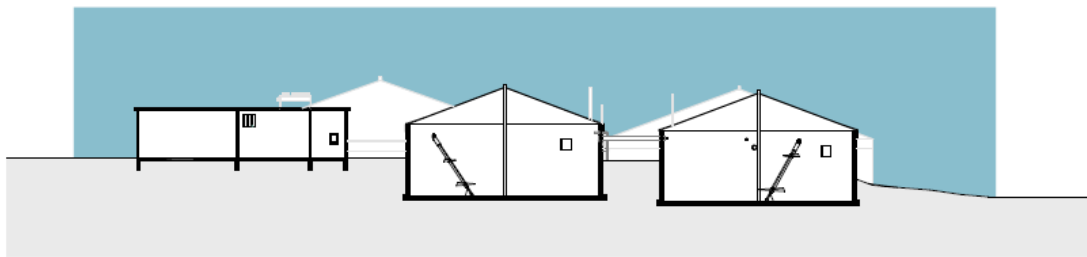


Abb. 28: Pilotanlage 21 - Schnittdarstellung der Nordwest-Ansicht

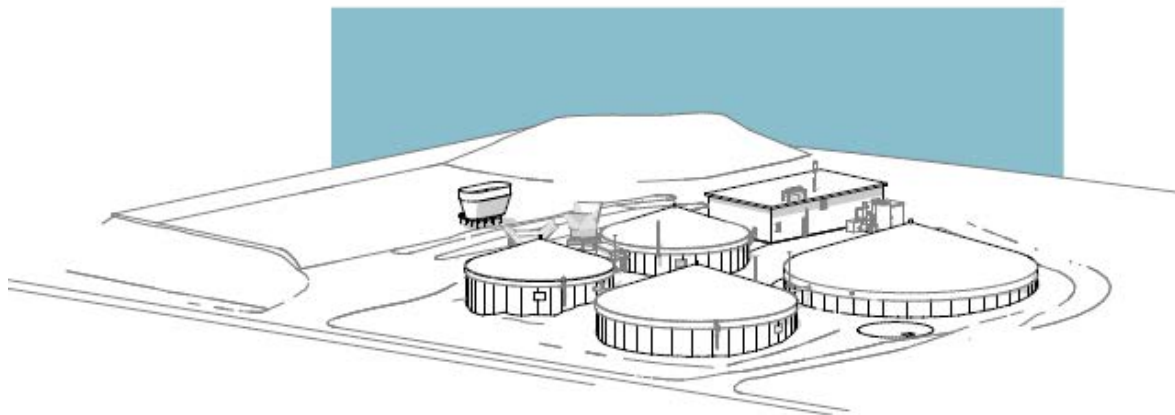


Abb. 29: Isometrische Darstellung von Pilotanlage 21

3.7 Berechnung der Treibhausgasbilanz und des kumulierten Energieverbrauchs für die Energiebereitstellung aus Biogas

Für die Energiebereitstellung aus der gesamten Biogaskette wurde wie zuvor für die anderen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion eine Bilanz der Treibhausgas (THG)-Emissionen und des kumulierten (fossilen) Energieverbrauchs (KEV) erstellt. Allerdings wurde für die Bilanzierung der Grünland-Pilotbetriebe mit dem ‚THG-Rechner Biogas‘ eine veränderte Methode verwendet.

Das Bilanzierungsmodell des ‚THG-Rechner Biogas‘ betrachtet die Biogaskette als einen landwirtschaftlichen Betriebszweig und untergliedert diesen in die beiden Bereiche Substratbereitstellung und Biogasproduktion/-verwertung. Die Pilotbetriebe wurden anhand des Landkreises, der Wirtschaftsweise, der Betriebsgröße und der durchschnittlichen Schlaggröße modelliert. Die Anbau-Biomasse wurde unter Verwendung der gemessenen Qualitätsparameter und gegebenenfalls des Entwicklungsstadiums zur Ernte näher beschrieben. Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und Reststoffen wurden keine vorgelagerten Umweltwirkungen angerechnet. Die Biogasanlagen wurden entsprechend der baulichen Ausstattung, des Managements und der gemessenen Energieströme modelliert. Die Biogasverwertung wurde bis zur Einspeisung ins Stromnetz (ohne Berücksichtigung von Umspannverlusten) bilanziert. Besonders erwähnenswert ist, dass beim Wärmeabsatz nur diejenigen Wärmeströme berücksichtigt wurden, die der Versorgung von Gebäuden dienen und fossile Energieträger ersetzen. Für die detaillierte Beschreibung der Methodik des THG-Rechners wird auf den Abschlussbericht zum entsprechenden Forschungsprojekt verwiesen (Effenberger et al., 2014). Um im ersten Schritt den horizontalen Anlagenvergleich zu erleichtern, wurden für die Eingangsparameter der Berechnung teilweise einheitliche Annahmen getroffen, die in Tab. 7 angegeben sind.

Tab. 7: *Einheitliche Annahmen für die Berechnung der THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas für die Grünland-Pilotbetriebe*

Eingangsparameter	Auswahl bzw. Wert
Schnitthäufigkeit Klee/Klee gras /Acker gras /Grünland	3
Anbaudauer in Jahren für...	
Grünland	20
Klee/Klee gras/Acker gras	3
andere Früchte	1
Bodenbearbeitung	wendend
Mittlere Feld-Hof-Entfernung	2 km
Mittlere Schlaggröße	2 ha
Anteil zugekaufter Substrate (Frischmasse)	10 %
Mittlere Transportentfernung für zugekaufte Substrate	6 km
Silageverluste	8 %
Schwimmschicht auf offenem Gärrestlager?	ja
Ammoniakemissionen aus offenem Gärrestlager	nicht berücksichtigt
Gärrestaustausstechnik auf Acker-/Grünland	entsprechend der Praxis in D
Regelmäßige Anlagenbegehung?	nein
Zündöl für BHKW (soweit zutreffend)	Rapsöl
Netzverlust	0 %

Aufgrund der Unterschiede in der Methodik können die Berechnungsergebnisse nicht uneingeschränkt mit denjenigen für die früheren Pilotbetriebe verglichen werden (Effenberger et al., 2010; Bachmaier et al., 2011; Ebertseder et al., 2012). Eine vergleichende qualitative Diskussion ist jedoch möglich.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einzelbetrachtung der „Grünland-Pilotanlagen“

Im Folgenden werden die erhobenen und ausgewerteten Daten der einzelnen Betriebe dargestellt und diskutiert. Dies umfasst die Leistungs- und Betriebsparameter sowie die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen von Eingangssubstraten, Gärgemischen und Gärresten. Anhand einer Beschreibung des allgemeinen Betriebsverlaufs sowie besonderer Vorkommnisse/Auffälligkeiten während des Untersuchungszeitraums können Stärken und Schwächen des jeweiligen Konzepts aufgezeigt werden.

Als gebräuchlichste chemische Prozessindikatoren werden hier der FOS/TAC-Quotient sowie die Konzentration der gesamten flüchtigen Fettsäuren (FFS), der Essigsäure und der Propionsäure diskutiert. Gängige Warnwerte für die letzteren drei Prozessindikatoren und Hinweise zu deren Aussagekraft sind in Tab. 8 aufgelistet. Diese Werte gelten erfahrungsgemäß für Proben aus dem Hauptgärbehälter (Rührkesselreaktor) bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen. Beim FOS/TAC hat sich gezeigt, dass kein sinnvoller allgemein gültiger Warnwert angegeben werden kann. Als zuverlässiges Warnsignal für eine mögliche Hemmung des Gärprozesses gilt ein rasch ansteigender Trend ausgehend von einem anlagenspezifischen „Normalniveau“. Als weiterer Indikator wird gelegentlich das Verhältnis der Essigsäure- und Propionsäurekonzentration (in mg Essigsäure-Äquivalente) betrachtet, das größer als 2 sein sollte. Dieser Parameter hat jedoch eine eingeschränkte Aussagekraft.

Tab. 8: Gängige Warnwerte und Interpretationshinweise für ausgewählte chemische Prozessindikatoren in Rührkesselfermentern (nach Effenberger & Lebuhn, 2008; Effenberger et al., 2011)

Prozessindikator	Warnwert	Hinweis
Gesamte Essigsäure-Äquivalente, mg L ⁻¹	4000	Höhere Werte können eine Hemmung der Methanbildung anzeigen, die alleinige Aussagekraft ist jedoch eingeschränkt.
Essigsäure, mg L ⁻¹	3000	Höhere Werte können eine Hemmung der Methanbildung anzeigen.
Propionsäure, mg L ⁻¹	1000	Höhere Werte können eine Hemmung der Acetogenese bzw. der Methanbildung anzeigen.

Bei der Vergärung von Gras sollte auch die Konzentration von Ammonium-Stickstoff im Gärgemisch beobachtet werden. Das Dissoziationsgleichgewicht Ammonium/Ammoniak verschiebt sich mit höherer Temperatur und höherem pH-Wert in Richtung des Ammoniaks, welches schon in geringen Mengen toxisch auf die Mikroorganismen wirkt. Eine deutliche Hemmwirkung auf die Biogasproduktion tritt in der Regel ab einem Konzentrationsniveau von Ammoniak um 600 mg L⁻¹ auf (Lebuhn et al., 2010). Die entspricht bei mesophilem Temperaturniveau (ca. 38 °C) und einem pH-Wert von 8,2 einer ammoniakalischen Stickstoffkonzentration von ca. 3 g L⁻¹.

4.1.1 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #17

Aufgrund der für die Vergärung anspruchsvollen Einsatzstoffe war ein reibungsloser Betrieb dieser Anlage während der Beobachtungsperiode nicht immer gewährleistet. Insgesamt gab es während dieser Zeit drei Phasen, in denen die Situation als kritisch zu beurteilen war. Überraschenderweise fällt das Ergebnis bezüglich der Auslastung der Anlage dennoch günstig aus.

4.1.1.1 Substrateinsatz

Die Dokumentation der Substratzugabe umfasst für diesen Betrieb einen Zeitraum von 953 Tagen. Der Hauptbestandteil der Futtermischung für diese Biogasanlage war Kleegrassilage, welche über die Hälfte der mittleren täglich zugeführten Gesamtmasse von 17,4 t ausmachte. Das Auswahlkriterium von mindestens 60 % Grasanteil an den pflanzlichen Einsatzstoffen wurde deutlich übertroffen, denn der Massenanteil von Klee an den zugegebenen Energiepflanzen betrug rund 89 %. Außer Maissilage mit einem Anteil von 6 % spielten andere Energiepflanzen nur eine untergeordnete Rolle (siehe Abb. 30 rechts).

Die Vorgaben zum Erhalt des Güllebonus wurden ausschließlich durch die Zugabe von Festmist erfüllt, davon beinahe die Hälfte als Geflügelmist (siehe Abb. 30 links). Für den biologischen Pflanzenbau stellt sich die Substratzusammensetzung günstig dar, da die Düngewirkung aufgrund des hohen Stickstoffanteils zunimmt. Für die Biogasproduktion stellt dieser Umstand ein Risiko dar, da durch die hohen Ammoniakgehalte mittelfristig mit Prozessstörungen gerechnet werden muss.

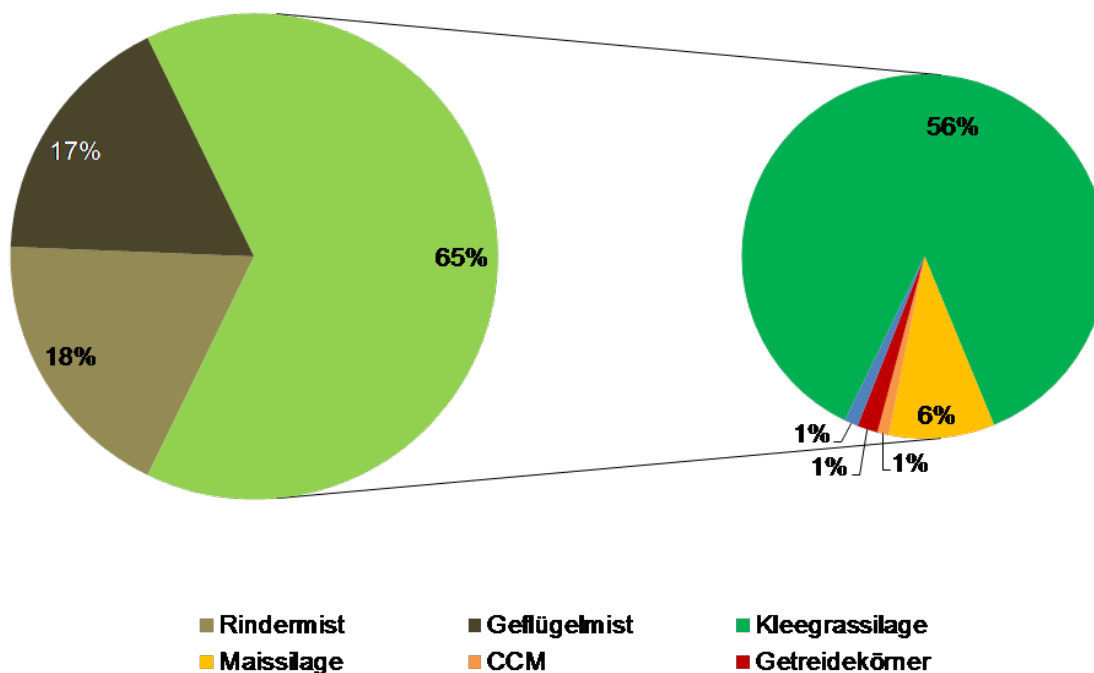


Abb. 30: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 17

Abb. 31 zeigt den dokumentierten Verlauf der täglich zugeführten Substratmischung für Pilotanlage 17. Es ist zu erkennen, dass die Zugabe an Frischmasse relativ starken Schwankungen unterworfen war, da die Futtermengen stets an die Potentiale der eingesetzten Substrate angepasst werden mussten. Wurde die Zugabe von Mais unterbrochen, so wurde angestrebt, dessen höhere Biogasausbeute durch größere Gaben von Grassilage zu kompensieren. Tatsächlich musste jedoch in drei Fällen (September 2012, September 2013 und Mai/Juli 2014) die Fütterung zunächst zurückgenommen werden, da die an hohe ammoniakalische Stickstoffkonzentrationen adaptierte Biologie auf die Veränderung der Substratzusammensetzung sehr sensibel reagierte. In allen drei Fällen deutete der Prozessindikator Propionsäure auf eine Hemmung der Gärbiologie hin. (vgl. Abb. 33).

Die Reduzierung der die Futterrücknahme führte in der Regel nicht zu einer unmittelbaren Verminderung der Biogasausbeute. Lediglich im Spätwinter/Frühjahr 2014, als die höchsten Propionsäurewerte nachgewiesen wurden, wurde eine verminderte Gasproduktionsrate beobachtet. Im Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum ergab sich eine Biogasausbeute (Standardbedingungen) aus der oTM von $523 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

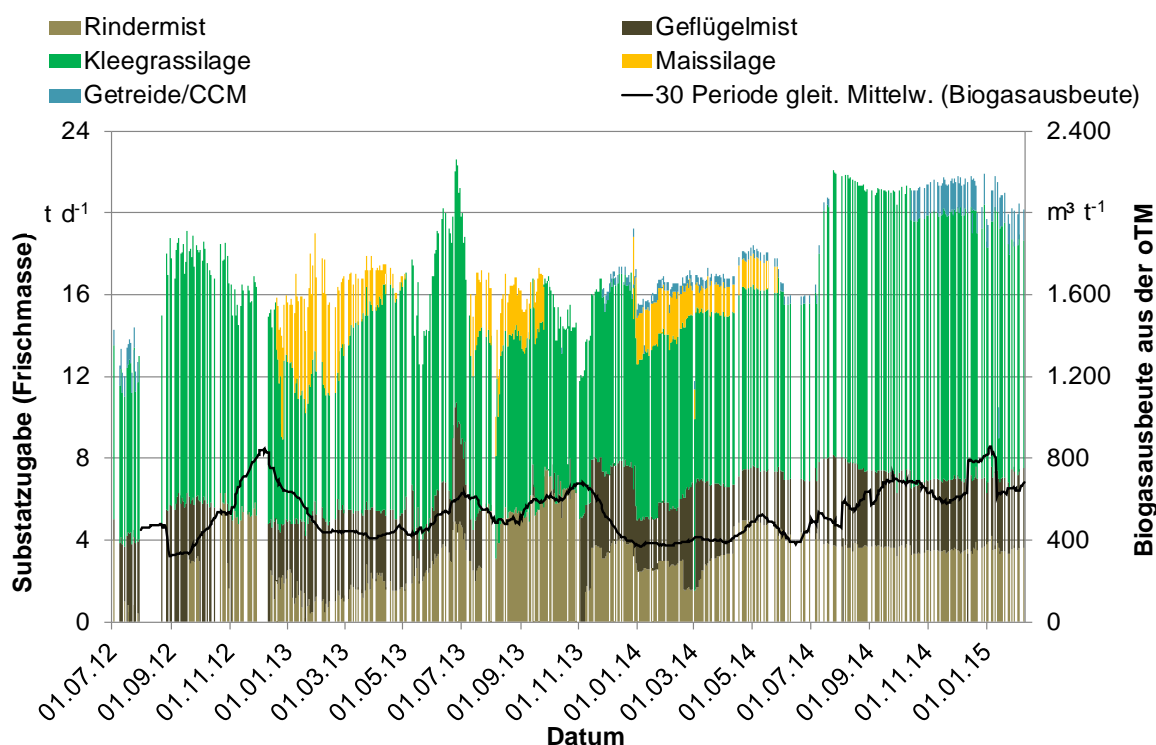


Abb. 31: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) für Pilotanlage 17

Die deutlichen Niveauunterschiede der Raumbelastung in den ersten beiden Dritteln des Untersuchungszeitraums wurden wie bereits erwähnt im Wesentlichen durch den zeitweisen Einsatz von Maissilage verursacht. Zu Beginn des Jahres 2013, als bis zu 6 t der täglichen Ration aus Mais bestanden, stieg die oTM-Raumbelastung in der ersten Vergärungsstufe auf knapp 5 kg m^{-3} an. Im Mai desselben Jahres sank diese dann deutlich, nachdem kein Mais mehr eingesetzt wurde. Dieser Umstand wurde bis Juli 2014 wiederholt beobachtet, wobei die Ausprägung des Anstiegs von der Menge an eingetragendem Mais abhing. Ab der Inbetriebnahme der neuen Maschine zur flexiblen Stromeinspeisung im August 2014 wurde in Ermangelung von Mais versucht, den höheren Gasbedarf vor allem durch größere Gaben von Grassilage zu realisieren. Die daraus resultierende steigende

Raumbelastung ist in Abb. 32 deutlich zu erkennen. Durch zusätzlich eingesetztes CCM (1,5 t täglich) ab Oktober 2014, das im Dezember durch Getreide ersetzt wurde, stieg die mittlere Raumbelastung gegen Ende des Untersuchungszeitraums bis auf knapp 6 kg m^{-3} an.

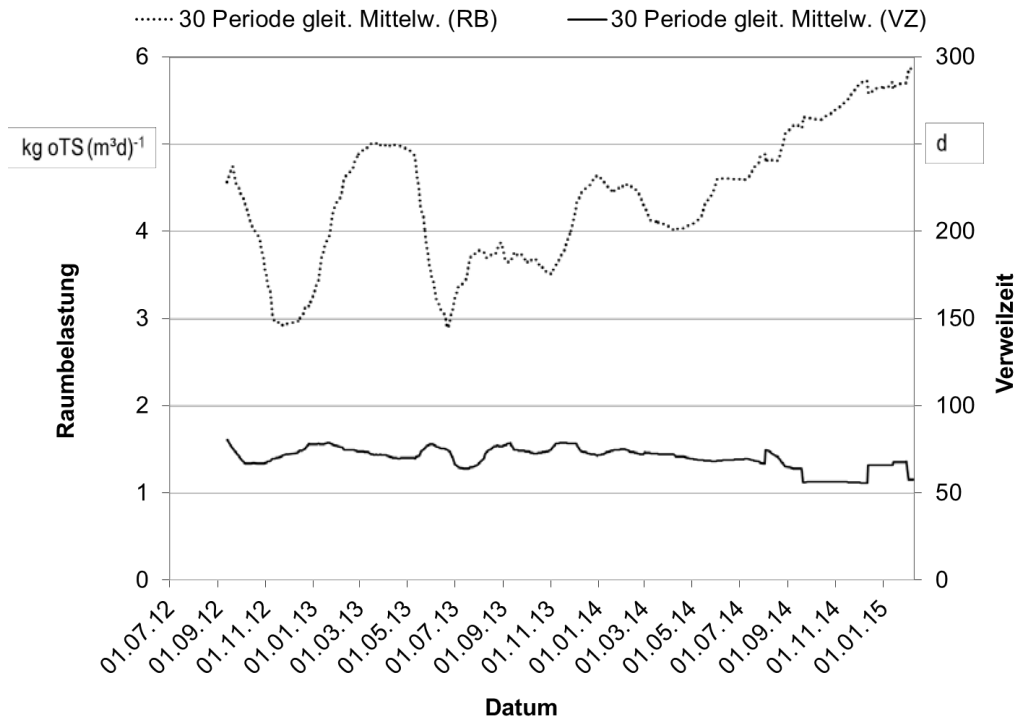


Abb. 32: Verweilzeit und Raumbelastung in Stufe 1 von Pilotanlage 17

4.1.1.2 Prozessparameter

Bei gleichzeitiger Betrachtung der FFS- und Stickstoffgehalte in Proben aus dem Fermenter fällt auf, dass immer dann das Verhältnis von Essig- zu Propionsäure deutlich absank, wenn eine Futterumstellung erfolgte oder über einen längeren Zeitraum ausschließlich Grassilage und Festmist eingesetzt wurden. Dies wurde im Herbst 2012, im Sommer 2013 und verstärkt über einen Zeitraum von mehreren Monaten ab Juli 2014 beobachtet (Abb. 33). Die Vermutung, dass dies direkt mit dem Anstieg des Gehalts an $\text{NH}_3\text{-N}$ zusammenhing, konnte nicht bestätigt werden. Die $\text{NH}_3\text{-N}$ -Konzentration lag zu allen Probenahmetermenen deutlich über dem Richtwert von 600 mg L^{-1} und in den Phasen mit günstigen Säureverhältnissen z. T. höher als in den problematischen Perioden. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass das System aufgrund des generell hohen Niveaus der $\text{NH}_3\text{-N}$ -Konzentration sensibel auf äußere Einflüsse wie z. B. Futterumstellungen oder Temperaturschwankungen reagierte (vgl. Abb. 31 und Abb. 38).

Dass durch die Zugabe von Maissilage die Verhältnisse stabilisiert werden konnten, überrascht nicht. Die Inbetriebnahme der neuen Maschine im August 2014, die zur flexiblen Stromlieferung im Teillastbetrieb ca. 6 h täglich betrieben wurde, erforderte eine Steigerung der Futtermenge um rund 25 %. Dies wurde anfangs ausschließlich durch höhere Gaben von Grassilage realisiert. Die Folge dieser Vorgehensweise war ein massiver Anstieg der Propionsäurekonzentration bis auf über 6 g L^{-1} (Warnwert: 1 g L^{-1}) (Abb. 33) und des FOS/TAC bis nahe 0,7 (Abb. 35). In dieser Phase bestand die akute Gefahr einer Destabilisierung der Gärbiologie. Daraufhin erfolgte im Oktober 2014 eine Änderung der Futtermischung, indem ein Teil der Grassilage zunächst durch CCM und dann durch Ge-

treide ersetzt wurde. Die Raumbelastung wurde dabei nicht wesentlich beeinflusst. Erst im Januar 2015 zeigten diese Maßnahmen Erfolg, so dass sich das Verhältnis von Essig- zu Propionsäure bei der letzten Probe vom Januar 2015 mit 3:1 sehr günstig darstellte.

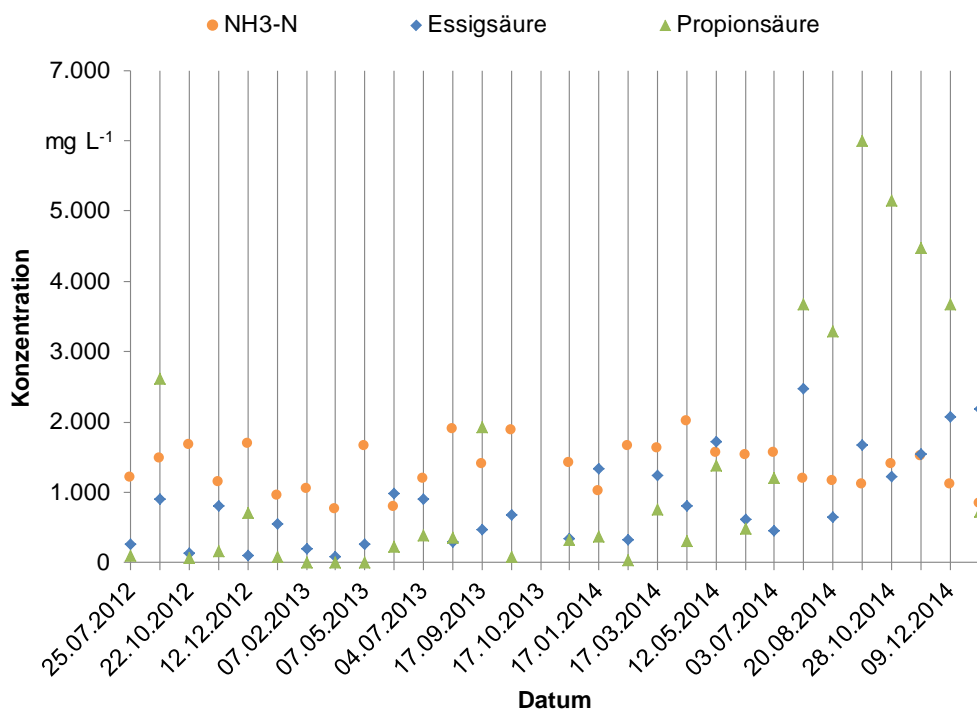


Abb. 33: Essig-, Propionsäure- und $\text{NH}_3\text{-N}$ -Gehalte in Stufe 1 von Pilotanlage 17

Generell befanden sich die Ammoniak-Gehalte im Nächgärer auf einem außerordentlich hohen Niveau und lagen stets über dem Warnwert von 600 mg L^{-1} (Abb. 34). Mit durchschnittlich rund 2.000 mg L^{-1} lagen die Werte höher als die des Fermenters (1.400 mg L^{-1}). Im Frühjahr und im Winter 2014 wurden die höchsten Werte gemessen. Dies wird auf höhere Gaben von Geflügelmist bzw. Grassilage in diesen Zeiträumen zurückgeführt (Abb. 31). Eine Anreicherung von Propionsäure wurde in der zweiten Jahreshälfte 2014 beobachtet, als die aus dem Fermenter eingetragene Propionsäure nicht mehr abgebaut werden konnte (Abb. 34). Eine Verbesserung der Verhältnisse trat wie in Gärstufe 1 erst zum Jahreswechsel 2014/2015 ein.

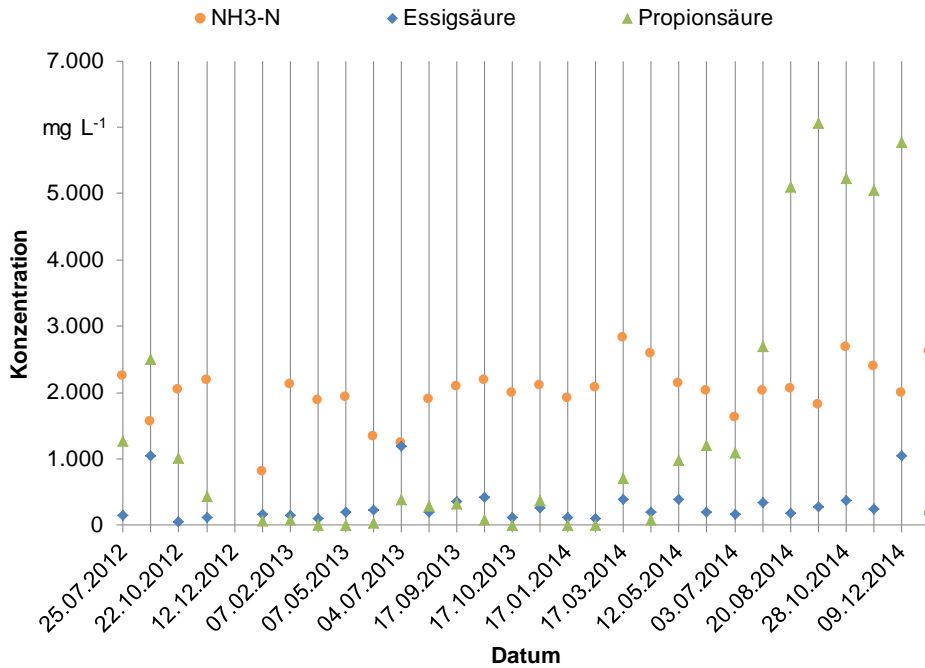


Abb. 34: Essig-, Propionsäure- und NH₃-N-Gehalte in Stufe 2 von Pilotanlage 17

Der Anstieg der Essigsäureäquivalente konnte gut durch den FOS/TAC-Wert abgebildet werden, wie Abb. 35 zeigt. Infolge des Anstiegs der Säuren stieg deren Verhältnis zur Pufferkapazität, die zwischen 20 und 25 g L⁻¹ schwankte. Ein sicheres Anzeichen für eine beginnende Destabilisierung des Gärprozesses im Fermenter war der Anstieg des FOS/TAC über 0,4. Das Normalniveau des FOS/TAC lag im Bereich von 0,2 bis 0,3. Jedoch trat auch auf diesem Niveau vorübergehend eine erhöhte Propionsäurekonzentration auf und zwar im September 2013 (vgl. Abb. 33 und Abb. 35).

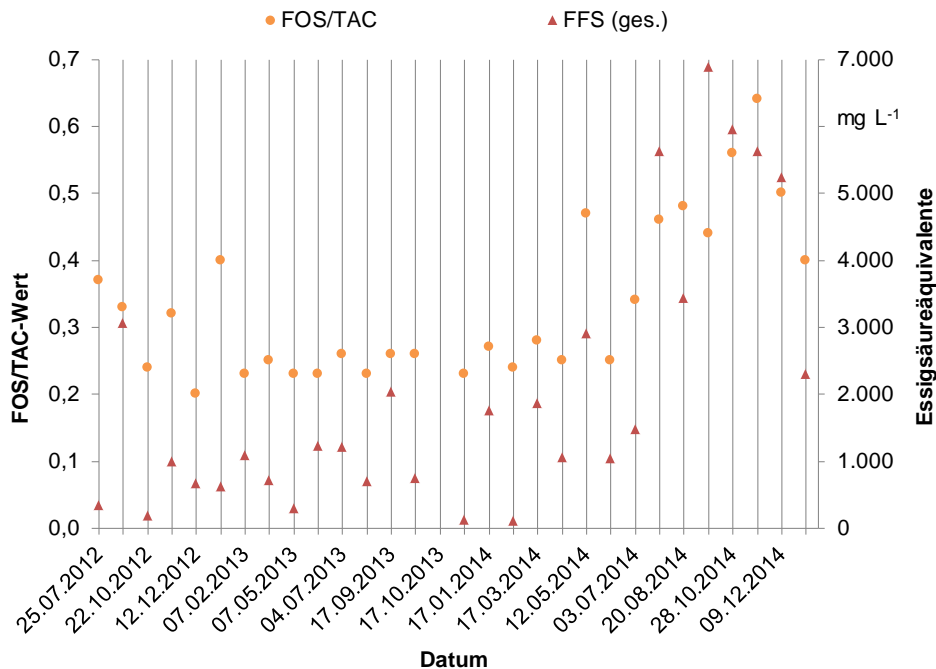


Abb. 35: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus Stufe 1 von Pilotanlage 17

Ähnlich verhielt sich der FOS/TAC in Proben aus dem Nachgärbehälter (Abb. 36). Allerdings lag das Normalniveau hier insgesamt etwas niedriger als im Fermenter und es deutete bereits ein Anstieg auf über 0,35 problematische Verhältnisse an.

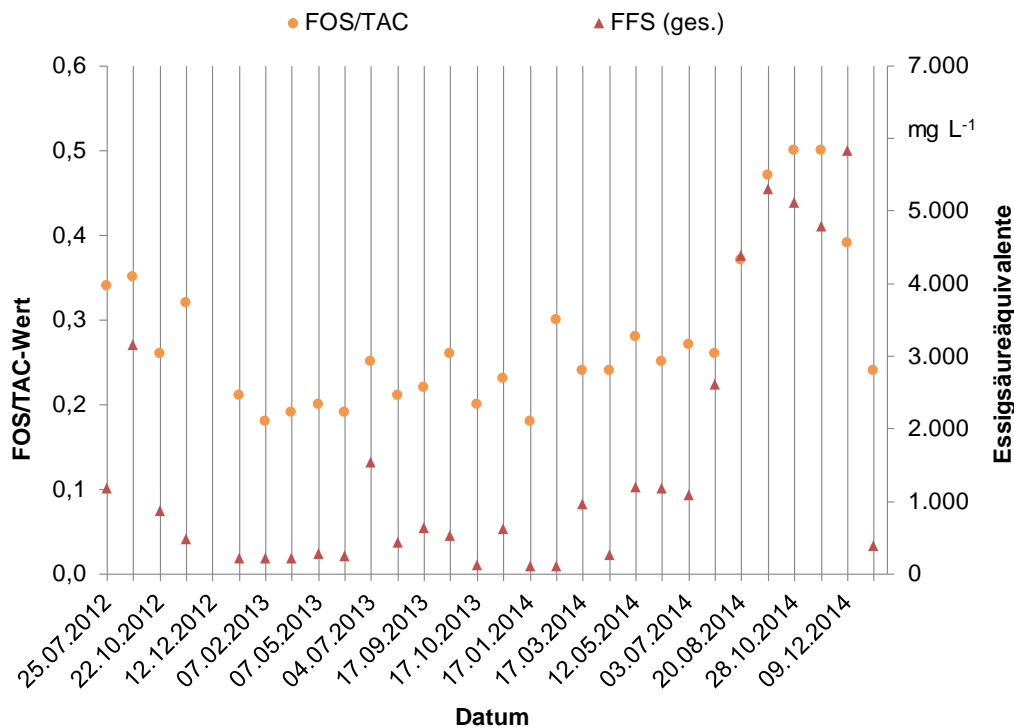


Abb. 36: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus Stufe 2 von Pilotanlage 17

Da die eingesetzten Substrate hohe Trockenmassegehalte aufwiesen und kein flüssiger Wirtschaftsdünger eingesetzt wurde, waren schwierige Bedingungen im Gärbehälter von Pilotanlage 17 im Vorfeld abzusehen. Dass die TS-Gehalte jedoch so immens hoch ausfielen, lag nicht nur an der Futtermischung, sondern auch an einer eingeschränkten Abbauleistung der Gärbiologie, wie die Darstellung des Verlaufs der TS-Gehalte in Gärgemischproben in Abb. 37 zeigt. Ab September 2013 lagen die TS-Gehalte stets über 17 %. In der Folge kam es zu einem verstärkten Pumpenverschleiß und einem Anstieg des Energiebedarfs für die Durchmischung der Gärbehälter.

In Abb. 38 sind die gemessenen Tagesmitteltemperaturen im Fermenter und im Nachgärer dargestellt. Über den gesamten Beobachtungszeitraum wurden im Mittel 44,8 bzw. 47,7 °C ermittelt, wobei ein Schwankungsbereich von 9 bzw. 11 °C zu verzeichnen war. Die hohe Variabilität bei der Temperierung wurde u. a. durch das Phänomen der Selbsterwärmung hervorgerufen, was in den Sommermonaten zu Temperaturspitzen im Hauptgärer (49 °C) und im Nachgärer führte (52 °C). Sicherlich trugen diese starken Differenzen in der Temperaturführung der Gärbehälter dazu bei, die ohnehin stark belastete Biozönose in ihrer Leistungsfähigkeit einzuschränken.

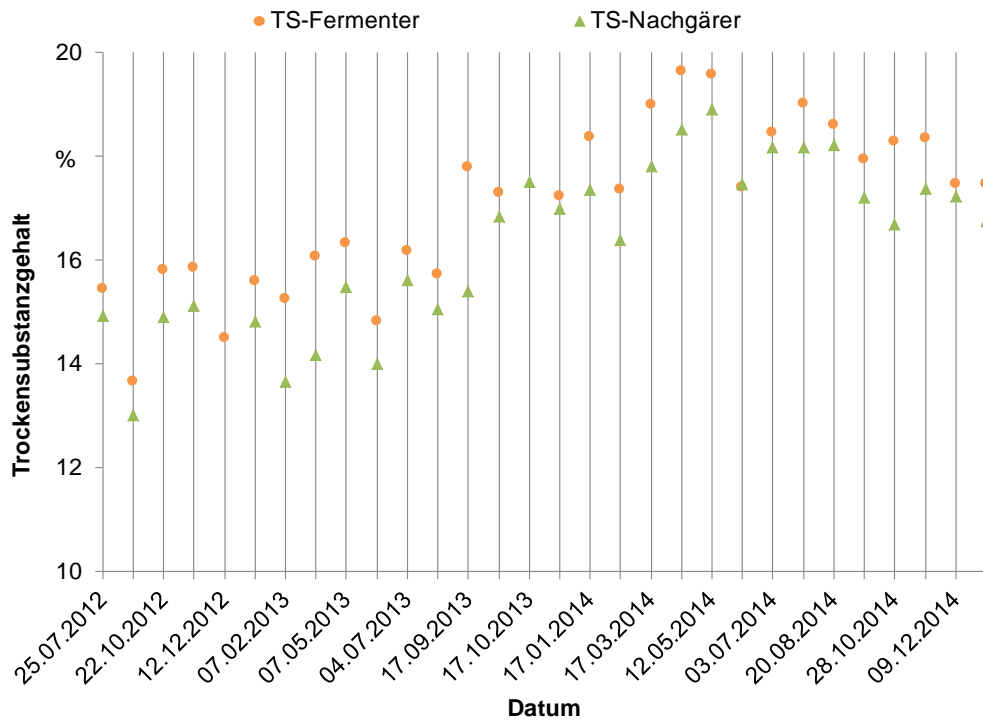


Abb. 37: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 17

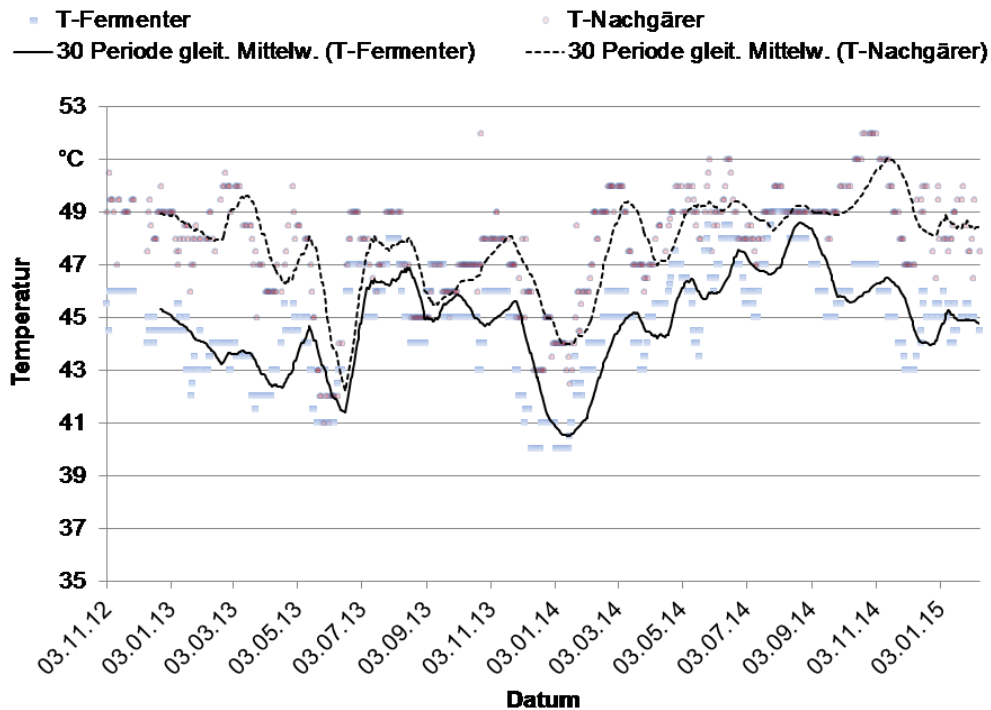


Abb. 38: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 17

4.1.1.3 Leistungsparameter

Die Destabilisierung der Gärbiologie im Fermenter hatte im Sommer 2013 eine eingeschränkte Gasproduktion zur Folge, wie am Leistungsverlauf der BHKW erkennbar ist (Abb. 39). Im Zeitraum von Anfang Mai bis Anfang September 2013 sank die Arbeitsausnutzung des Zündstrahlaggregats von 95 % auf 74 %. In dieser Zeit stand das Aggregat auch häufiger still. Die täglichen Betriebsstunden sanken von durchschnittlich 23,4 auf 21,3. Da der Leistungsabfall in der warmen Jahreszeit auftrat, hatten die Stillstandszeiten des Motors keine signifikanten Auswirkungen auf das Temperaturniveau in den Gärbehältern.

Die gärbiologischen Probleme im zweiten Halbjahr 2014 wirkten sich überraschender Weise praktisch nicht auf die Leistung der Maschinen aus. Im Gegenteil konnte die neue Maschine zur flexiblen Stromeinspeisung wie geplant in Betrieb genommen und die Gesamtleistung noch gesteigert werden. Im Vergleich zu einem halben Jahr davor wurde für den Zeitraum August 2014 bis Januar 2015 im Mittel ein Anstieg der Leistung von 63 % erreicht. Allerdings erforderte der Anlagenbetrieb unter diesen Bedingungen die erhöhte Aufmerksamkeit des Betreibers und vor allem ein behutsames Vorgehen bei der Fütterung. Außerdem musste die Frequenz der Analysen des Fermenterinhalt erhöht und als prozessstabilisierende Maßnahme ein Teil der Grassilage durch CCM bzw. Getreide ersetzt werden.

Das Zündstrahlaggregat konnte im Mittel 23,1 Stunden täglich betrieben werden. Nur im Sommer 2013 kam es aufgrund mangelnder Gasproduktion wiederholt zu Stillstandszeiten. Der im August 2014 in Betrieb genommene Gas-Otto-Motor zur flexiblen Stromproduktion konnte wie geplant an 7 Stunden pro Tag produzieren. Die mittlere elektrische Gesamtleistung der Anlage über den gesamten Beobachtungszeitraum betrug 266 kW.

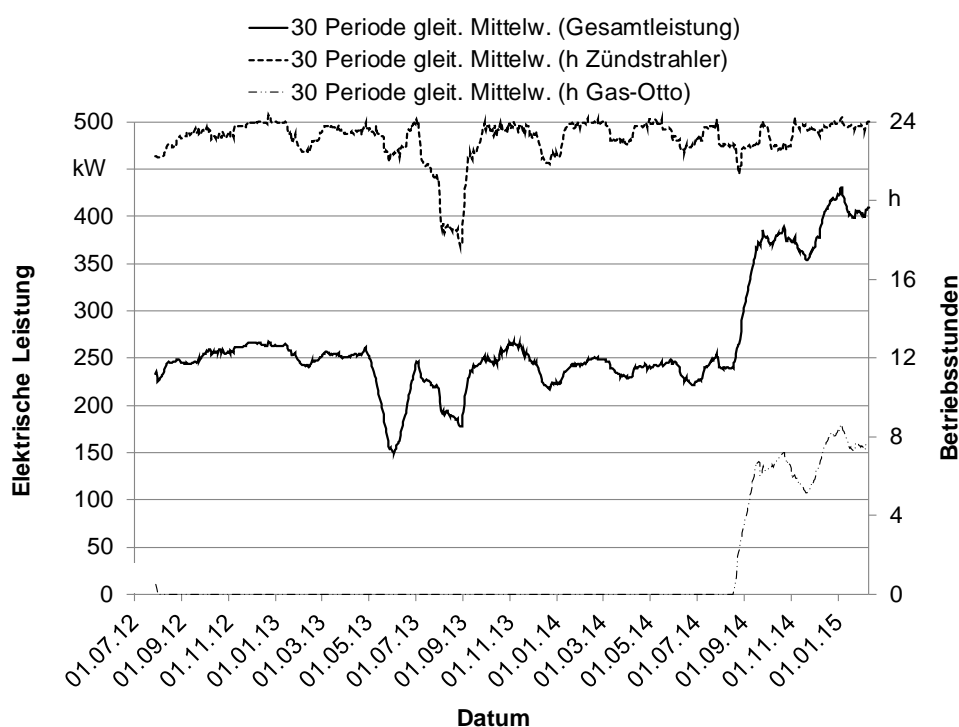


Abb. 39: Betriebsstunden der BHKW und tägliche Gesamtleistung von Pilotanlage 17 (gleitende Mittelwerte über 30 Tage)

Die Arbeitsausnutzung der BHKW auf Pilotbetrieb 17 war gekennzeichnet durch die oben beschriebenen Probleme und schwankte wiederholt deutlich (Abb. 39). Für das Zündstrahlaggregat betrug die mittlere elektrische Arbeitsausnutzung über den gesamten Beobachtungszeitraum 90,7 %. Unterstellt man dem Gasmotor eine Zielgröße von 7 h täglicher Laufzeit im Volllastbetrieb, so errechnet sich für dessen Betriebszeitraum eine mittlere elektrische Auslastung von 91 %. Angesichts der beschriebenen biologischen Verhältnisse ist dies ein überraschend positives Ergebnis.

Der Verlauf des elektrischen Nutzungsgrads der Zündstrahlmaschine mit integrierter Abgasturbine stellte sich relativ gleichmäßig dar (Abb. 40). Nur in den Phasen des Teillastbetriebs aufgrund mangelnden Brennstoffs kam es im Sommer 2013 zu einer Beeinträchtigung. Ende 2013 kam es zu einer Havarie des BHKW – nach Einschätzung des Betreibers aufgrund des vorausgegangenen längeren Volllastbetriebs. Daraufhin wurden in den Motor technisch modifizierte Kolben eingebaut und der Motor wurde vom Hersteller auf optimalen Wirkungsgrad eingestellt. Anschließend konnte ein elektrischer Wirkungsgrad von knapp über 45 % gemessen werden. Der mittlere elektrische Nutzungsgrad über den gesamten Beobachtungszeitraum betrug 41,5 %. Der Nutzungsgrad des im letzten halben Jahr des Untersuchungszeitraum zusätzlich betriebenen Gasmotors konnte in Ermangelung eines Gaszählers nicht bestimmt werden.

Der ebenfalls in Abb. 40 dargestellte Verlauf des Methangehaltes im Biogas spiegelt recht gut die an der Biogasanlage festgestellten biologischen Verhältnisse wider. Stets dann, wenn in den Garbehältern ungünstige Bedingungen vorlagen, sank der Methangehalt und bewegte sich um die 50 %-Marke. Entsprechend stieg er wieder an, wenn sich die Verhältnisse verbesserten. Über den gesamten Beobachtungszeitraum wurde ein durchschnittlicher Anteil von 53,9 % Methan im Biogas ermittelt.

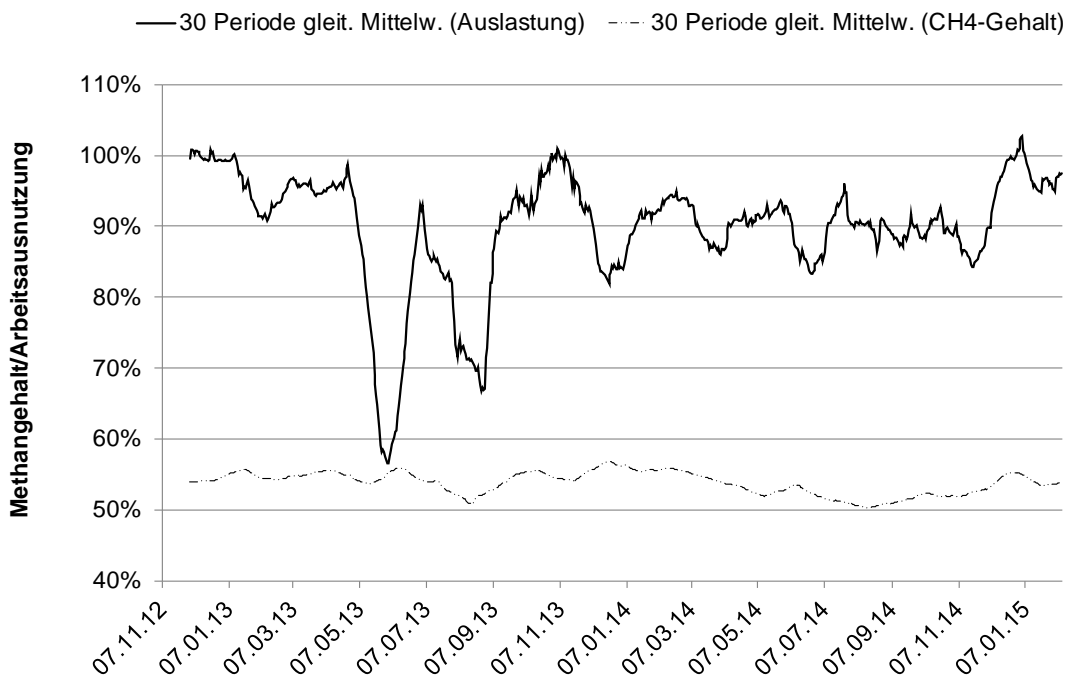


Abb. 40: Elektrische Arbeitsausnutzung und CH₄-Gehalt im Biogas von Pilotanlage 17

4.1.2 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #18

Obwohl die Einsatzstoffe in dieser Anlage technisch weniger herausfordernd waren als bei Pilotanlage 17, bestand auch hier die Gefahr einer Beeinträchtigung der Gärbiologie aufgrund des hohen Anteils von Klee gras in der Substratmischung. Tatsächlich wurden - z. T. auch über längere Zeiträume - die gängigen Richtwerte für einschlägige Prozessindikatoren überschritten (vgl. Tab. 8). Dennoch wies auch diese Anlage in Bezug auf die Stromproduktion ein gutes Ergebnis auf. Auch wurden keinerlei außergewöhnliche technische Störungen festgestellt.

4.1.2.1 Substratzugabe

Die Dokumentation der Substratzugabe umfasst einen Zeitraum von 947 Tagen. Durchschnittlich wurden der Biogasanlage täglich 18,3 t Frischmasse zugeführt. Die Futtermischung bestand zu über 60 % aus Klee grassilage und - zur Realisierung des Güllebonus - zu mehr als 30 % aus Rindergülle (Milchviehhaltung). Das Auswahlkriterium von mindestens 60 % Grasanteil an den pflanzlichen Einsatzstoffen wurde mit durchschnittlich 93 % deutlich übertroffen (Abb. 41). Andere Energiepflanzen spielten nur eine untergeordnete Rolle.

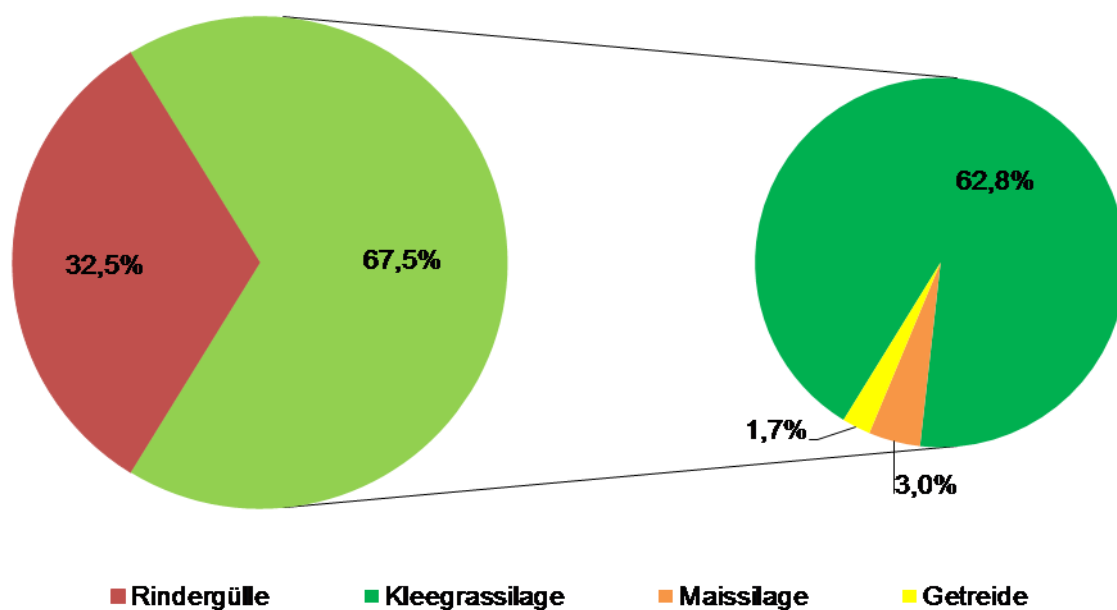


Abb. 41: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 18

Abb. 42 zeigt den dokumentierten Verlauf der täglich zugeführten Substratmischung für Pilotanlage 18. Die Zugabe an Frischmasse war relativ starken Schwankungen unterworfen, da zu Beginn der Untersuchung noch kein Vollastbetrieb vorlag und später, zur besseren Steuerbarkeit der Gasproduktion, geringere Mengen energiereicher Substrate eingesetzt wurden. Auch hier wurde versucht, im Anschluss an eine längere Periode mit Maiszugabe den fehlenden Mais durch höhere Gaben von Grassilage auszugleichen. Dies führ-

te zu einer sinkenden Gasproduktionsrate, woraufhin die Fütterung wieder reduziert wurde (siehe Abb. 42: Juni – September 2013).

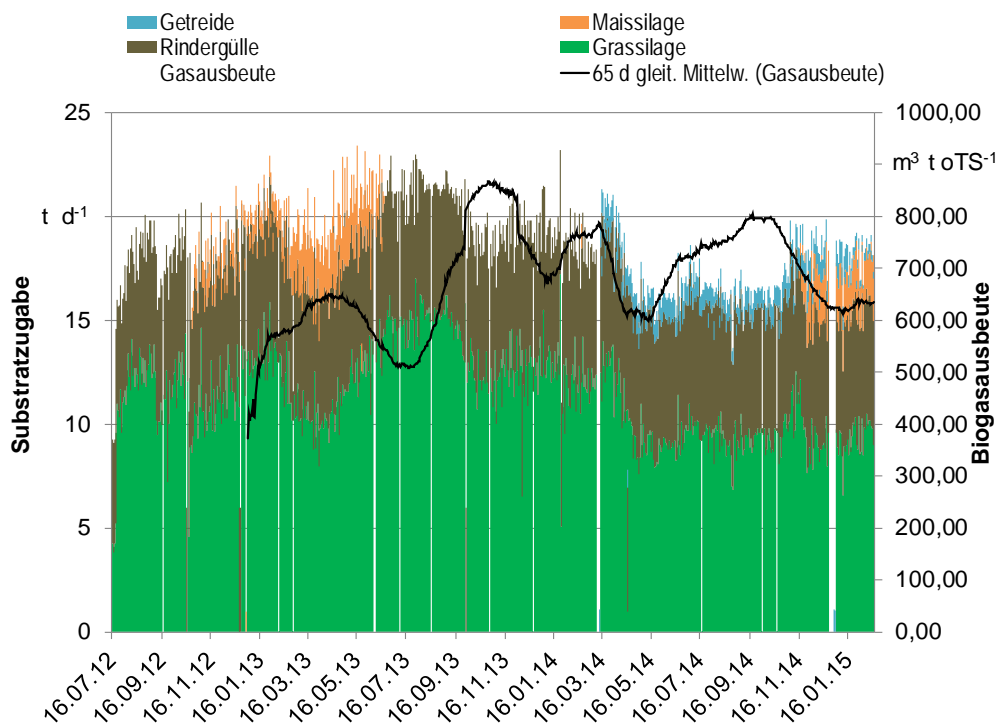


Abb. 42: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der organischen Trockensubstanz für Anlage 18

Als integrativer Parameter für die Abbauleistung der Gärstrecke wurde der gleitende Mittelwert der Biogasausbeute aus der zugeführten organischen Trockensubstanz auf Basis der hydraulischen Verweilzeit im Fermenter ausgewertet und in Abb. 42 eingetragen. Die Biogasausbeute kann erst ab 2013 dargestellt werden, da die davor ermittelten Gasmengen auf eine fehlerhafte Einstellung des Gaszählers basierten. Sie zeigte auch im gleitenden Mittel einen unruhigen, wellenförmigen Verlauf, der nicht einfach zu interpretieren ist.

Jeweils im Herbst 2013 und im Herbst 2014 erreichte die Biogasausbeute aus der oTM die höchsten Werte im Bereich von 800 bis 850 m³ t. Zu dieser Zeit des Jahres wird kein Gärrest ausgebracht, so dass das Gesamtgärvolumen ansteigt. Mit zunehmender Raumbelastung des Fermenters im Frühjahr/Frühsummer 2013 und Frühjahr 2014 sank die Biogasausbeute auf Werte von 500 bis 550 m³ t oTM⁻¹.

Bei Betrachtung der Raumbelastung (Abb. 43) des Fermenters von Pilotanlage 18 wird deutlich, dass im Zeitraum nach Abschluss der Maiszugabe (Mai 2013) ein geringerer Eintrag an organischer Masse vorlag, was sich auch negativ auf die Stromproduktion auswirkte (Abb. 49). Die zu diesem Zeitpunkt eingesetzte Grassilage wies einen sehr niedrigen oTM-Anteil auf. Es wurde festgestellt, dass sich die Futterqualität ebenso stark auf die Raumbelastung auswirkte wie die Schwankungen bei der Substratzugabe. Dies gilt vor allem für den langen Zeitraum in dem Grassilage als einzige Energiepflanze eingesetzt wurde. Anzumerken ist, dass die Prozesstemperatur im Fermenter lediglich im Bereich 41,5 bis 43,5 °C schwankte.

Im letzten Drittel des Beobachtungszeitraums wurde die Zugabe von Grassilage um 25 % reduziert. Dafür kamen zusätzlich Maissilage bzw. Getreide zum Einsatz. Daraufhin verlief die Raumbelastung gleichmäßiger, da die zusätzlich eingesetzten Substrate einen weitaus homogeneren TS-Gehalt aufwiesen als die Grassilage. Zum Einsatz der Maissilage hatten sich die Betreiber aufgrund des Wegfalls des Bonus für Landschaftspflege entschieden. Unter diesen Bedingungen konnte der sehr viel schwierigere Anlagenbetrieb unter ausschließlicher Verwendung von Grassilage und Gülle nicht länger gerechtfertigt werden (siehe Abb. 43). Die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelte oTM-Raumbelastung betrug $3,1 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$. Die hydraulische Verweilzeit im Gärraum betrug im Mittel 65 Tage. Das mit einem Gasspeicher ausgestattete Gärrestlager miteinbezogen, befand sich das zu vergärende Material durchschnittlich für 213 Tage im gasdichten System. Der Methangehalt im Biogas der Anlage 18 betrug durchschnittlich 53,1 % und zeigte einen Wertebereich von ca. 48 bis 57 % mit einer Standardabweichung von 1,2 %.

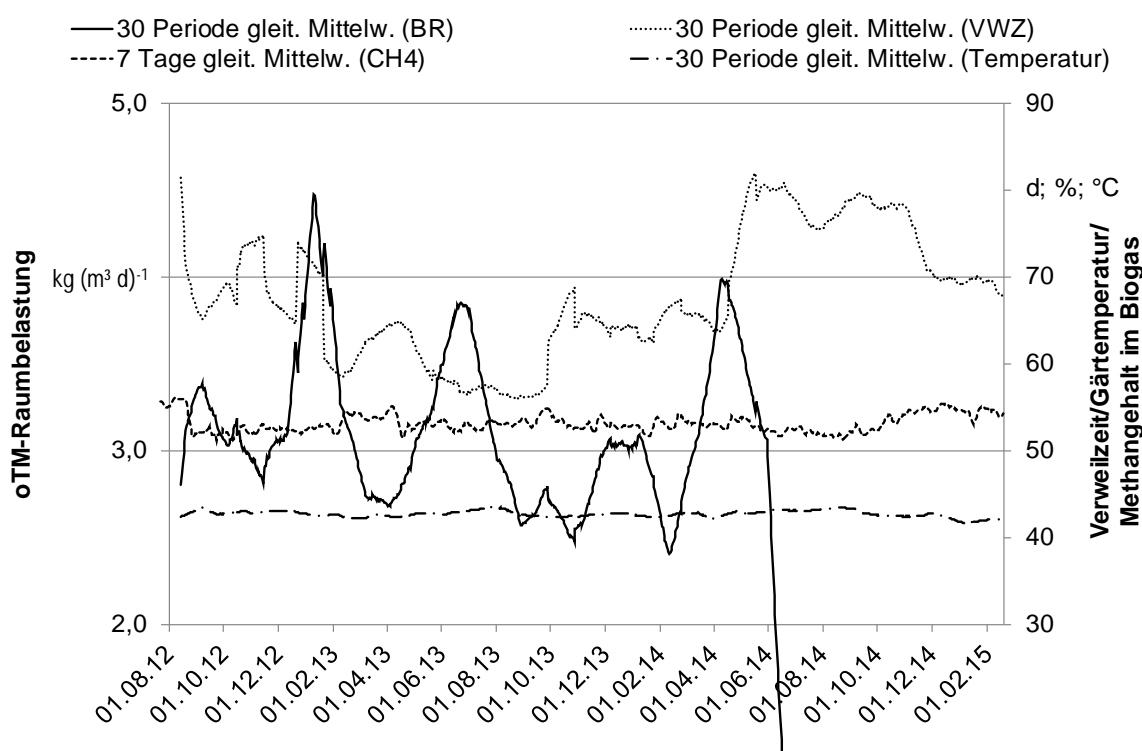


Abb. 43: Verlauf von Verweilzeit (VWZ), oTM-Raumbelastung (B_R) und Temperatur in der ersten Vergärungsstufe sowie des Methangehalts im Biogas von Pilotanlage 18

4.1.2.2 Prozessparameter

Bereits kurz nach Beginn der Untersuchung (Ende 2012) wurden hohe Säuregehalte in Proben aus dem Fermenter festgestellt. Das Problem trat auf, nachdem zusätzlich zur Grassilage Maissilage eingesetzt wurde, wodurch die oTM-Raumbelastung relativ rasch von 3 auf nahezu $4,5 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ angehoben wurde. Dadurch kam es offensichtlich zu einer Hemmung der Gärbiologie, was sich in einer Erhöhung des Propionsäuregehalts und des FOS/TAC in den Proben aus dem Fermenter ab Dezember 2012 zeigte (Abb. 44).

Erst als im Februar 2013 die Gesamtfuttermenge reduziert und der Maisanteil leicht erhöhte wurde, stabilisierte sich die Gärbiologie zunehmend. Der Propionsäuregehalt lag noch bis Mai 2013 über dem Warnwert, der FOS/TAC erreichte im Juni 2013 den Nor-

malbereich. Trotz einer erneuten, wenn auch vorsichtigen, Anhebung der Raumbelastung durch Maissilage wurde Propionsäure weiter abgebaut.

Der anschließende Einsatz nur von Gras und Gülle zeigte über einen Zeitraum von sechs Monaten keine negativen Auswirkungen. Erst im Januar 2014 begannen sich die gärbio-logischen Verhältnisse wieder zu verschlechtern. Die Aussagen des Betreibers, wonach die Beeinträchtigungen auf die Schwankungen der Qualität in der Grassilage zurückzuführen sind, werden durch die Daten zu den Ausgangsmaterialien nicht bestätigt. Ab Februar 2014 kam es zu einem kontinuierlichen Anstieg des Propionsäuregehaltes im Fermenter, der im November 2014 mit nahezu 8.000 mg L⁻¹ seinen Höhepunkt erreichte (Abb. 44).

Dieser drastische Anstieg könnte auf eine beginnende Prozesshemmung durch den steigenden Ammoniakgehalt im Gärgemisch zurückzuführen sein (Abb. 44). Erst im November 2014 begann dieser langsam wieder zu sinken, was mit einem deutlichen Abbau der Propionsäure einherging. In der letzten Probe vom Februar 2015 lagen die Werte der Prozessindikatoren wieder im unbedenklichen Bereich.

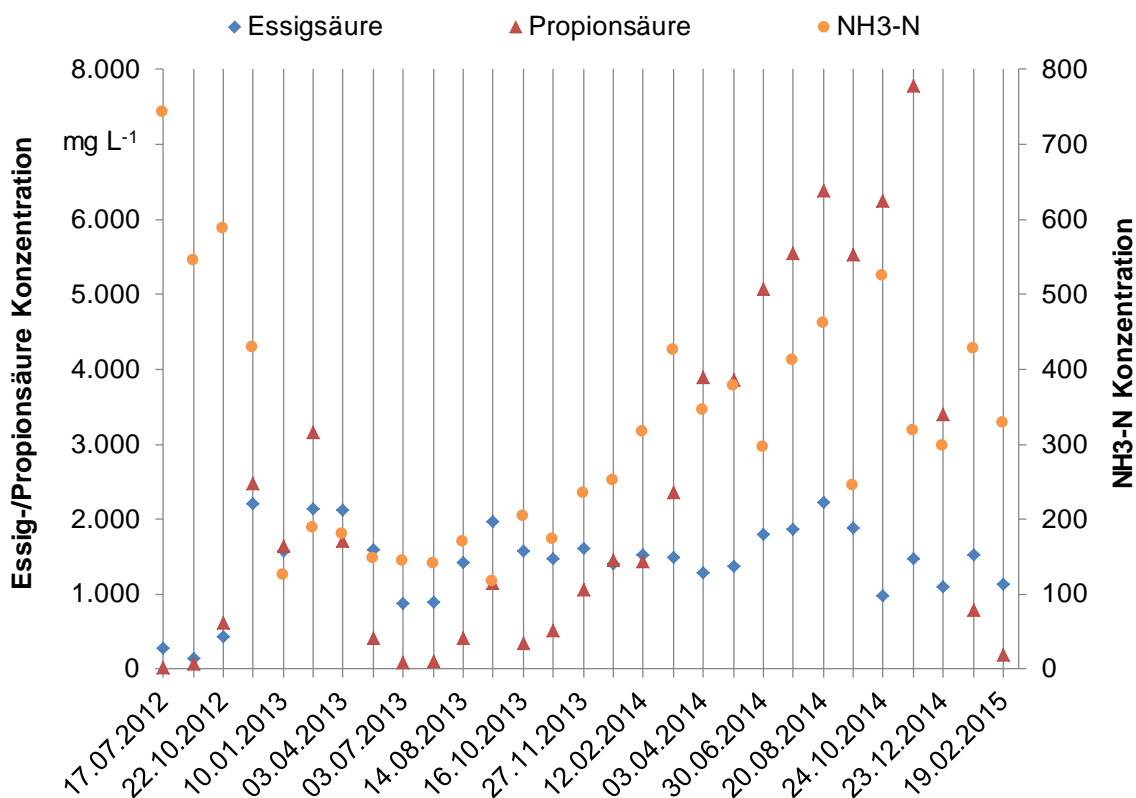


Abb. 44: Essigsäure-, Propionsäure- und Ammoniak-N-Gehalte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 18

Im Mittel wurden in den Proben aus dem Fermenter 1.400 mg L⁻¹ Essigsäure und 2.300 mg L⁻¹ Propionsäure gemessen (n = 29). Der letztere Wert ist auffallend hoch. Wie oben bereits diskutiert scheint im Fermenter eine positive Korrelation zwischen dem NH₃-N- und dem Propionsäuregehalt erkennbar zu sein (Abb. 44). Lag der NH₃-N-Gehalt über ca. 200 mg L⁻¹, so war ein deutlicher Anstieg der Propionsäurekonzentration über den Warnwert von 1.000 mg L⁻¹ erkennbar. Hieraus nicht erklärbar sind die Analysenwerte zu Beginn und am Ende der Beobachtungsperiode, als jeweils trotz hoher NH₃-Konzentrationen die kurzkettigen Fettsäuren auf niedrigem Niveau waren.

In Proben aus dem abgedeckten (unbeheizten) Gärrestlager wurden $\text{NH}_3\text{-N}$ Gehalte zwischen 200 und 1.300 mg L^{-1} gemessen, während der mittlere Gehalt an Essig- bzw. Propionsäure in Proben aus diesem Behälter bei ca. 200 mg L^{-1} bzw. 50 mg L^{-1} lag. Dies deutet auf den bei niedriger Raumbelastung und Temperatur nur noch sehr langsam verlaufenden Gärprozess in diesem Behälter hin. Eine im Vorfeld vermutete Beeinträchtigung der Gärbiologie durch den vorgeschalteten Kocher, in welchem das Fermentermaterial vor dem Eintritt in das Gärrestlager für eine Stunde auf $80 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt wurde, konnte nicht nachgewiesen werden (siehe Abb. 45).

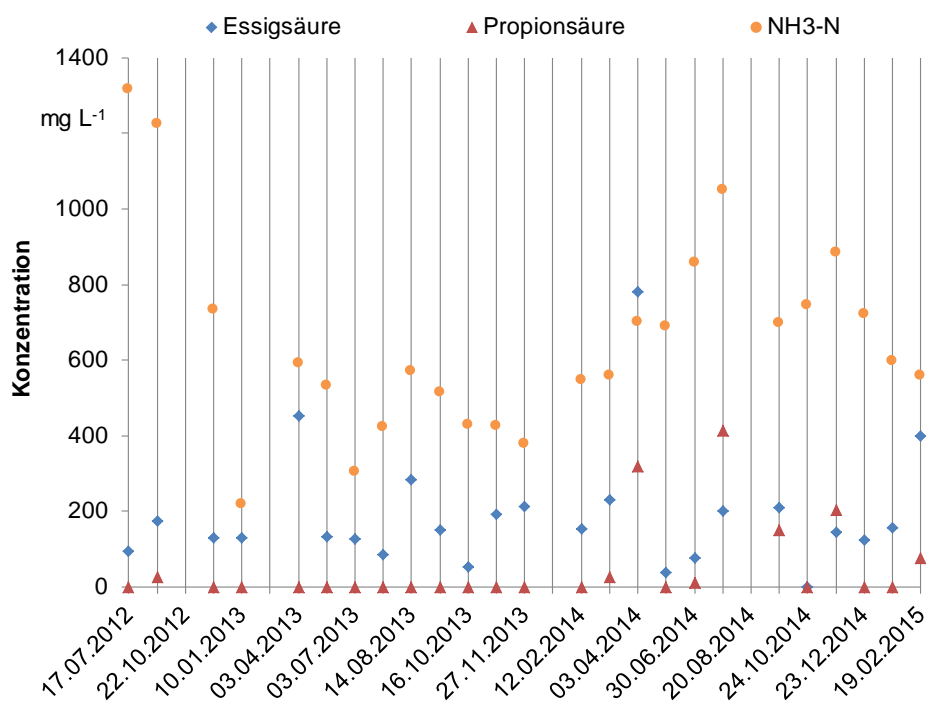


Abb. 45: Essigsäure-, Propionsäure- und $\text{NH}_3\text{-N}$ -Gehalte in Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage 18

Abb. 46 zeigt die Konzentrationen an Essigsäureäquivalenten sowie die FOS/TAC-Werte der einzelnen Fermenterproben. Über den gesamten Zeitraum zeigt sich eine positive Korrelation zwischen diesen beiden Parametern. Ein Anstieg der Gesamtsäuren bewirkte gleichzeitig einen Anstieg des FOS/TAC, der jedoch keine Information darüber geben konnte, wie hoch der Anteil Propionsäure war. Im vorliegenden Fall lag bereits ein bedenklicher Propionsäureanteil vor, wenn der Gehalt an Essigsäureäquivalenten die 3.000 mg L^{-1} Marke überschritt. Dies war in der Regel dann gegeben, wenn der FOS/TAC bei 0,4 oder höher lag. Aus den Auswertungen geht nicht hervor, warum bei den niedrigen Säuregehalten der Proben vom Juni 2013 und Januar 2015 ein FOS/TAC über 0,4 gemessen wurde. Generell empfiehlt sich für den Betreiber eine Analyse des Säurespektrums bei einem FOS/TAC von 0,4 oder mehr, da in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle dann eine problematische Situation für die Fermenterbiologie vorlag.

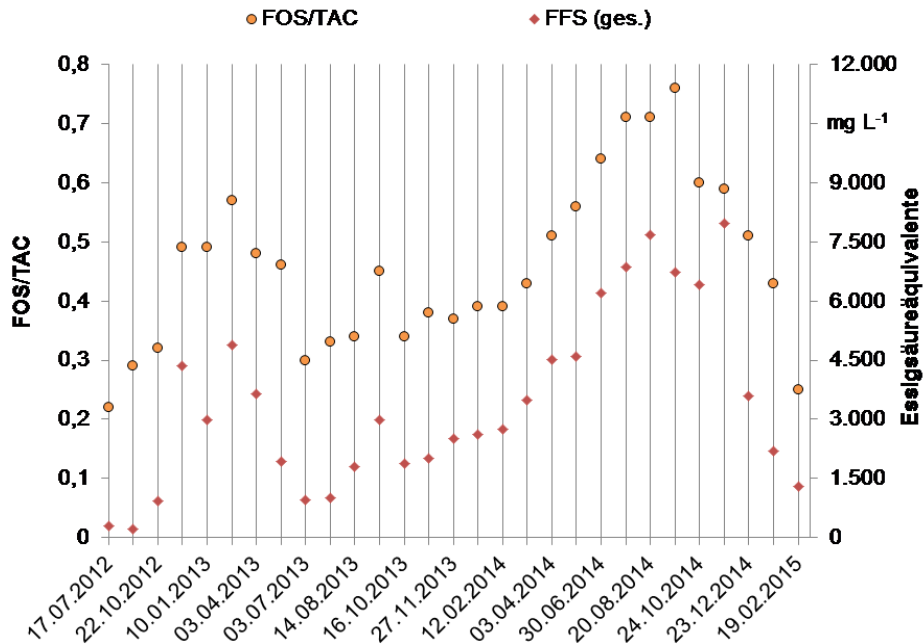


Abb. 46: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Stufe 1 von Pilotanlage 18

Trotz des relativ großen Anteils an Gülle im Substratmix lag der Trockensubstanzgehalt im Fermenter bei einem Mittelwert von 10,9 % auf hohem Niveau und zeigte vor allem im ersten halben Jahr der Beobachtungsperiode starke Schwankungen (siehe Abb. 47). In den Perioden mit Maiseinsatz (Frühjahr 2013/Winter 2015) zeigte der TS-Gehalt eine fallende Tendenz. Probleme durch die hohe Beanspruchung der Rühr- oder Pumpentechnik wurden nicht festgestellt, obgleich sich das relativ geringe Temperaturniveau im Fermenter zusätzlich negativ auf die Viskosität des Materials auswirkt. Auch im Gärrestlager wurden vergleichsweise hohe TS-Gehalte gemessen, der Durchschnittswert betrug 8,9 %. Auch hier wurden keine technischen Probleme festgestellt.

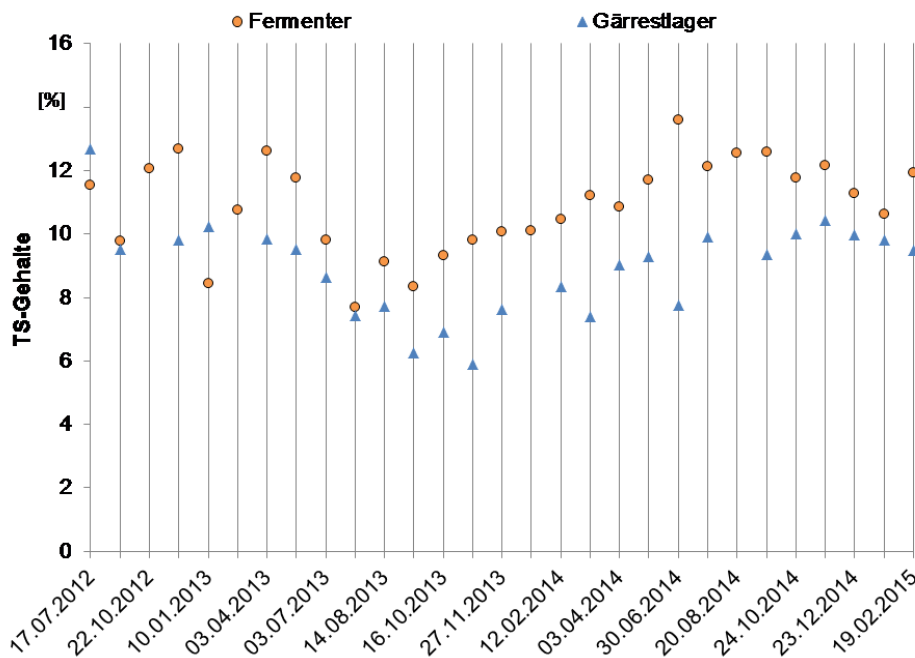


Abb. 47: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Gärrestlager von Pilotanlage 18

4.1.2.3 Leistungsparameter

Die Verfügbarkeit des BHKW war mit einem Gesamtmittelwert von 23,9 Betriebsstunden pro Tag außerordentlich hoch. Die Maschine stand nur dann still, wenn ein Ölwechsel durchgeführt oder der Aktivkohlefilter zur Gasreinigung neu beladen werden mussten. Daneben waren kleinere Störungen in der Gasregelstrecke zu beheben, die jedoch keinen größeren Zeitaufwand erforderten.

Die elektrische Leistung des BHKW betrug im Mittel 223 kW – entsprechend einer Arbeitsausnutzung von 89,6 % – und wies vor allem in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums beträchtliche Schwankungen auf (Abb. 48). Die unmittelbar nach Beginn der Datenaufnahme reduzierte Leistung war auf Gasmangel zurückzuführen. Im Herbst 2012 wurde das BHKW erstmals voll ausgelastet, nachdem die Fütterung gesteigert und zusätzlich Mais eingesetzt wurde. Im Januar 2013 wurde die Futtermenge wieder reduziert und entsprechend nahm die Leistung in dieser Periode ab. Ein Tiefpunkt der BHKW-Leistung wurde im Juni 2013 durchlaufen, nachdem die Maiszugabe beendet und wieder ausschließlich Gras und Gülle eingetragen wurden. In diesem Zeitraum könnte neben der Futtermstellung auch die Qualität des Ausgangsmaterials eine Ursache für die Leistungseinbuße gewesen sein, da gleichzeitig eine Abnahme der Biogasausbeute beobachtet wurde (Abb. 42), während die chemischen Prozessindikatoren keine Symptome einer Hemmung anzeigten (Abb. 44).

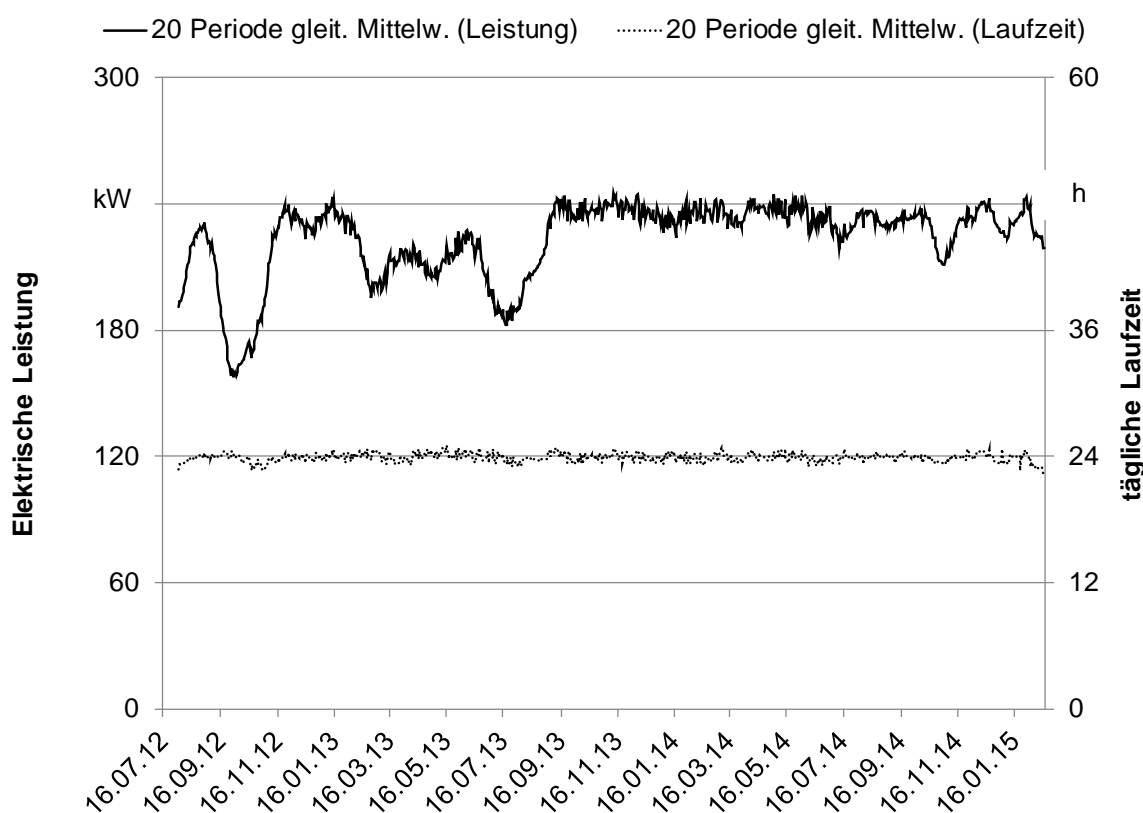


Abb. 48: Tägliche Betriebsstunden und elektrische Gesamtleistung des BHKW von Pilotanlage 18

Ab September 2013 wurde der Frischmasseeintrag leicht reduziert, die Biogasausbeute stieg stetig an und es konnte über sechs Monate hinweg ein hohes Leistungsniveau aufrechterhalten werden. Ab Juni 2014 wirkte sich die aufkommende Hemmung der Gärbiologie auf die BHKW-Auslastung aus, so dass im letzten halben Jahr der Beobachtungspe-

riode die mittlere elektrische Leistung um 7 kW unter dem Wert des ersten Halbjahres 2014 lag (Abb. 48).

Für Anlage 18 betrug die mittlere Biogasrate (bei Standardbedingungen) über die gesamte Beobachtungsperiode 2.350 m³ Biogas pro Tag. Aus diesem Biogas sowie 70 Liter Zündöl täglich wurden im Tagesmittel 5.350 kWh elektrische Energie bereitgestellt. Der berechnete elektrische Nutzungsgrad konnte erst mit Beginn des Jahres 2013 verlässlich bestimmt werden, da die davor dokumentierten Gasmengen auf einer fehlerhaften Einstellung des Gaszählers basierten. Er betrug im Mittel 40,2 % und schwankte in Abhängigkeit von der Motorauslastung (Abb. 49)

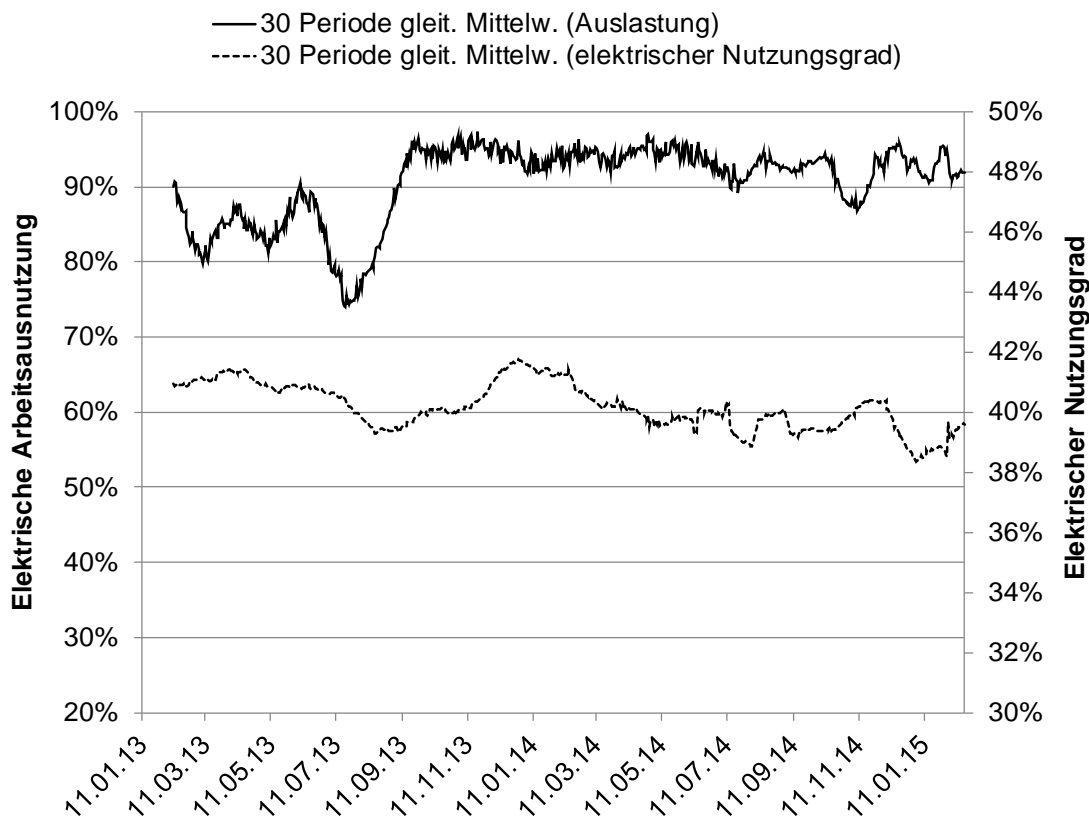


Abb. 49: Verlauf der elektrischen Arbeitsausnutzung und des elektrischen Nutzungsgrads für Pilotanlage 18

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums hatte der Motor ca. 15.000 Betriebsstunden absolviert, zum Ende waren es knapp 38.000. Nach Aschmann & Effenberger (2012) könnte über diesen Zeitraum von 23.000 Betriebsstunden verschleißbedingt mit einer Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades des Motors um etwa drei Prozentpunkte gerechnet werden. Im vorliegenden Fall betrug diese Abnahme nur 1,5 Prozentpunkte.

4.1.3 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #19

An dieser Anlage wurde bereits im Vorfeld mit einem problemlosen Betrieb und einer gleichmäßigen Gas- und Stromproduktion gerechnet, da zum einen aufgrund von mangelnder eigener Grünlandfläche insbesondere im Winter die Fütterung auf zugekauften Mais umgestellt werden musste, zum anderen mit einer spezifischen Leistung von $0,08 \text{ kW m}^{-3}$ Fermentervolumen ein außerordentlich großer Gärraum zur Verfügung steht. Es traten dann auch über den gesamten Beobachtungszeitraum von 913 Tagen weder prozessbiologische, noch technische Probleme auf. Dennoch war die Aufnahme in das Messprogramm sinnvoll, da nicht zuletzt durch den Vergleich mit den anderen Betrieben die Auswirkungen der periodisch eingesetzten Maissilage auf die Prozessstabilität einer zuvor ausschließlich mit Gras und Gülle beschickten Anlage beurteilt werden konnten. Es folgt eine detaillierte Beschreibung des Anlagenbetriebs.

4.1.3.1 Substratzugabe

Durchschnittlich wurden der Biogasanlage täglich 13,3 t Frischmasse zugeführt. Die Futtermischung bestand zu 26 % aus Gras-, zu 15 % aus Maissilage und zu 59 % aus Rindergülle der Milchviehhaltung (Güllebonus). Letztere bestand zur Hälfte aus angeliefertem Material aus der Nachbarschaft. Mindestwert von 60 % Grasanteil an den pflanzlichen Einsatzstoffen wurde mit 63 % nur knapp übertroffen. Andere Energiepflanzen wurden nicht eingesetzt (siehe Abb. 50).

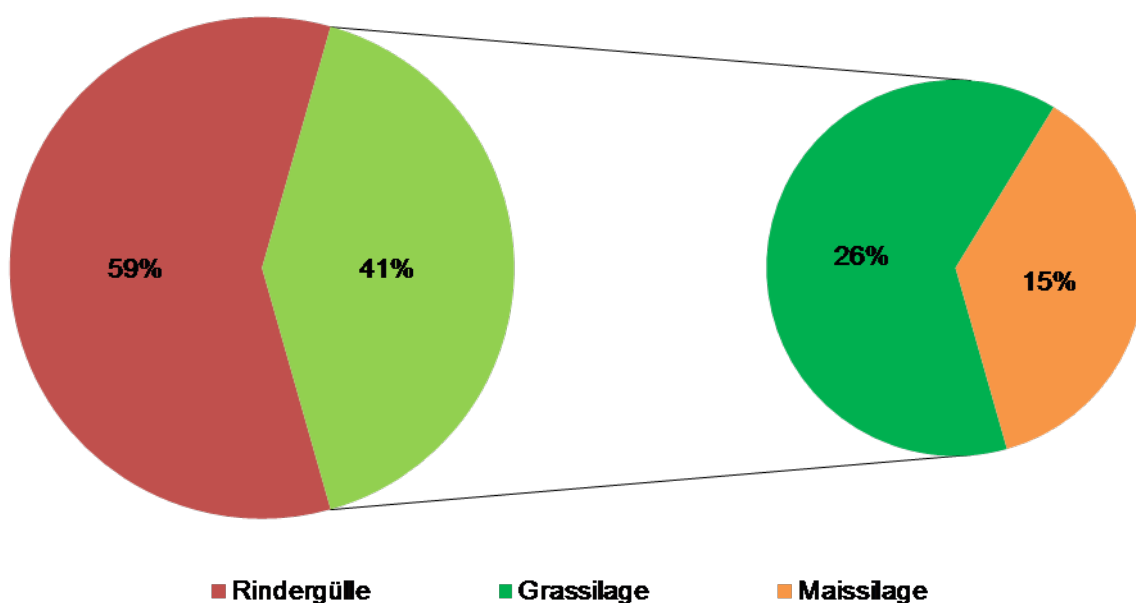


Abb. 50: Mittlere Substratzugabe für Pilotanlage 19

Anders als bei den zuvor besprochenen Biobetrieben wurden hier keine Probleme durch einen zu hohen Stickstoffeintrag erwartet, da vergleichsweise hohe Gülle- und Maisanteile vorlagen und zudem die Grassilage aus Grünlandbeständen stammte, die geringere N-Gehalte aufweist als Klee gras. Ein Umstand der zur Aufnahme ins Messprogramm führte war die geplante Anschaffung einer Zerkleinerungseinheit für das eingesetzte Gras um fortan auf das Häckseln bei der Ernte verzichten zu können. Der probeweise Betrieb eines Leihgeräts brachte statt eines kalkulierten Durchsatzes von stündlich fünf nur 0,9 t. Bei einer elektrischen Anschlussleistung von 35 kW würde das einen Mehrverbrauch an Strom

von täglich bis zu 200 kWh bedeuten. Aus diesem Grund wurde die Zerkleinerungseinheit wieder außer Betrieb genommen.

Abb. 51 zeigt den dokumentierten Verlauf der täglich zugeführten Substratmischung und den gleitenden Mittelwert der Biogasausbeute aus der organischen Trockensubstanz für Pilotanlage 19. Die Zugabe an Frischmasse wurde zur Steigerung der elektrischen Arbeitsausnutzung gegen Ende der Untersuchung leicht angehoben. Die Zugabe von Maissilage begann im ersten Jahr der Messkampagne im Dezember, in den beiden Folgejahren jeweils im Herbst. Die Einsatzmenge und Dauer der Maisfütterung richteten sich nach der Verfügbarkeit von Grassilage und standen somit unmittelbar in Verbindung mit den Gegebenheiten der vorangegangenen Vegetationsperiode. Im Winter 2013 wurden ca. 60 t weniger Mais verarbeitet als im von Mindererträgen geprägten Folgejahr. Die Ernteeinbußen wurden durch eine Mäuseplage in Verbindung mit lang anhaltenden Feuchteperioden verursacht. Unabhängig von der Art der eingesetzten Energiepflanzen schwankte die täglich eingetragene Tonnage relativ wenig.

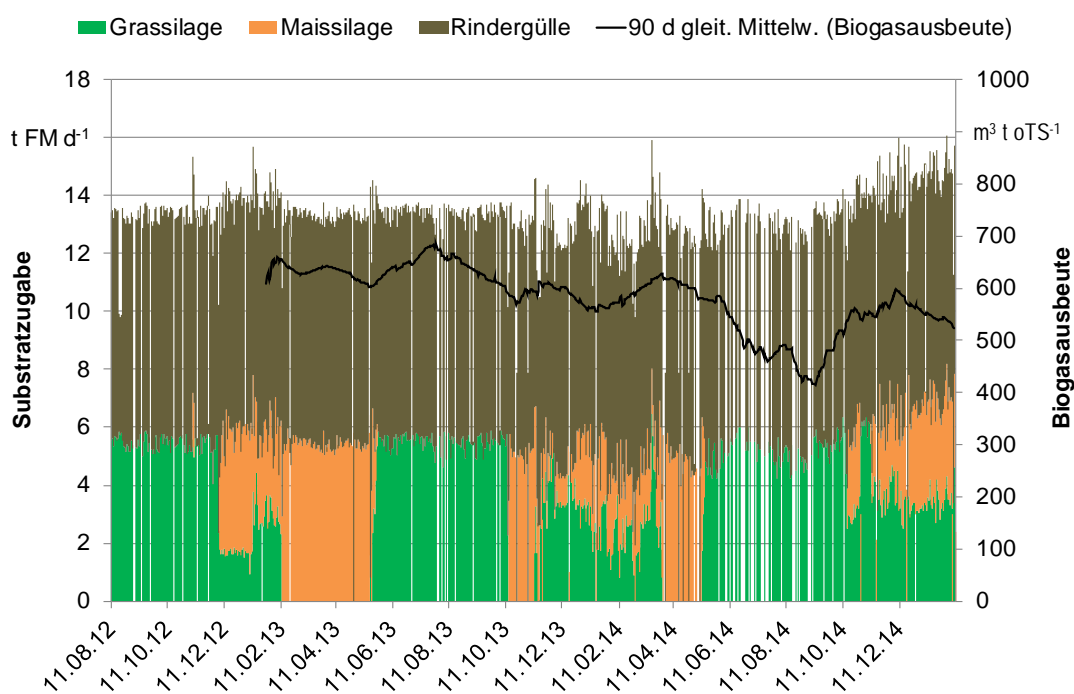


Abb. 51: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute bei Pilotanlage 19

Dass die Maissilage ein höheres Energiepotential aufwies als das Gras, wird bei Betrachtung der Raumbelastung deutlich, die in Abb. 52 dargestellt ist. Jeweils in den Wintermonaten stieg diese leicht an, wobei sie mit einem mittleren Wert von $1,8 \text{ kg oTM (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ insgesamt auf einem niedrigen Niveau verlief. Entsprechend hoch fiel die Verweilzeit aus. Durchschnittlich befand sich das zu vergärende Material für 90 Tage in der ersten Vergärungsstufe. Im Gesamtsystem, bei dem das 1.200 m^3 große und gasdicht abgedeckte Gärrestlager mit einzubeziehen ist, errechnete sich sogar eine Verweilzeit von mehr als 220 Tagen. Ebenfalls in Abb. 52 dargestellt ist der Methangehalt, der durchschnittlich 50,5% betrug und gegen Ende der Untersuchung bei steigender Belastung leicht abfiel.

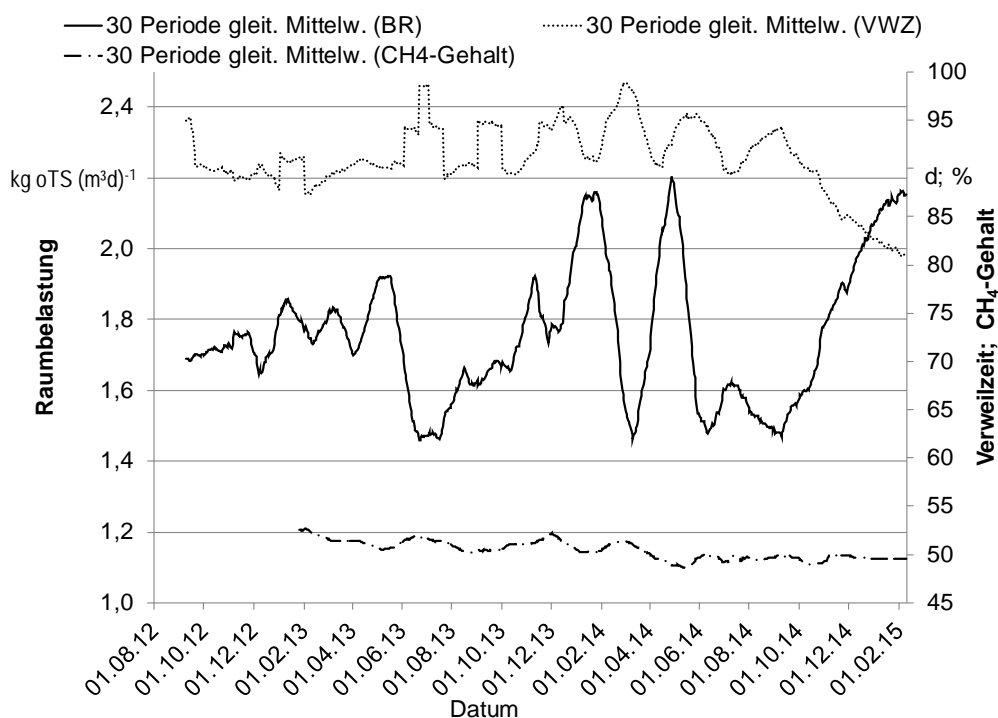


Abb. 52: Verlauf von Verweilzeit (VWZ) und Raumbelastung (B_R) in der ersten Vergärungsstufe und CH_4 Gehalt des Biogases von Pilotanlage 19

4.1.3.2 Prozessparameter

In Abb. 53 wird deutlich, dass zu keinem Zeitpunkt ungünstige Konzentrationen oder Konstellationen von Essig- oder Propionsäure nachgewiesen wurden. Durchschnittlich betrug die ermittelte Essigsäurekonzentration 340 mg L^{-1} , wobei eine Konzentration von 800 mg L^{-1} nie überschritten wurde. Die Propionsäure-Konzentration in Proben aus dem Hauptgärbehälter lag mit durchschnittlich 44 mg L^{-1} um den Faktor acht deutlich darunter. Die Werte, die im Nachgärer ermittelt wurden lagen auf einem noch niedrigeren Niveau, bemerkenswerterweise auch für die ammoniakalische Stickstoffkonzentration. Auf eine graphische Darstellung der Konzentrationen in der zweiten Vergärungsstufe wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass hier außerordentlich günstige Voraussetzungen für die am Abbau beteiligten Bakterien vorlagen. Vom Beginn der Beobachtungsperiode bis Oktober 2013 wurde sogar eine leichte „Unterforderung“ der Anlage festgestellt, denn hier betrug der mittlere Gehalt an Essigsäure nur 100 mg L^{-1} . Der Gehalt an Ammoniumstickstoff betrug in der ersten Vergärungsstufe durchschnittlich 1.900 mg L^{-1} und blieb mit einem gemessenen Maximum von knapp 2.400 mg L^{-1} immer unterhalb des angegebenen Richtwerts von 3.000 mg L^{-1} . Aufgrund der hohen Fermentertemperaturen bewegten sich die Ammoniakwerte dennoch in einem Bereich, in dem bei Anlage 18 bereits Schwierigkeiten auftraten. Vermutlich aufgrund der weitaus geringeren Belastung des Gesamtsystems blieben solche Schwierigkeiten in diesem Fall aus.

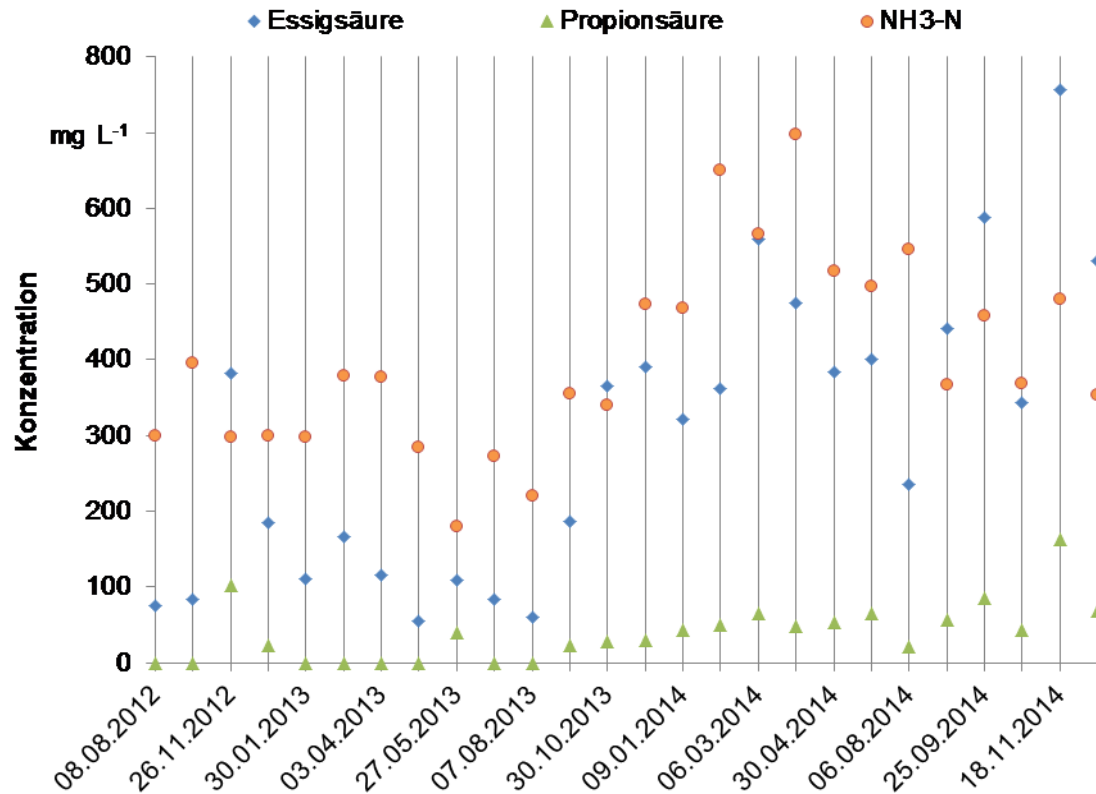


Abb. 53: Essigsäure-, Propionsäure- und Ammoniak- Gehalte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 19

Anhand des FOS/TAC, der im Mittel bei 0,24 lag, kann für diese Anlage keine Aussage bezüglich der Prozessbedingungen getroffen werden, denn auch relativ hohe Werte gingen einher mit niedrigen Fettsäurekonzentrationen (Abb. 54: Dez. 12, Jan. 13). Der Gehalt der gesamten flüchtigen Fettsäuren (Essigsäure-Äquivalente) in der ersten Vergärungsstufe überschritt die 1.000 mg L⁻¹ Marke zu keinem Zeitpunkt. Der ermittelte mittlere Gehalt von 270 mg L⁻¹ verdeutlicht das sehr niedrige Niveau auf dem sich dieser Prozessparameter bewegte (Abb. 54). Die Trockensubstanzgehalte in den beiden Vergärungsstufen unterschieden sich z. T. deutlich voneinander. Im Schnitt lagen die des Fermenters um ein Drittel höher. Stufe 1 wies im Sommer 2013 erhöhte TS-Gehalte auf, als ausschließlich Grassilage und Gülle eingesetzt wurde. Im Folgejahr wiederholte sich dies trotz gleicher Bedingungen nicht, was auf die Qualitätsunterschiede des eingesetzten Grünlandaufwuchses zurückzuführen sein dürfte. Die zweite Periode mit höheren TS-Gehalten gegen Ende der Untersuchung wurde durch die Steigerung der Futtermengen ab Oktober 2014 verursacht. Im Mittel betrug der Trockensubstanzgehalt in der ersten Stufe 7,0 %, in der zweiten Stufe 4,7 % (siehe Abb. 55).

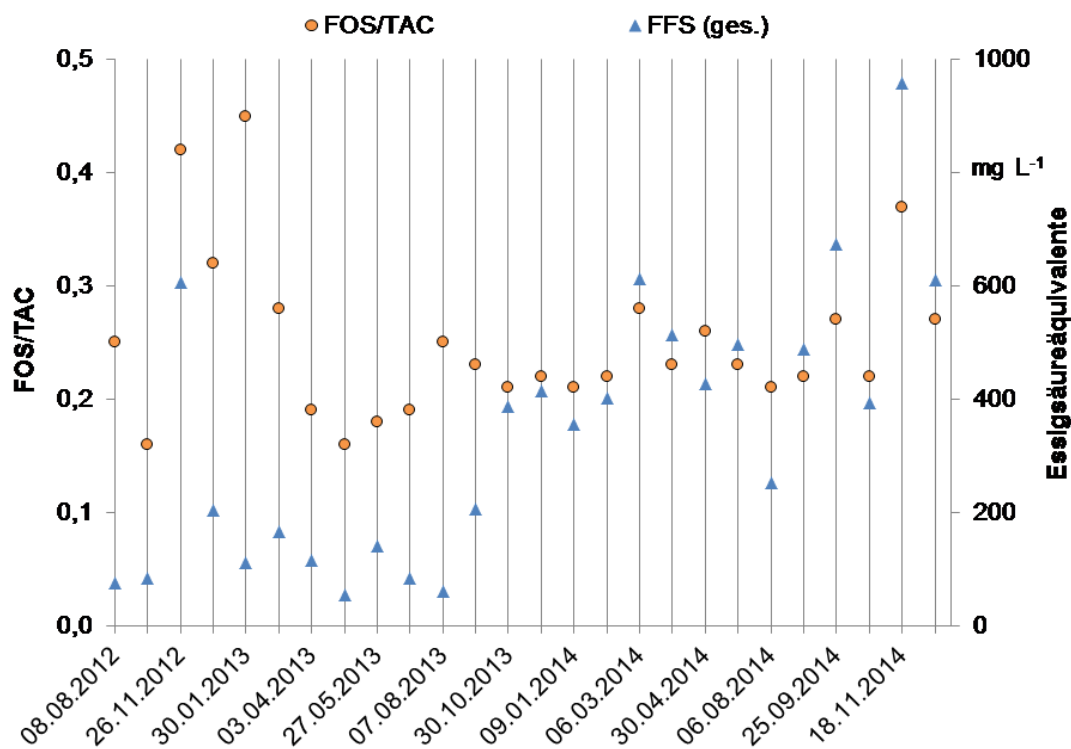


Abb. 54: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 19

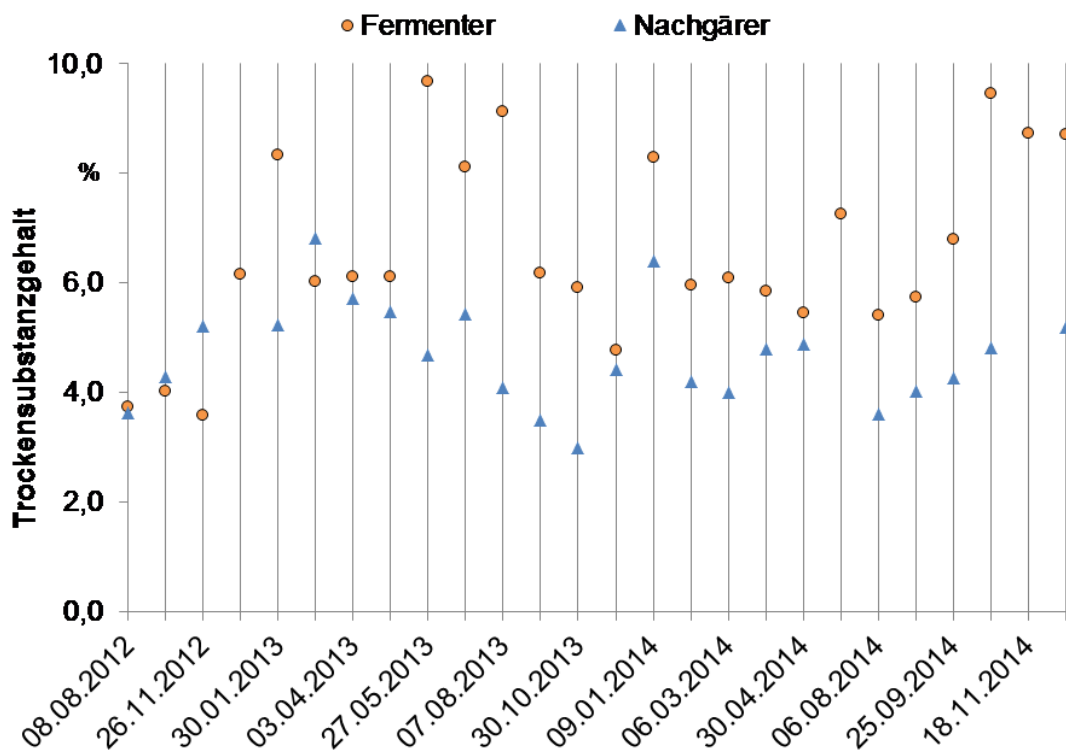


Abb. 55: TS-Gehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 19

Die in Abb. 56 dargestellten Temperaturverläufe für die erste und zweite Vergärungsstufe zeigen, dass der Prozess deutlichen Temperaturschwankungen unterworfen war. Im Fermenter waren diese in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums stärker ausgeprägt, wobei zuweilen Unterschiede von 6 °C innerhalb von nur zwei Tagen festgestellt wurden. Im thermophilen Bereich können solche Schwankungen die Biologie erheblich beeinträchtigen, was im Fall von Pilotanlage 19 nicht eintrat. In der zweiten Hälfte der Beobachtung verlief die Fermentertemperatur weitaus gleichmäßiger. Im Mittel betrug sie 49,9 °C. Im kleineren Nachgärbehälter lag die ermittelte durchschnittliche Temperatur um 2,6 °C höher und schwankte über den gesamten dokumentierten Zeitraum stark. Die Temperaturunterschiede zwischen zwei Tagen waren jedoch nicht stärker ausgeprägt als die in Stufe 1.

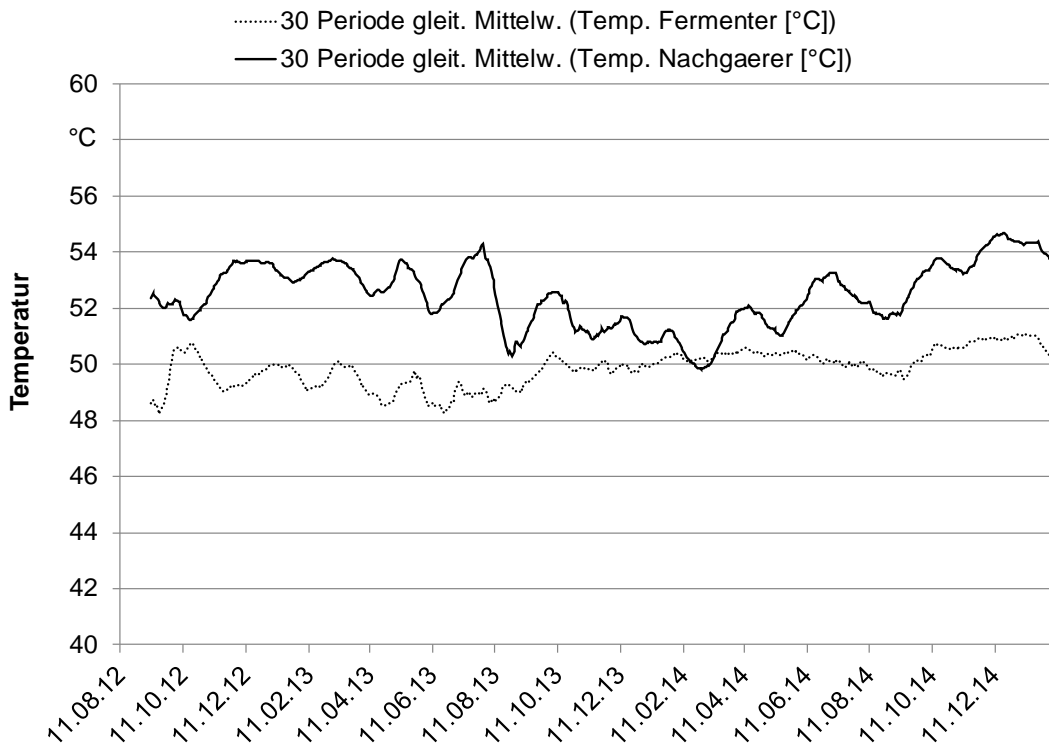


Abb. 56: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 19

4.1.3.3 Leistungsparameter

Im Mittel wurden am Tag ca. 1.500 m³ Biogas (Standardbedingungen) gebildet und daraus rund 2.700 kWh Strom erzeugt. In den Wintermonaten bewirkte das höhere Energiepotential der eingesetzten Energiepflanzenmischung eine Steigerung der Gas- und Stromproduktion. Das gute Erntejahr 2014 führte zu einer höheren Verfügbarkeit von Grassilage im folgenden Winter. Da im Vorfeld die üblicherweise erforderliche Menge an Mais angeschafft worden war, stand insgesamt mehr Silage zur Verfügung. Diese wurde verwertet und führte zum Jahreswechsel 2014/15 zur höchsten Produktionsrate im gesamten Beobachtungszeitraum. Durchschnittlich erbrachten die beiden BHKW eine elektrische Leistung von 113 kW (siehe Abb. 57). Das größere Aggregat mit einer installierten elektrischen Leistung von 110 kW war gekennzeichnet durch einen außerordentlich gleichmäßigen Betrieb. Im Mittel konnte es täglich zu 23,9 Stunden betrieben werden und stand nur dann still, wenn die regelmäßig anstehenden Routinearbeiten durchgeführt werden mussten. Das kleinere BHKW (elektrische Nennleistung: 37 kW) wurde im Routinebetrieb bis November 2014 zur Abfuhr von auftretenden Gasspitzen betrieben und ist im Wesentli-

chen verantwortlich für die in Abb. 57 erkennbaren Leistungsschwankungen. Leistungsspitzen traten regelmäßig aus den genannten Ursachen vorwiegend in den Wintermonaten auf. Erst die hohe Substratverfügbarkeit Ende des Jahres 2014 ermöglichte einen durchschnittlichen täglichen Betrieb des kleinen Aggregats von 23,5 Stunden. Über den gesamten Beobachtungszeitraum war es täglich nur für 6,4 h im Einsatz.

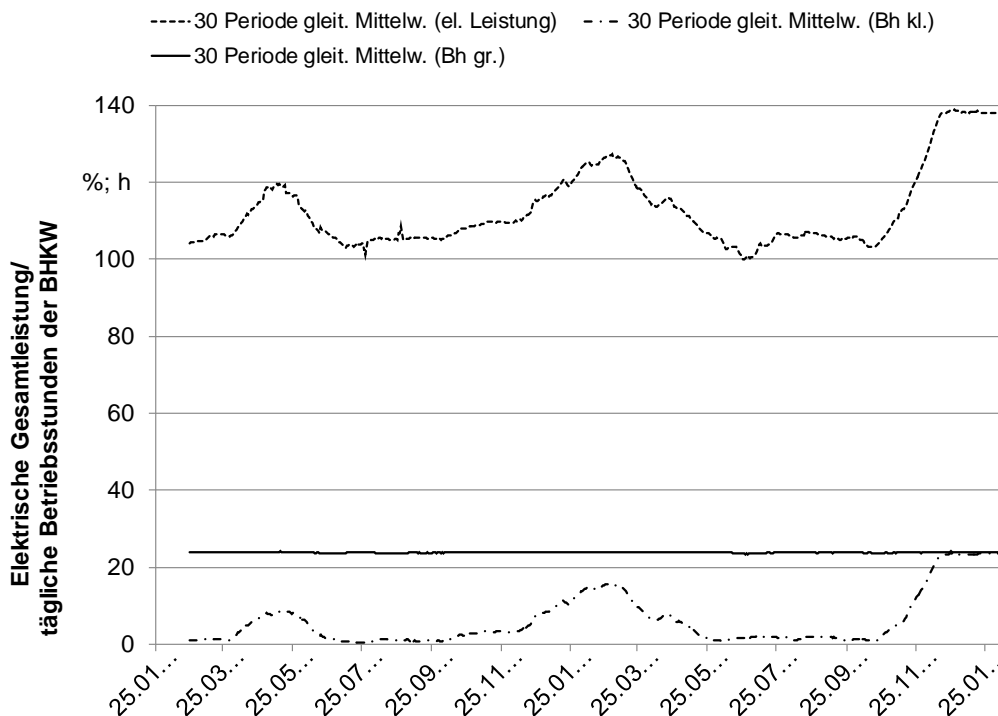


Abb. 57: Verlauf der täglichen Betriebsstunden der einzelnen BHKW und der Gesamtleistung beider BHKW von Pilotanlage 19 (gleitender Mittelwert über 30 Tage)

Die in Abb. 58 dargestellte Auslastungskurve spiegelt die Leistungskurve in Abb. 57 wieder. Aufgrund der mangelnden Substratverfügbarkeit erreichte Pilotanlage 19 einen elektrischen Arbeitsausnutzungsgrad von lediglich 77%. Der Durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad des großen Aggregats betrug 38,4% und verlief relativ stabil. Allerdings wurden in den Phasen der höchsten elektrischen Auslastung die besten Ergebnisse erzielt. Ursächlich hierfür dürfte ein dauerhafter Volllastbetrieb in diesem Zeitraum gewesen sein. Der Wirkungsgrad der kleinen Maschine konnte aufgrund unzuverlässiger Daten des Gaszählers nicht bestimmt werden. Vermutlich waren die Durchflussmengen aufgrund des Teillastbetriebs zu gering. Die von der Maschine verbrauchten Gasmengen wurden deshalb berechnet, wobei ein elektrischer Wirkungsgrad von 32 % unterstellt wurde. Diese Vorgehensweise wurde an dieser Stelle als ausreichend erachtet, da die vom kleinen Aggregat verbrauchten Gasmengen nur ca. 10 % der Gesamtmenge ausmachten und die Erfahrungen aus vorangegangenen Monitoring Projekten gezeigt haben, dass diese Annahme für ein BHKW dieser Größenordnung realistisch ist (Ebertseder et al., 2012; Effenberger et al., 2010).

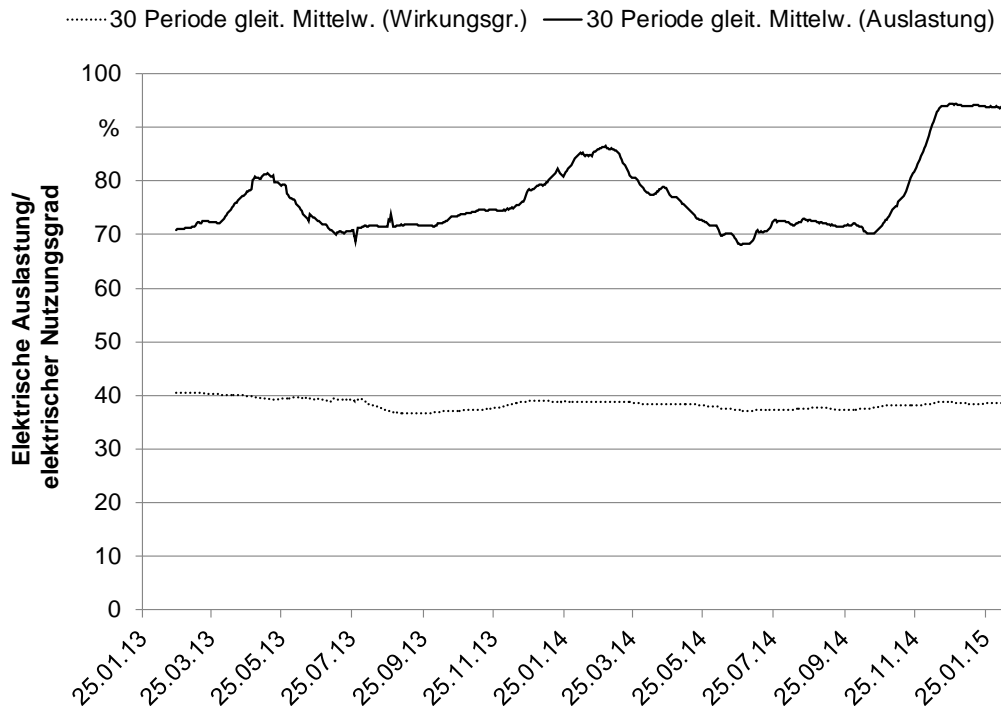


Abb. 58: Verlauf des elektrischen Nutzungsgrades und der Arbeitsausnutzung der BHKW von Pilotanlage 19

4.1.4 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #20

Hier lagen technische Mängel vor, die in Verbindung mit dem schwer zu verarbeitenden Ladewagengras zu Beeinträchtigungen im Prozess geführt haben. Vor allem im ersten Untersuchungsjahr konnte die immer wieder auftretende und z. T. massive Schwimmdecke nur mit erheblichem Rühraufwand beseitigt werden. Eine im Mai 2013 aufgetretene Prozessdepression wurde, wie sich später herausstellte, durch eine Sedimentschicht verursacht, die den aktiven Gärraum erheblich reduzierte, was schließlich zu einer Überlastung der Gärbiologie führte. Der Behälter wurde daraufhin entleert und von einer Fachfirma ausgebaggert. Vor der Befüllung mit dem im Nachgärbehälter zwischengelagerten Material wurde das vorhandene Langachsührwerk durch ein Paddelührwerk mit vertikaler Achse ersetzt. In der Folge konnte mit weniger Energieeinsatz ein besseres Durchmischungsergebnis erzielt werden. Nachfolgend eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge auf der Anlage

4.1.4.1 Substratzugabe

Durchschnittlich wurden dem Fermenter innerhalb des Beobachtungszeitraums von 917 Tagen täglich 7,4 t Frischmasse zugeführt. Die Futtermischung bestand im Mittel zu 43 % aus Rindergülle, die ausnahmslos von Betrieben aus der näheren Umgebung stammte. Mit etwas über 53 % Grasanteil im Gesamt-Input erreicht Anlage 20 den dritthöchsten Wert unter den fünf Grünland-Pilotbetrieben. Maissilage nahm nur einen Anteil von fünf Prozent an der Masse der eingesetzten Energiepflanzen ein (Abb. 59).

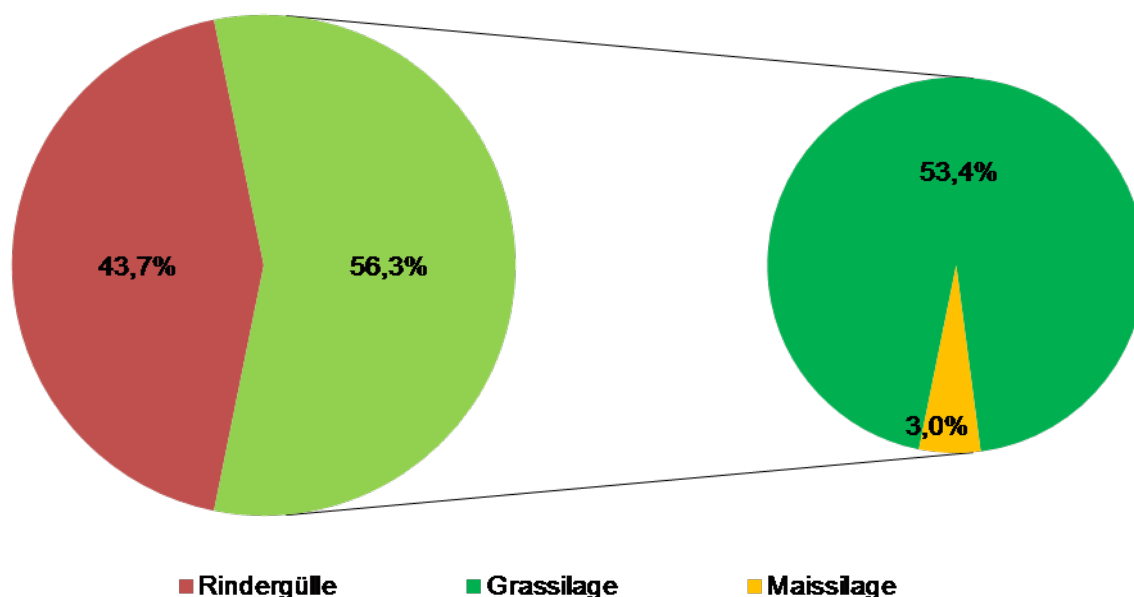


Abb. 59: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 20

Der Betriebsinhaber setzte ausschließlich mit dem Ladewagen geerntetes Gras ein, was verschiedene Probleme mit sich brachte. Die vergleichsweise langen Fasern aus dem Ladewagen neigen in den Gärbehältern zum Aufschwimmen, sind tendenziell schwerer abbaubar und können sich um Rührwerke und Heizschlangen wickeln. Des Weiteren ist der Verschmutzungsgrad dieses Substrates vergleichsweise hoch, was die Sedimentbildung fördert. In Pilotanlage 20 kam es daher wiederholt zur Ausbildung einer Schwimmdecke, die Durchmischung der Gärbehälter war beeinträchtigt und im Hauptfermenter bildete sich eine großvolumige Sedimentschicht, welche eine Reinigung dieses Behälters erforderlich machte.

Der Verlauf der Substratzugabe ist gekennzeichnet durch zwei Phasen, in denen Prozessstörungen auftraten. Die erste Periode begann im Mai 2013 und wurde durch das entstandene Sediment verursacht. Die Fütterung wurde Ende Mai komplett eingestellt, da der Fermenter entleert werden musste (Abb. 60). Für die Wiederaufnahmephase Anfang August 2013 wurde nahezu ausschließlich Gras mit einem kleinen Anteil Maissilage eingesetzt. Erst im September 2013 wurde wieder Gülle eingesetzt und die Maiszugabe eingestellt. Von diesem Zeitpunkt an blieb die Futtermischung weitgehend gleich, bis im August 2014 die zweite Prozessstörung festgestellt wurde. Daraufhin wurde der Grasanteil in der Fütterung auf eine halbe Tonne täglich reduziert, um die Biologie des Fermenters zu schonen. Nach drei Monaten zeigte diese Maßnahme in Verbindung mit der Zugabe eines stickstoffbindenden Additivs Wirkung. Mit der Steigerung der Futtermenge konnte erst wieder Ende November 2014 begonnen werden.

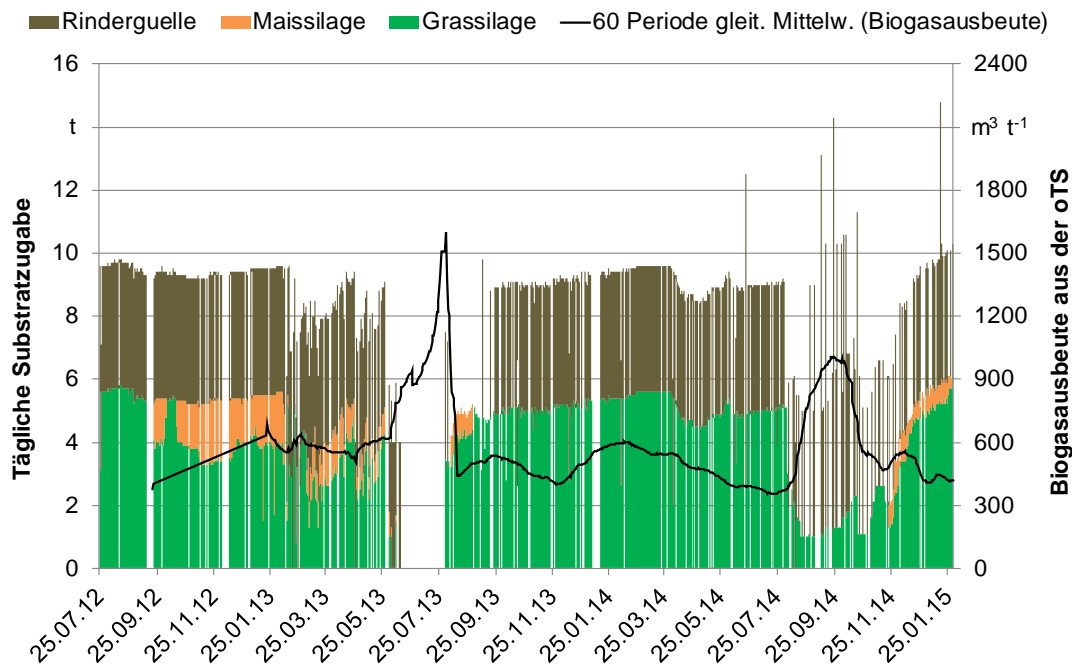


Abb. 60: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der zugeführten organischen Trockensubstanz für Anlage 20

Analog zum sehr unruhigen Verlauf der Futterzugabe war auch die Biogasausbeute aus der oTM sehr starken Schwankungen unterworfen. Die höchste berechnete Ausbeute von etwas mehr als $1.500 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ am Ende der Phase ohne Fütterung im Frühjahr/Sommer 2013 ist ein Artefakt (Abb. 60). Die Gasproduktion in diesem Zeitraum entstammte offenbar der zuvor eingetragenen organischen Substanz, die wegen der Prozesshemmung nicht abgebaut worden war. Im Mittel wurde pro t eingetragener organischer Substanz eine Biogasausbeute von 546 m^3 ermittelt.

Analog der Fütterung schwankte auch die Raumbelastung erheblich. Durchschnittlich errechnete sich eine Raumbelastung mit oTS von $1,9 \text{ kg m}^{-3}$. Die in Abb. 61 erkennbar niedrige Belastung zu Beginn der Untersuchung war in Wirklichkeit in Bezug auf das aktive Gärvolumen höher, da die Sedimentschicht dieses deutlich reduzierte. Quantitativ konnte dies nicht bestimmt werden, da die später ausgebagerte Sinkschicht nicht vermessen wurde. Die zwischen erstem und zweitem Störfall dargestellten Schwankungen der Raumbelastung wurden allein durch die Inhomogenität der beprobten Grassilage verursacht. Zum Zeitpunkt der höchsten Raumbelastung wies die Grassilage einen TS-Gehalt von mehr als 50 % auf. Möglicherweise wurde die zweite Prozesshemmung unter anderem auch durch die deutlich gestiegene Raumbelastung verursacht. Naturgemäß fällt die durchschnittliche Verweilzeit mit 107 Tagen aufgrund der langen Perioden ohne oder mit eingeschränkter Fütterung hoch aus. Insgesamt befand sich das Substrat im Mittel für 214 Tage im gasdichten System.

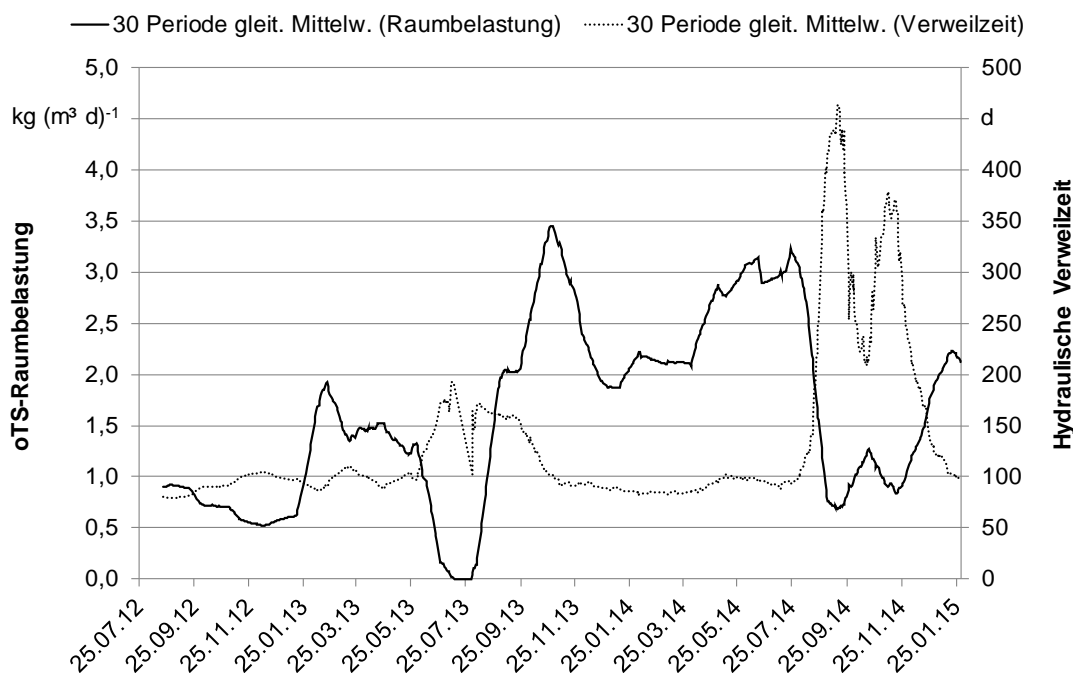


Abb. 61: Verlauf der hydraulischen Verweilzeit und Raumbelastung in der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20

4.1.4.2 Prozessparameter

Die beobachteten Konzentrationswerte der Prozessindikatoren Essig- und Propionsäure deuten auf einen stark belasteten bzw. gehemmten Gärprozess hin. Die Propionsäurekonzentration in Proben aus dem Hauptfermenter betrug im Mittel 2.200 mg L^{-1} und war damit knapp dreimal höher als der Durchschnittswert der Essigsäure.

Wahrscheinliche Ursache für diese Umstände, die auf eine Hemmung der Methanbildner und eine daraus resultierende Aufkonzentration flüchtiger Fettsäuren hindeuten, sind neben der ungünstigen Rheologie des Ladewagensgrases die hohen ammoniakalischen Stickstoffkonzentrationen. Die berechnete Konzentration von $\text{NH}_3\text{-N}$ in Proben aus dem Hauptgärbehälter lag im Mittel bei 780 mg L^{-1} und meist deutlich über dem gängigen Schwellenwert für eine wahrscheinliche Hemmung durch Ammoniak von 600 mg L^{-1} (Effenberger & Lebuhn, 2008). Erst gegen Ende der Untersuchung, nach der zweiten Wiederaufnahme der Fütterung, wurden unkritische Werte der Prozessindikatoren festgestellt. Die Essigsäurekonzentration lag in den letzten drei Proben unter 1.000 mg L^{-1} , die Propionsäurekonzentration sank unter 100 mg L^{-1} (Abb. 62).

In Proben aus dem Nachgärbehälter lag die $\text{NH}_3\text{-N}$ -Konzentration erwartungsgemäß mit durchschnittlich 1.300 mg L^{-1} nochmals höher als im Hauptfermenter. Dennoch wurde in diesem Behälter nur einmal eine stark erhöhte Propionsäurekonzentration nachgewiesen, nämlich unmittelbar bevor die Fütterung des Fermenters aufgrund der Prozessstörung im Herbst 2014 drastisch eingeschränkt werden musste. Ursächlich für die niedrigen Säurekonzentrationen ist die geringe Raumbelastung des Nachgärbehälters (Abb. 63).

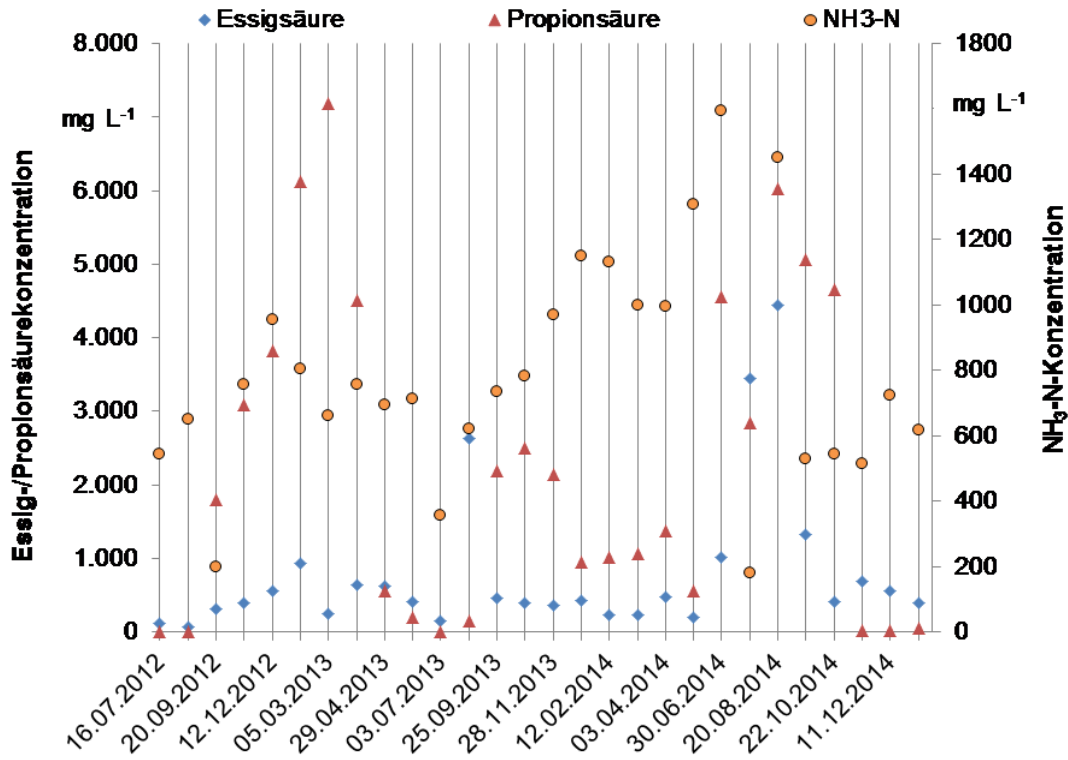


Abb. 62: Essigsäure-, Propionsäure- und NH₃-N-Gehalte in Proben aus dem Fermenter (Stufe 1) von Pilotanlage 20

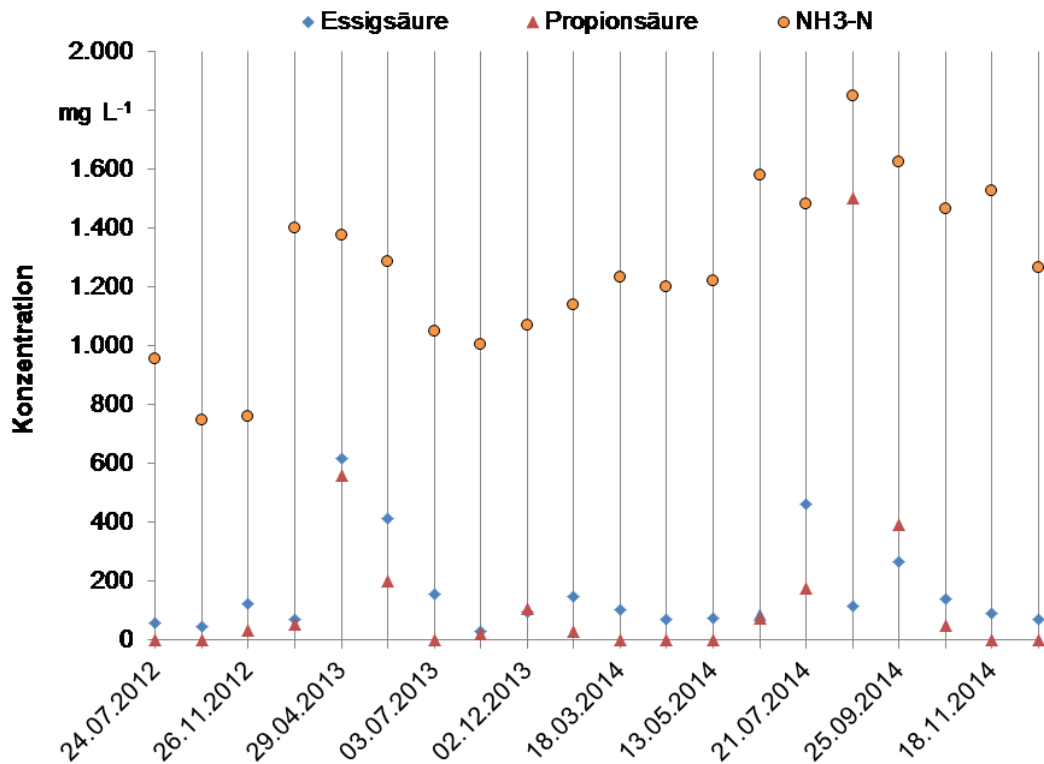


Abb. 63: Essigsäure-, Propionsäure- und NH₃-N-Gehalte in Proben aus dem Nachgärer (Stufe 2) von Pilotanlage 20

Der FOS/TAC in Proben aus dem Fermenter der Anlage 20 schwankte stark und korrelierte positiv mit dem Summenparameter Gesamtfettsäuren (Abb. 64). Wurden FOS/TAC-Werte um 0,5 oder darüber ermittelt, lagen die Gesamt-Essigsäureäquivalente bei mindestens 3.000 mg L⁻¹. Die für sich genommen eingeschränkte Aussagekraft dieses Summenparameters zeigt sich deutlich an den Werten von August und September 2013. Während FOS/TAC und Essigsäureäquivalente in den beiden Proben nahezu gleiche Werte aufwiesen, hatte sich das Verhältnis von Essig- zu Propionsäure umgekehrt und wies auf eine fortgeschrittene Prozesshemmung hin (vgl. Abb. 62 und Abb. 64).

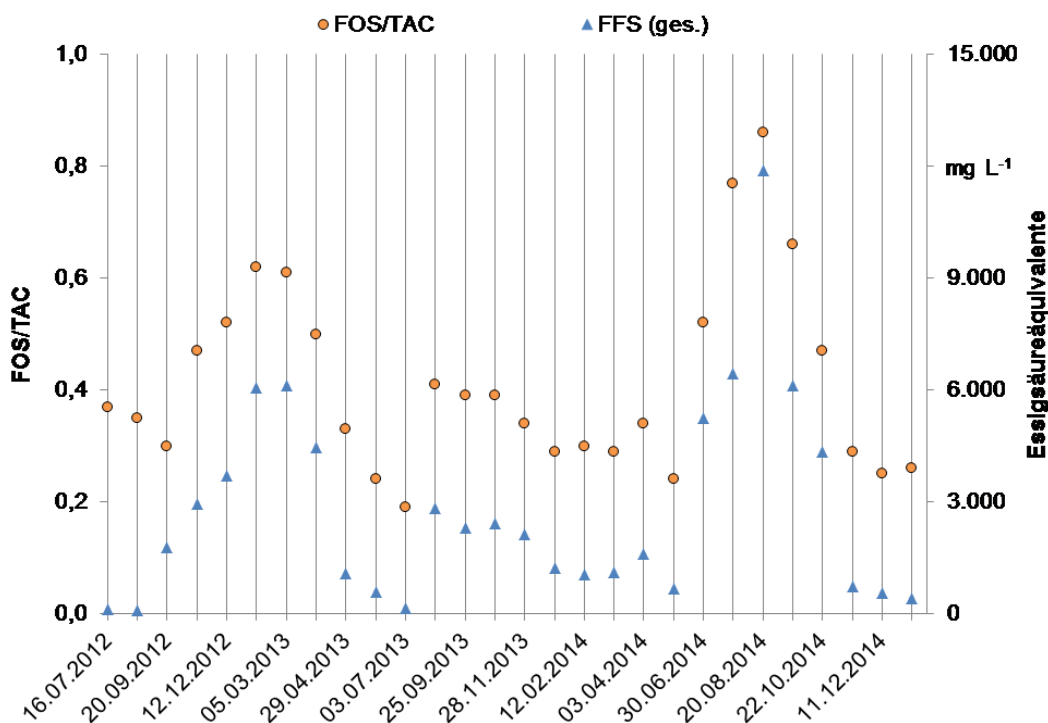


Abb. 64: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage 20

Der mittlere TM-Anteil in Proben aus dem Fermenter bzw. dem Nachgärer unterschied sich im Mittel mit 10,1 % bzw. 9,6 % nur wenig. In der Phase der zweiten Prozessstörung stieg der TM-Gehalt im Fermenter aufgrund des mangelhaften Abbaus bis auf knapp 15 % und nachfolgend im Nachgärer bis auf ca. 12 % (Abb. 65). Niedrige TS-Gehalte im Fermenter wurden nur dann gemessen, als der Behälter im Sommer 2013 wieder angefahren wurde und während die Fütterung der Anlage im Herbst 2014 deutlich reduziert war.

Die Temperaturen in den Gärbehältern schwankten phasenweise relativ stark (Abb. 66). Im Zuge der ersten Prozessstörung mit Entleerung des Behälters trat im Fermenter eine Temperaturspanne von 13 °C auf. Da das BHKW während der gärbiochemisch instabilen Phasen nur unter Teillast betrieben werden konnte, stand nicht genügend Wärme für die Temperierung der Gärbehälter zur Verfügung. Hingegen wurde zur Wiederinbetriebnahme im Sommer 2013 der Fermenter stark erwärmt, um die Durchmischung zu erleichtern. Im Nachgärer fiel die Temperaturverteilung etwas gleichmäßiger aus. Mit Ausnahme der Phase im Sommer 2013, als aufgrund des niedrigen Füllstands nicht geheizt werden konnte, schwankte die Gärtemperatur um maximal 5 °C. Insgesamt dürften die Temperaturschwankungen einen zusätzlichen Stressfaktor für die Gärbiologie gebildet haben.

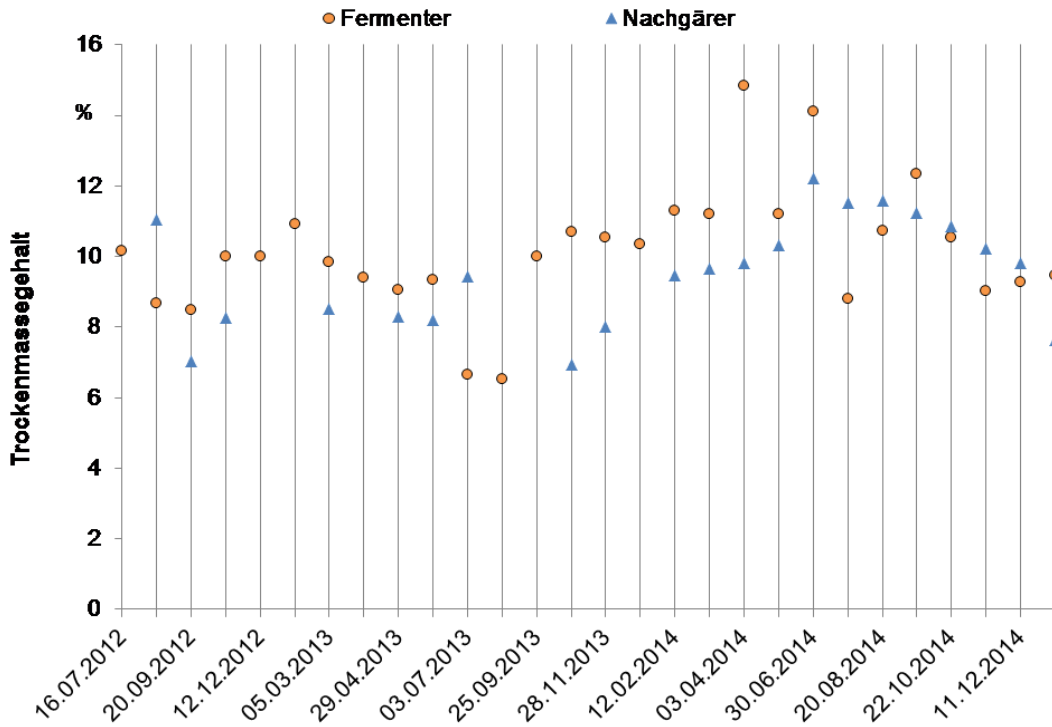


Abb. 65: Trockenmassegehalte in Proben aus Fermenter und Nachgärer von Pilotanlage 20

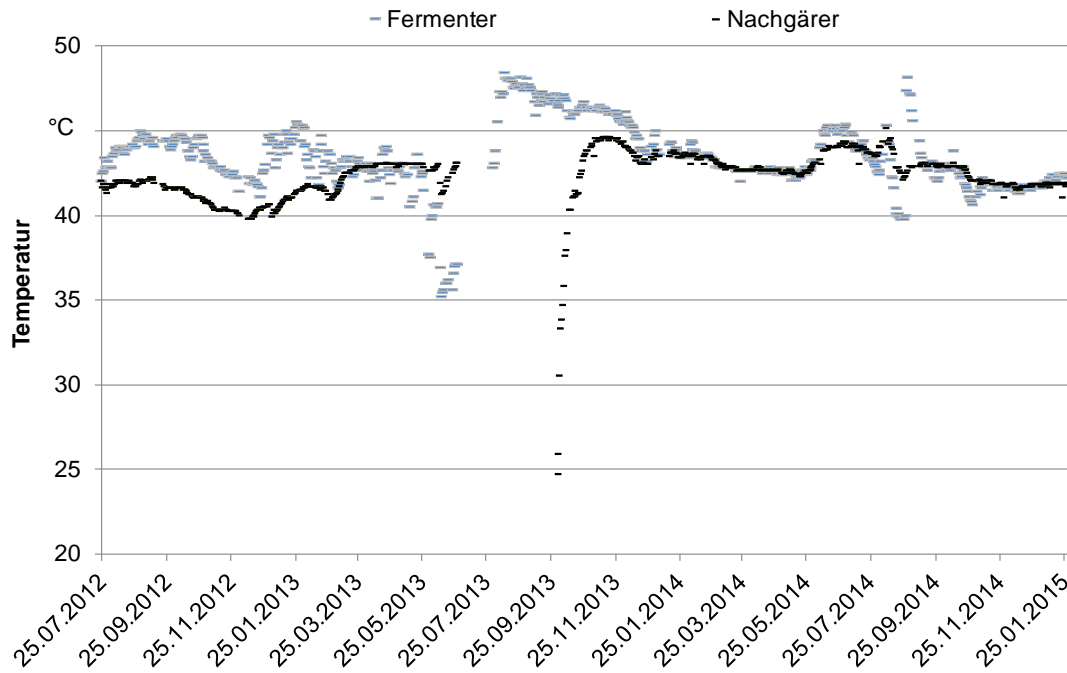


Abb. 66: Temperaturverlauf in den Gärbehältern von Pilotanlage 20

4.1.4.3 Leistungsparameter

Außerhalb der Störungsphasen konnte das BHKW durchschnittlich an 23,7 Stunden täglich betrieben werden. Durch die bereits ausführlich dargestellten Betriebsstörungen reduzierten sich die täglichen Betriebsstunden im Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum auf 21,9. Ein länger anhaltender Volllastbetrieb des BHKW konnte praktisch nie erreicht werden (Abb. 67). Während der stabilsten Phase - zwischen den beiden Störungen -, welche knapp ein Jahr umfasste, wurde eine mittlere Arbeitsausnutzung von 79 % erzielt. Über den gesamten Zeitraum der Datenaufnahme betrug diese lediglich 59 %. Damit schnitt die Anlage bezüglich dieses Kennwerts von allen fünf untersuchten Pilotbetrieben am schlechtesten ab.

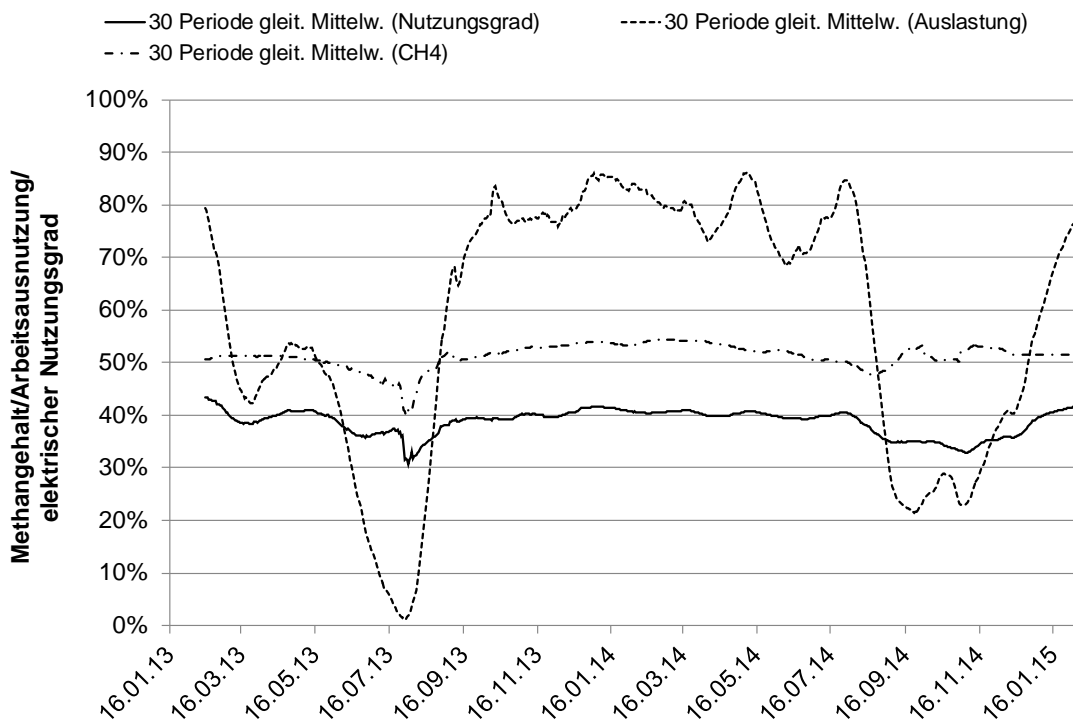


Abb. 67: Verlauf des elektrischen Nutzungsgrades und der Arbeitsausnutzung des BHKW sowie des Methangehaltes im Biogas von Pilotanlage 20

Entsprechend der Leistungskurve schwankten Strom- und Gasproduktion gleichermaßen. Durchschnittlich konnten täglich aus rund 700 m³ Biogas (Standardbedingungen) 1.400 kWh elektrische Energie erzeugt werden. Für einen Volllastbetrieb des BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 100 kW wären rund 500 m³ Biogas mehr erforderlich gewesen. Diese konnten unter den genannten Umständen nicht zur Verfügung gestellt werden.

Trotz des ständigen Teillastbetriebs wurde für das BHKW-Aggregat ein mittlerer elektrischer Nutzungsgrad von 39 % errechnet. Allerdings sank dieser in den Phasen, in denen die Maschine nur zu 20 bis 40 % ausgelastet werden konnte, deutlich ab (Abb. 67). Ähnlich verhielt es sich mit dem Methangehalt im Biogas, der im Mittel bei 51,5 % lag. In den Perioden mit Prozessdepressionen sank dieser deutlich und lieferte damit dem Betreiber neben dem FOS/TAC einen weiteren, allerdings etwas verzögert reagierenden Prozessindikator. Dabei war die Abnahme im Sommer 2013 weitaus stärker ausgeprägt als im Herbst 2014.

4.1.5 Einzelbetrachtung von Pilotanlage #21

An dieser Anlage wurden im Vergleich der fünf Grünland-Pilotanlagen die meisten technischen Mängel festgestellt. Wiederholt traten Schäden an den zunächst zu schwach ausgelegten Langachsrührwerken in den beiden Hauptgärbehältern auf, die schließlich durch stärkere Rührwerke gleichen Typs ersetzt wurden. Störstoffe im Substrat führten in vier Fällen zu Schneckenbrüchen in den Eintragsvorrichtungen. Die zentrale Exzentrerschneckenpumpe, die auch das Gärgemisch durch den externen Wärmetauscher förderte, wurde durch Störstoffe stark beansprucht und fiel mehrmals aus. Stator und Rotor mussten überdurchschnittlich oft ausgetauscht werden. Hier zeigte sich der Nachteil einer externen Heizung, da bei Ausfall der Pumpe die Gärtemperatur nicht aufrechterhalten werden konnte.

Der zunächst nicht genehmigungskonform ausgeführte Unterbau des Substratlagers wurde während des Untersuchungszeitraums nachträglich asphaltiert und mit Betonfertigteilen eingefasst. Im Zuge dieser Maßnahme wurde der Zugangsweg so angelegt, dass das von den Fahrzeugen zu überwindende Höhenniveau erheblich einfacher zu bewältigen war.

Bei der Versorgung der Anlage mit Rohstoffen kam es immer wieder zu Engpässen. Ursächlich hierfür dürften verschiedene Faktoren gewesen sein, ein hauptsächlich die Aufstockung der installierten elektrischen Leistung von 360 kW auf 625 kW. Für eine Anlage dieser Größenordnung wurden die lieferbaren Rohstoffe von den umliegenden Grünlandflächen knapp. Hinzu kam das ungünstige Wetter im Erntejahr 2014, bei dem aufgrund lang anhaltender Feuchteperioden geringere Gesamterträge eingefahren wurden.

Ein weiterer Faktor war die Tatsache, dass der Schwerpunkt beim Substrateinsatz von Grünlandaufwuchs auf Maissilage verlagert werden sollte, um eine Entlastung der stark beanspruchten technischen Einrichtungen zu erreichen. Gleichzeitig sollte dieser Schritt der Sicherung der Qualität der Substrate dienen, die bis dahin stark mit Störstoffen befrachtet waren. Diese Umstellung erweiterte die zurückzulegenden Wegstrecken für die Substratanlieferung auf bis zu 150 km im Falle von überregional produziertem Mais, der aufgrund der klimatischen Verhältnisse in unmittelbarer Umgebung der Anlage nicht angebaut werden kann. Davor mussten maximal 34 km zurückgelegt werden, um die am weitesten entfernte Grünlandfläche zu erreichen. Diese Maßnahme zur Umstrukturierung ging teilweise zu Lasten der ursprünglichen Idee, mit dem Einsatz von Grünlandaufwuchs aus der Umgebung eine alternative Nutzungsmöglichkeit von Flächen zu ermöglichen, die nicht länger für die Milchviehhaltung benötigt werden.

4.1.5.1 Substrateinsatz

Innerhalb der 810 dokumentierten Tage wurden den Fermentern durchschnittlich 40 t Frischmasse pro Tag zugeführt. Der gemittelte Anteil der Wirtschaftsdünger, der sich aus Rindergülle und Rinderfestmist zusammensetzte, lag bei zusammen 39 % (\Rightarrow Erhalt des Güllebonus). Der pflanzliche Input setzte sich im Wesentlichen aus Mais- und Grassilage zusammen, wobei das Gras einen Anteil von 61 % der eingebrachten Energiepflanzen ausmachte (geringster Wert aller fünf Grünland-Pilotbetriebe). Der Maisanteil lag von allen untersuchten Anlagen mit 19 % am Gesamtinput am höchsten. Andere Energiepflanzen spielten eine untergeordnete Rolle (Abb. 68).

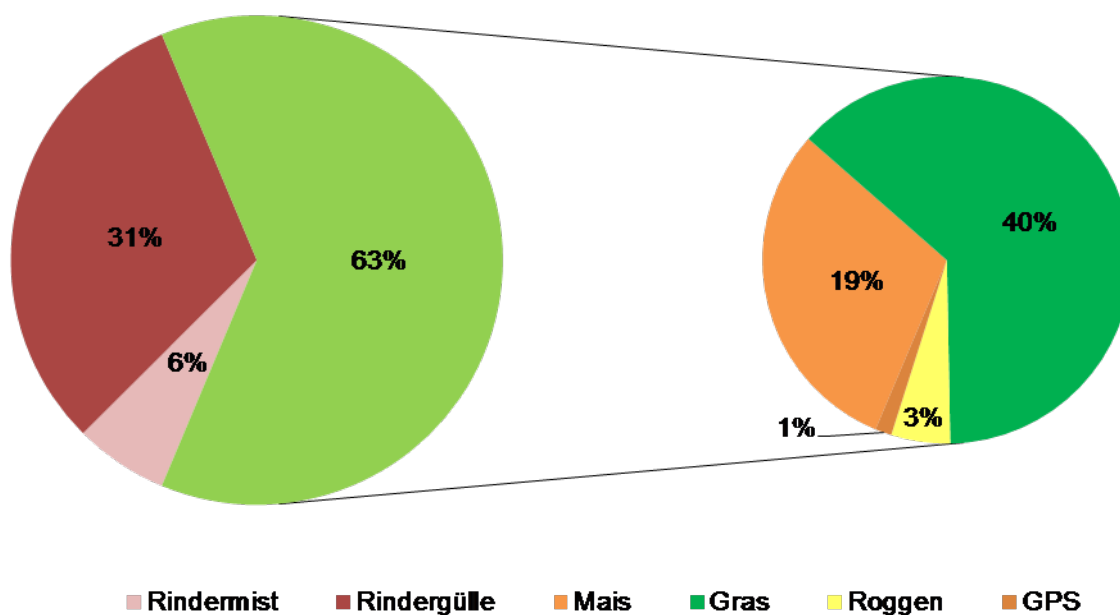


Abb. 68: Mittlere Substratmischung für Pilotanlage 21

Trotz des relativ hohen Anteils von überregional bezogenen Energiepflanzen reichte das Substrat nicht aus, um das BHKW voll auszulasten. Dafür wären statt der eingebrachten 24 t Energiepflanzen mindestens 40 t täglich erforderlich gewesen. Die Darstellung des Verlaufs der täglich eingetragenen Futtermenge belegt, dass ab Oktober 2013 deutlich weniger Substrat eingetragen wurde, als im Zeitraum davor (Abb. 69). Alle mittleren Werte bezüglich des Substrateinsatzes beziehen sich auf den Zeitraum, in dem die Gasmengen gemessen werden konnten, da sonst keine Gasausbeuten hätten berechnet werden können. Im ersten Drittel der Projektlaufzeit kamen im Mittel gut 55 t Frischmasse zum Einsatz, in den letzten beiden Dritteln sank diese Zahl auf nur noch 35 t täglich. Dabei nahm auch der Anteil des Grünlandaufwuchses von 46 % auf 33 % ab. In dieser Periode wurde versucht, den Mangel an Silage durch energiereiche, einfach zu transportierende und einzulagernde Rohstoffe auszugleichen, indem überregional produzierter Roggen eingesetzt wurde. Erst im letzten Drittel kam wieder regelmäßig Maissilage aus der neuen Ernte zum Einsatz.

Insgesamt reichten die zugekauften Produkte nicht aus, um die wesentlich geringeren verfügbaren Mengen an Grassilage im zweiten Untersuchungsdrittel zu kompensieren. (siehe Abb. 69). Möglicherweise führten die hohen Kosten für Reparaturmaßnahmen in Verbindung mit durch Substratmangel verursachten Mindereinnahmen aus dem Stromverkauf dazu, dass nicht genügend Mittel zur Verfügung standen um ausreichend Rohstoffe zu erwerben. Auf die Abbauleistung sollte sich dieser Substratmangel positiv auswirken, da sich so die Verweilzeit erhöhte. Im Durchschnitt wurde aus einer Tonne oTM eine Biogasausbeute von $V_N = 696 \text{ m}^3$ erzielt. Die in Abb. 69 erkennbaren Schwankungen bei der Biogasausbeute spiegeln die ungleichmäßige Fütterung wider.

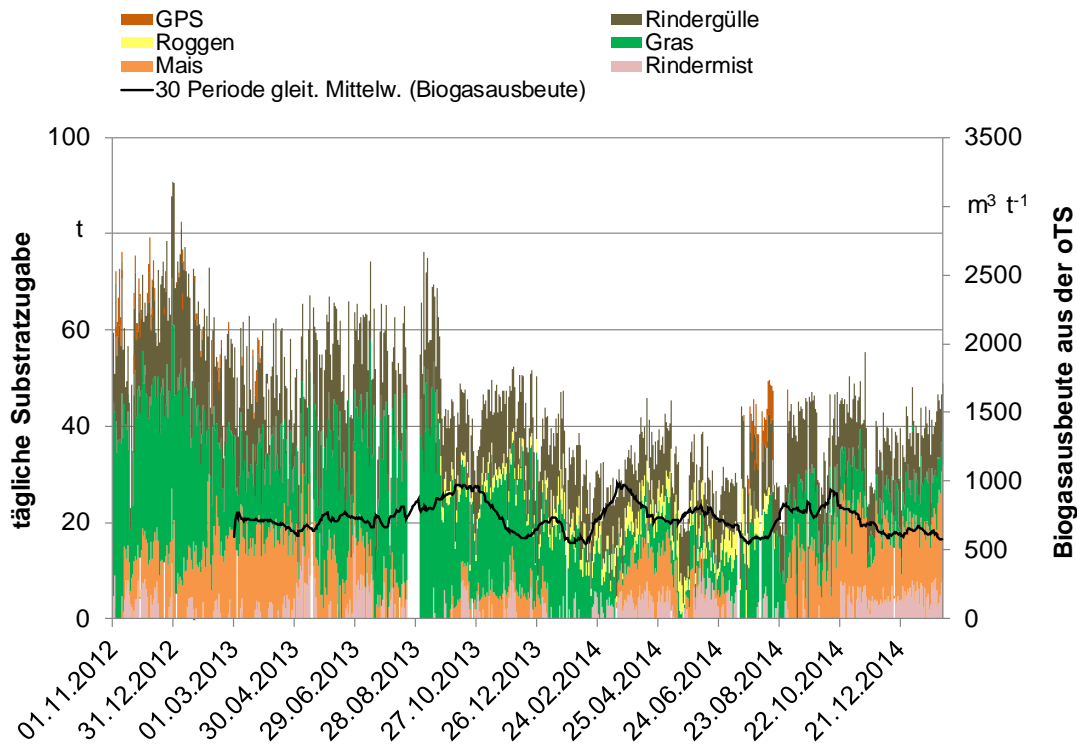


Abb. 69: Verlauf der täglichen Substratzugabe (Frischmasse) und der Biogasausbeute aus der oTM für Pilotanlage 21

Die Raumbelastung der ersten Stufe (als Mittelwert der beiden Fermenter) nahm über den Beobachtungszeitraum tendenziell ab (Abb. 70) und schwankte dabei stark. Im Wesentlichen waren diese Schwankungen auf die große Variabilität der täglichen Futtermenge zurückzuführen. Im Durchschnitt errechnete sich für die erste Stufe von Pilotanlage 21 eine Raumbelastung mit oTM von $3,3 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$. Die hydraulische Verweilzeit in der ersten Stufe variierte zwischen unter 50 und knapp 100 Tagen bei einem Mittelwert von 61 Tagen. Der Methangehalt im Biogas betrug im Durchschnitt 50,1 % und verlief bis auf eine Ausnahme im August 2014, als aufgrund einer Havarie des Fermenterdachs Luft in das System gelangte, relativ stabil. Aus welchen Gründen er um 1,4 – 3,8 % Punkte unterhalb der übrigen vier untersuchten Betriebe lag, konnte nicht abschließend geklärt werden.

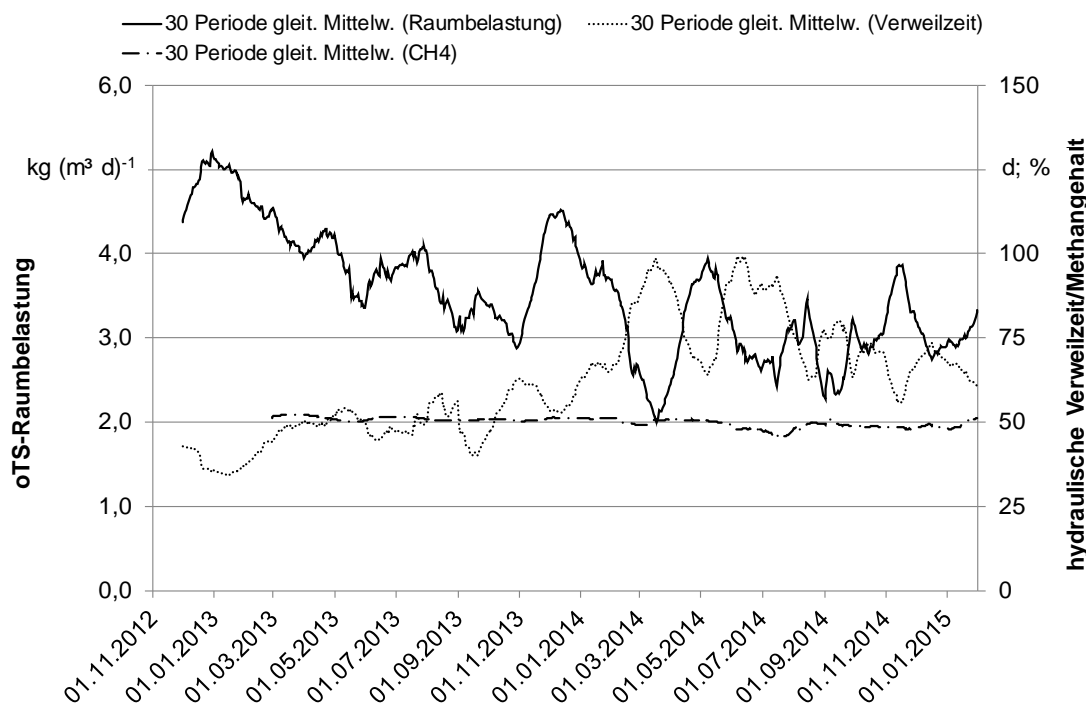


Abb. 70: Verlauf der Verweilzeit und Raumbelastung in Stufe 1 (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) sowie des Methangehalts im Biogas von Pilotanlage 21

4.1.5.2 Prozessparameter

Dass die erheblichen Schwankungen der Raumbelastung ohne negative Folgen für die Biozönose der ersten Vergärungsstufe blieben, ist dem insgesamt großzügig dimensionierten Gärraumvolumen geschuldet sowie der Tatsache, dass einer Überlastung durch Rezirkulieren aus 2 oder dem abgedeckten Gärrestlager entgegengewirkt wurde. Somit wurde die zu verarbeitende Organik auf ein weitaus größeres Gärvolumen verteilt. Kritische Werte der betrachteten Prozessindikatoren in Gärgemischproben traten während des gesamten Beobachtungszeitraums nie auf. Die durchschnittliche Konzentration von Essigsäure in Proben aus der ersten Stufe betrug 625 mg L^{-1} , die der Propionsäure lag um den Faktor 10 niedriger. Auch die Gehalte an Ammoniumstickstoff (im Mittel 2.000 mg L^{-1}) lagen bis auf eine Ausnahme im Juli 2014 unterhalb des Warnwertes von 3.000 mg L^{-1} . Im Durchschnitt errechnete sich daraus ein $\text{NH}_3\text{-N}$ -Gehalt von 160 mg L^{-1} und auch der maximal ermittelte Wert von knapp 400 mg L^{-1} ist als unproblematisch zu betrachten (siehe Abb. 71).

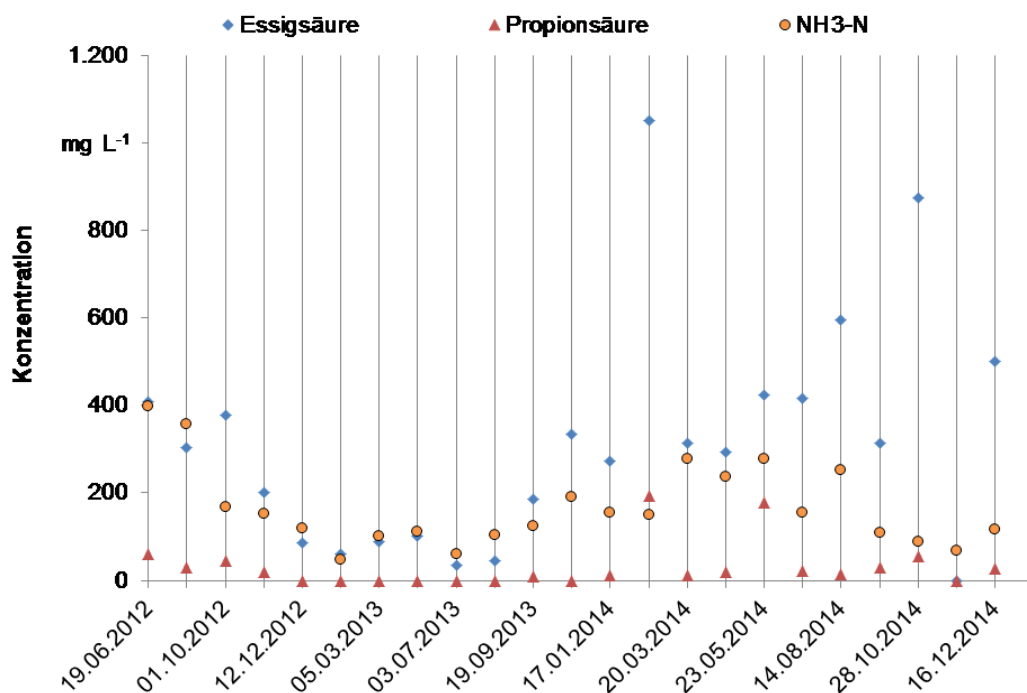


Abb. 71: Essigsäure-, Propionsäure- und NH₃-N-Gehalte in Proben aus der ersten Vergärungsstufe (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) von Pilotanlage 21

Die Konzentrationswerte der relevanten Prozessindikatoren in der zweiten Vergärungsstufe deuten auf einen unterbelasteten Gärbehälter hin und wurden nicht dargestellt. Der Durchschnittswert für die Essigsäure lag bei 165 mg L⁻¹, der für die Propionsäure bei lediglich 29 mg L⁻¹, wobei in 16 von 25 Proben aus dem Nachgärer keine Propionsäure nachgewiesen wurde. Die Gehalte an NH₃-N lagen im Nachgärer mit durchschnittlich 191 mg L⁻¹ etwas höher als in der ersten Stufe. Maximal wurden dort etwas über 500 mg L⁻¹ ermittelt. Für beide Stufen gilt: die höchsten Ammoniak Werte stammen aus dem Zeitraum ganz zu Beginn der Untersuchung, als sowohl die Raumbelastung als auch der Grasteil am höchsten waren.

Entsprechend den niedrigen Konzentrationen der Prozessindikatoren in der ersten Vergärungsstufe verlief auch der FOS/TAC auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Welcher Wert im Fall von Anlage 21 als kritischer Schwellenwert herangezogen werden kann, ist nicht zu sagen, da zu keinem Zeitpunkt kritische Verhältnisse auftraten. Im Durchschnitt lag der FOS/TAC in Stufe 1 bei einem Wert von 0,25. Der außerordentlich geringe mittlere Wert von lediglich rund 700 mg L⁻¹ Gesamt-Essigsäureäquivalente belegt, dass die Kapazität der Fermenter bei Weitem nicht ausgeschöpft wurde (siehe Abb. 72).

Die Trockensubstanzgehalte in beiden Vergärungsstufen stellten sich auf einem durchschnittlichen Niveau dar (Abb. 73). Nur in einer Phase der Untersuchung, im Frühjahr 2014, stiegen die Werte als Folge der Verdopplung der oTM-Raumbelastung innerhalb relativ kurzer Zeit von 2 auf 4 kg (m³ d)⁻¹ deutlich an (Abb. 70). Ein solch drastischer Anstieg der Belastung wurde zu keinem anderen Zeitpunkt der Untersuchung festgestellt. Da die Belastung unmittelbar im Anschluss wieder stark reduziert wurde, hatte diese kurze Episode keine erkennbaren negativen Auswirkungen auf die Prozessstabilität. Dass die zunächst im Überschuss vorhandene Organik in der Folgezeit abgebaut wurde, ist an den stark gesunkenen TS-Gehalten ab August 2014 zu erkennen. Der durchschnittlich ermittelte TS-Gehalt in der ersten Vergärungsstufe betrug 10 %, der im Nachgärbehälter 8,9 %.

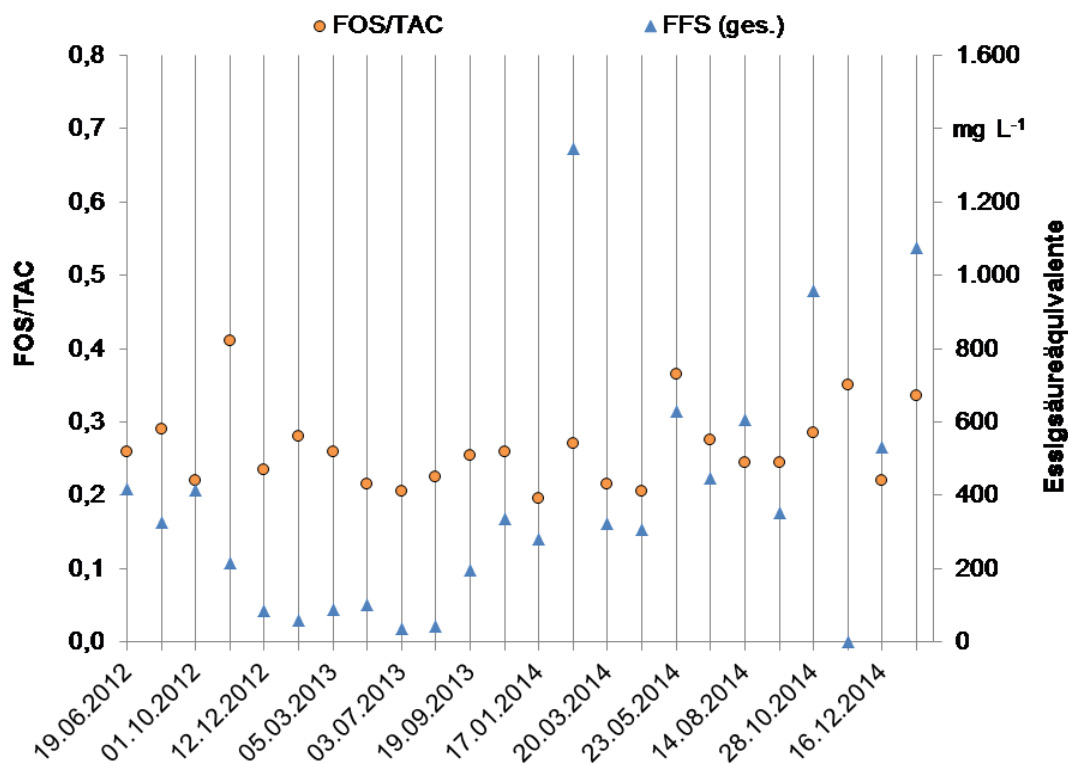


Abb. 72: Essigsäureäquivalente und FOS/TAC-Werte in Proben aus der ersten Vergärungsstufe (Mittelwerte Fermenter 1 und 2) von Pilotanlage 21



Abb. 73: TS-Gehalte in Proben aus den Gärbehältern von Pilotanlage 21

Bis in den Sommer 2013 konnte ein relativ stabiles Temperaturniveau in allen drei Gärbehältern aufrechterhalten werden. Die in Abb. 74 dargestellten Mittelwerte über 30 Tage zeigen nur geringe Temperaturschwankungen in diesem Zeitraum. Tatsächlich betrug die Differenz der Extreme in dieser Phase lediglich 3,5 °C. In der Folge änderte sich die Situation drastisch. Insgesamt ist ein starker Temperaturabfall verbunden mit größeren Schwankungen ab August 2013 zu erkennen. Dabei sank das mittlere Niveau von mehr als 45 °C auf ca. 40 °C ab und die Differenz der Extrema stieg auf nahezu 26 °C außerordentlich stark an (anhand der Darstellung der gleitenden Mittelwerte in Abb. 74 nicht zu erkennen).

Für diesen problematischen Temperaturverlauf wurden zwei Ursachen ausgemacht: 1. die nur im Teillastbetrieb laufenden BHKW, die nicht genügend Wärme zur Verfügung stellen konnten, zumal vor allem im Winter ein Teil davon an die externen Abnehmer geliefert werden musste; 2. die externe Heizung, die das Substrat nur dann erwärmen kann, wenn eine einsatzbereite Pumpe zur Verfügung steht. Aus den bereits erläuterten Gründen fiel diese Pumpe wiederholt aus. Im Extremfall, wie im Dezember 2014, kam es so zu einem Temperaturabfall im Fermenter auf nur noch 26 °C. Ein derartiger Temperaturabfall bedeutet massiven Stress für die Gärbiologie, blieb in diesem Fall jedoch ohne nennenswerte Folgen, da der Gärraum in dieser Phase nur gering belastet war. Jedoch ist davon auszugehen, dass der starke Pumpenverschleiß sowie die häufigen Schäden an den Rührwerken auch durch die niedrigen Temperaturen des Gärgemischs verursacht wurden, da diese einen Anstieg der Viskosität bewirken wodurch die mechanische Beanspruchung zunimmt.

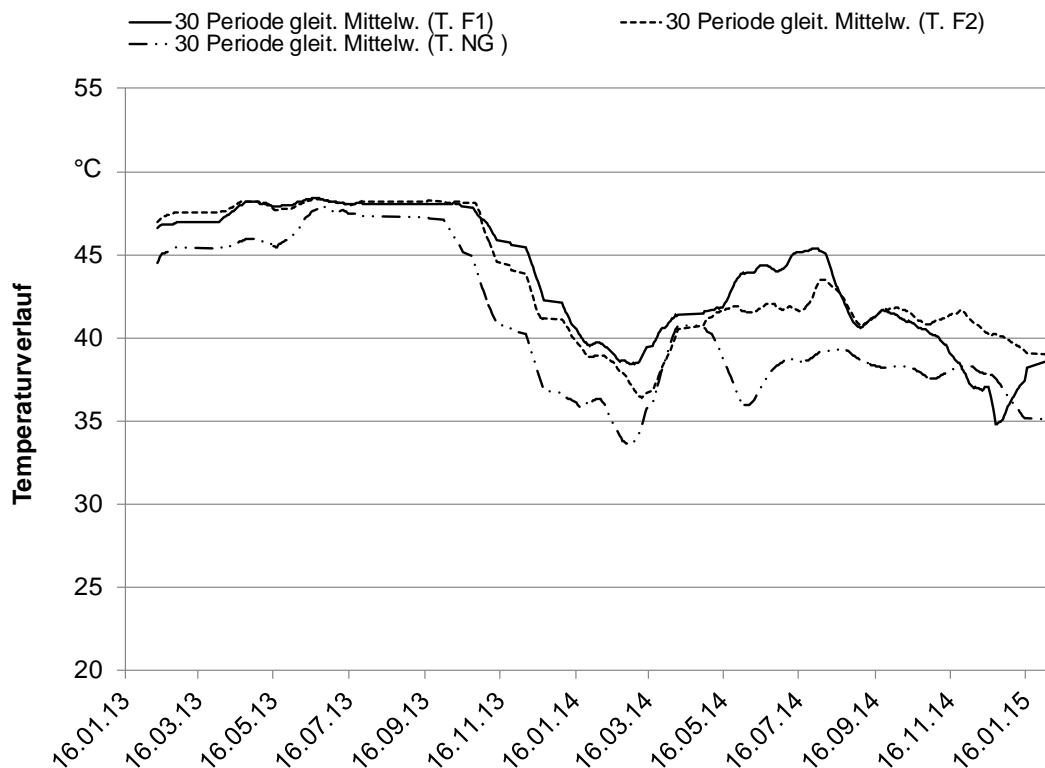


Abb. 74: Temperaturverläufe in den Gärbehältern von Pilotanlage 21 (gleitende Mittelwerte über 30 Tage)

4.1.5.3 Leistungsparameter

Entsprechend der sehr unruhigen Fütterung war auch die Stromproduktion erheblichen Schwankungen unterworfen. Im Durchschnitt produzierte das Zündstrahlaggregat im Satelliten-BHKW täglich rund 4.600 kWh Strom, wofür 77 L Zündöl und $V_N = 2.050 \text{ m}^3$ Biogas benötigt wurden. Der an der Biogasanlage betriebene Gasmotor produzierte täglich rund 5.000 kWh Strom und verbrauchte dafür $V_N = 2.830 \text{ m}^3$ Biogas. Da es sich nicht um eine Anlage handelt, die flexibel Strom liefern soll, ist davon auszugehen, dass eine möglichst hohe Stromproduktion angestrebt wurde. Dies wurde nicht erreicht, denn für eine ausreichende Brennstofflieferung an die Maschinen wären statt $V_N = 4.900 \text{ m}^3$ rund 6.800 m^3 erforderlich gewesen, die unter den beschriebenen Umständen jedoch nicht zur Verfügung gestellt werden konnten.

Dementsprechend gestalten sich die Verläufe der abgegebenen Leistung der BHKW sowie der elektrischen Arbeitsausnutzung (Abb. 75). Die Ursachen für die im Vergleich zur installierten elektrischen Leistung von insgesamt 625 kW relativ geringe erbrachte Gesamtleistung von durchschnittlich 438 kW wurden bereits erläutert. Daraus errechnet sich ein mittlerer elektrischer Auslastungsgrad von 70 %. Noch bis Winteranfang 2013 war eine durchschnittliche Arbeitsausnutzung von knapp 82 % erreicht worden.

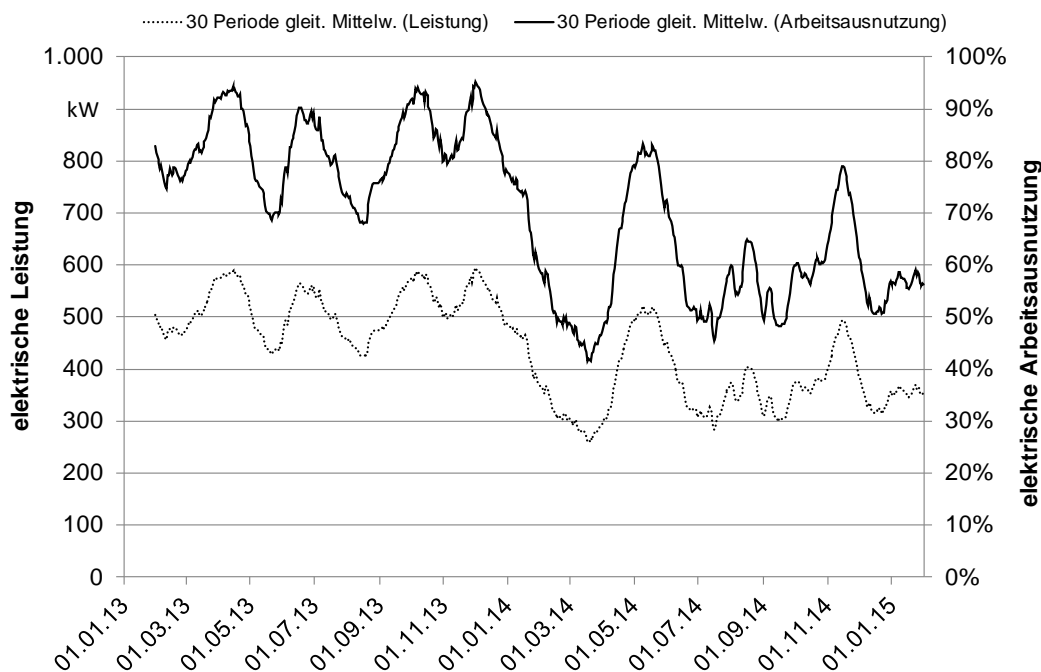


Abb. 75: Elektrische Leistung und Arbeitsausnutzung der BHKW von Pilotanlage 21

Trotz relativ häufiger Phasen, in denen die BHKW im Teillastbetrieb liefen, wurde ein elektrischer Gesamtnutzungsgrad von 37,3 % errechnet. Dabei lag das Zündstrahlaggregat mit 38,5 % um zwei Prozentpunkte höher als der Gasmotor. Naturgemäß traten auch hier starke Schwankungen auf, da an manchen Tagen die Last unter die 30 %-Marke sank (Abb. 76).

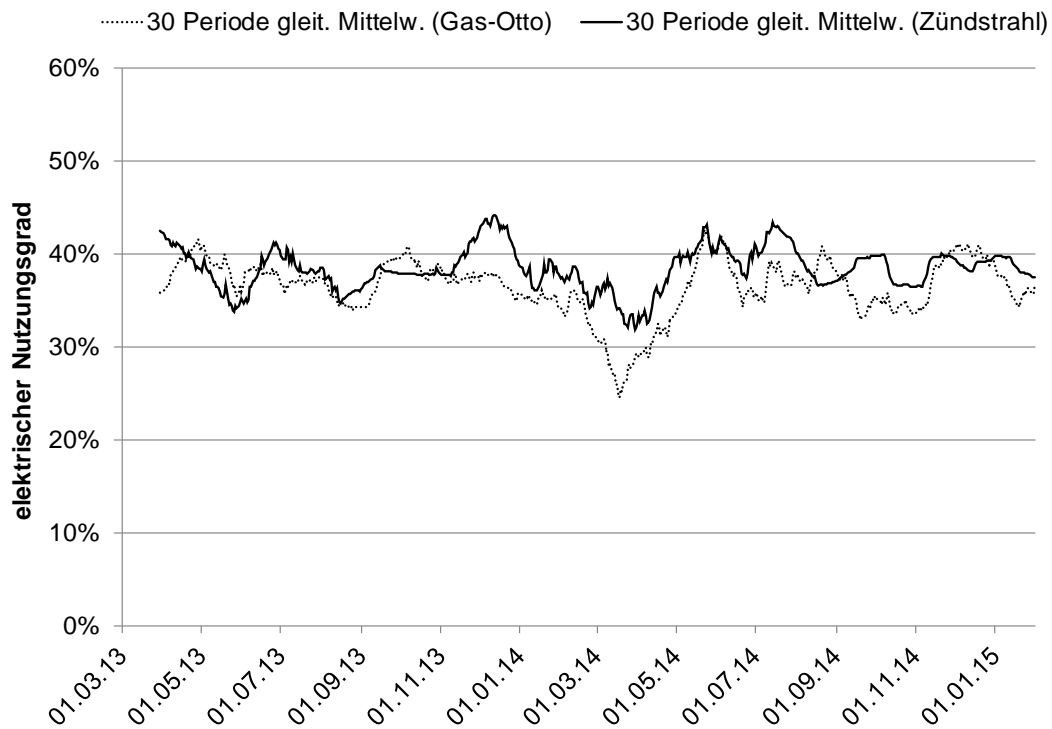


Abb. 76: Elektrische Nutzungsgrade der beiden BHKW-Motoren von Pilotanlage 21

4.2 Horizontaler Anlagenvergleich

Für den Vergleich der Anlagen untereinander werden im Wesentlichen die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelten Werte der wichtigsten verfahrenstechnischen Kennzahlen herangezogen. Weiterhin werden die Restgaspotentiale der Gärrückstände sowie die Treibhausgas- und Energiebilanzen der Betriebe dargestellt. Darüber hinaus wird ein Vergleich der „Grünland“-Pilotbetriebe ##17 bis 21 mit Pilotbetrieben aus dem vorausgegangenen Monitoring gezogen: #9 (siehe: Bachmaier et al., 2011) und ## 11 bis 16 (siehe: Ebertseder et al., 2012), um entsprechend den Zielen des vorliegenden Untersuchungsprogramms die Besonderheiten der Biogaserzeugung vom Grünland bzw. aus Ackergras herauszuarbeiten.

4.2.1 Zusammensetzung und Handhabung der Einsatzstoffe

In vier von fünf Betrieben kam Wirtschaftsdünger in Form von Rindergülle zum Einsatz, in Pilotanlage 17 wurden ausschließlich Rinder- und Geflügelmist eingesetzt. Rindermist kam ansonsten nur noch in Anlage 21 in nennenswertem Umfang zur Anwendung (Abb. 77). Alle fünf Grünland-Pilotbetriebe realisierten den Güllebonus gemäß EEG 2009, d. h. der Massenanteil von Gülle (im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002) an der Gesamtmasse der Einsatzstoffe auf Tagesbasis betrug mindestens 30 %.

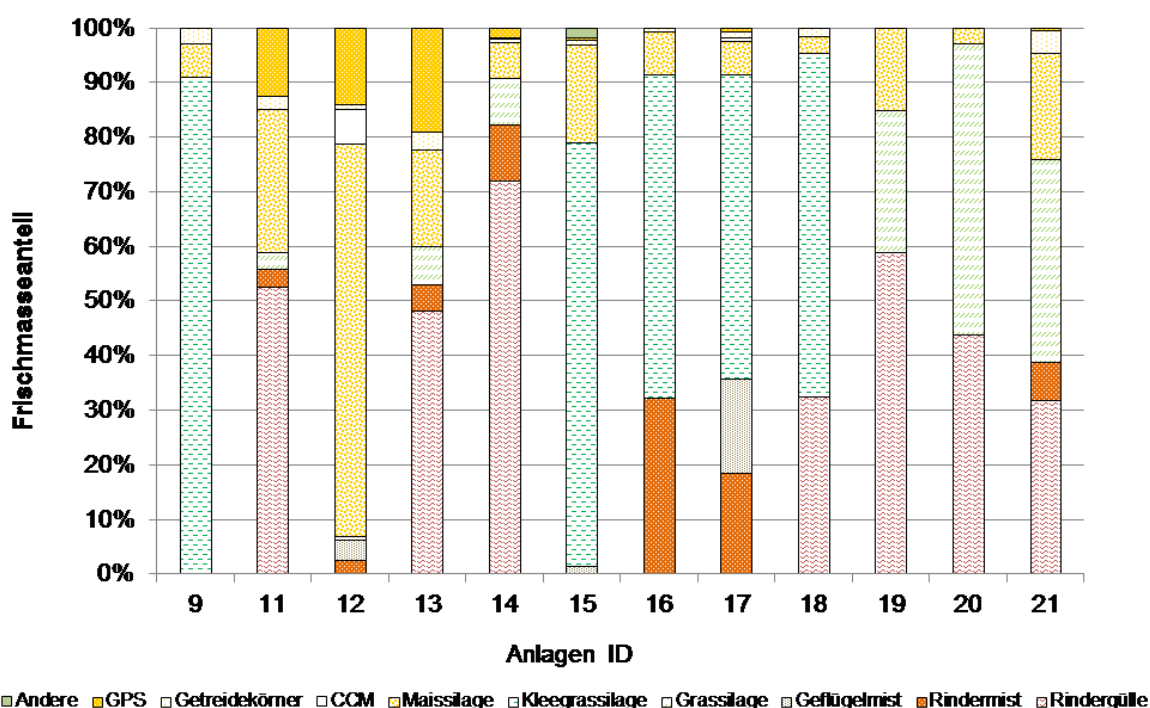


Abb. 77: Mittlere Zusammensetzung der Futterrationen für zwölf Pilot-Biogasanlagen

Gegenüber den früheren Pilotbetrieben lag der Wirtschaftsdüngeranteil der Grünland-Pilotbetriebe im Mittel lediglich um 4 % höher. „Spitzenreiter“ unter den Bayerischen Biogas-Pilotbetrieben bezüglich des Einsatzes von Wirtschaftsdünger bleibt damit Betrieb #14 mit einem Anteil von rund 82 %.

Entsprechend der Auswahlkriterien lag der entscheidende Unterschied bei den eingesetzten Anteilen von Grünlandaufwuchs oder Klee gras. Mit den ökologisch wirtschaftenden Betrieben ##9, 15 und 16 waren im vorausgegangenen Monitoring bereits drei Anlagen

vertreten, in denen deutlich mehr als 60 % Kleegrassilage eingesetzt wurden (Abb. 77). Betrieb 9 erreichte mit einem Anteil von rund 91 % Kleegrassilage an den pflanzlichen Einsatzstoffen – ohne Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger – den höchsten Wert aller hier betrachteten Betriebe. In den aktuellen Betrieben #19 und #21 wurde der Schwellenwert von 60 % Anteil Grasbiomasse an der Gesamtmasse der pflanzlichen Einsatzstoffe hingegen nur knapp überschritten. Dort war der Anteil an Mais deutlich höher als in den übrigen Grünland-Betrieben. Die höchsten Anteile von Grassilage am Gesamtinput, die in beiden Fällen ausschließlich aus Klee gras bestanden, wiesen nach den Betrieben 9 und 15 die Biobetriebe 17 (56 %) und 18 (63 %) auf. Für die weitere Diskussion der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Anlagen ##9, 15 und 16 speziell für den Vergärungsprozess ohne Gülleeinsatz konzipiert wurden, während die Pilotanlagen #17 und #18 eine konventionelle Anlagentechnik aufweisen.

Mit Ladewagentechnik geborgenes und nicht zusätzlich gehäckseltes Gras wurde nur von Pilotanlage 20 eingesetzt. In den beiden übrigen Betrieben lag der am Gesamtinput gemessene Grasanteil lediglich bei 26 % (#19) bzw. 37 % (#21), was im Wesentlichen auf nicht ausreichend vorhandene Grünlandflächen zurückzuführen war.

Auf Basis der Substratzusammensetzung lassen sich die elf hier betrachteten Biogasbetriebe grob in drei Gruppen einteilen: (1) Kovergärung von Stärkepflanzen mit tierischen Wirtschaftsdüngern: ##11,13; (2) Kovergärung von Klee gras mit tierischen Wirtschaftsdüngern: ##16-18; (3) Kovergärung von Grünlandaufwuchs mit tierischen Wirtschaftsdüngern: ##19-21. Die Anlagen ##9, 12, 14 und 15 stellen dann Sonderfälle dar.

4.2.2 Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit

Unter den Grünlandbetrieben wies Betrieb 17 mit $4,3 \text{ kg m}^{-3}$ die höchste mittlere Raumbelastung der ersten Gärstufe mit organischer Trockensubstanz auf (Abb. 78). Zugleich können die Einsatzstoffe in diesem Betrieb aufgrund des hohen Stickstoff- und Trockensubstanzgehalts als schwierig für die Vergärung gelten. Die erste Stufe von Pilotanlage 21 war zwar zu Beginn des Untersuchungszeitraums, als dort ein zufriedenstellender Auslastungsgrad vorlag, leicht höher belastet, aufgrund der in Kapitel 4.1.5 erläuterten Umstände sank die Raumbelastung jedoch dann auf einen mittleren Wert von $3,3 \text{ kg m}^{-3}$. Gering belastet waren die Hauptgärbehälter von #19 und #20. Bei Anlage 19 ist dies auf die gewachsene Struktur der relativ alten Anlage zurückzuführen, die mittlerweile über ein sehr großzügiges spezifisches Faulraumvolumen verfügt. Bei Anlage 20 wurden die Prozessstörungen als Ursache für die niedrige Belastung ausgemacht, da wegen dieser die Futtermenge immer wieder zurückgenommen werden musste.

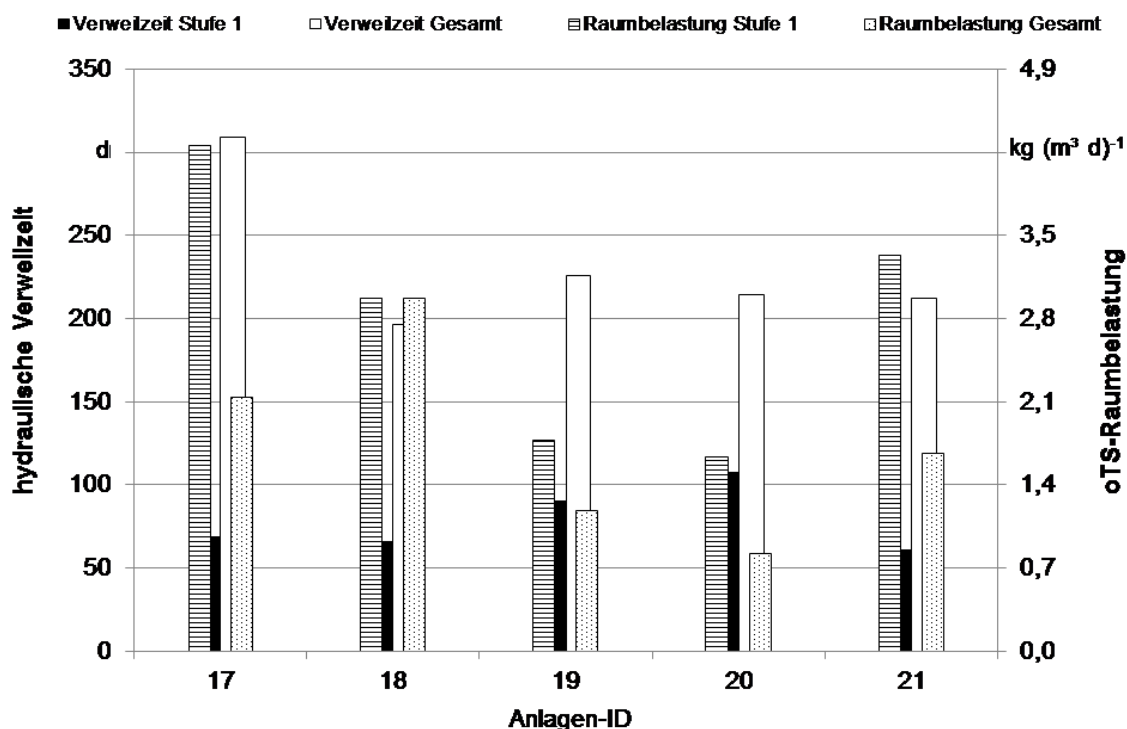


Abb. 78: Kennwerte zur organischen Raumbelastung und hydraulischen Verweilzeit der Pilotanlagen

Die organische Belastung des Fermentersystems (inklusive Nachgärer) lag bei drei der Grünland-Anlagen (19, 20 und 21) unter $1,5 \text{ kg m}^{-3}$ und damit in einem sehr extensiven Bereich, in dem keine biologischen Probleme zu erwarten sind. Die Gesamtanlagen der Betriebe 17 und 18 waren mit durchschnittlich $2,2$ bzw. $3,1 \text{ kg m}^{-3}$ deutlich höher, aber keinesfalls außergewöhnlich hoch belastet (Tab. 9).

Tab. 9: Mittlere Belastung mit organischer Trockenmasse für zwölf Pilotanlagen (Angaben in $\text{kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$). Von links nach rechts aufsteigend sortiert hinsichtlich Hauptfermenterbelastung (oben) bzw. Gesamtbelastung (unten); Anlagen mit Einsatz von Klee-grassilage schraffiert

Anlagen ID	20	19	14	13	12	18	21	17	9	15	16	11
Hauptfermenter	1,6	1,8	2,3	2,9	3,0	3,0	3,3	4,3	4,5	4,8	5,4	5,8
Anlagen ID	20	13	19	14	16	21	12	17	9	11	18	15
Fermentersystem	0,8	1,1	1,2	1,2	1,5	1,7	2,0	2,1	2,2	2,5	3,0	4,8

Die Pilotanlagen 2012 wurden mit einer Gesamtraumbelastung von $1,1$ bis $4,8 \text{ kg m}^{-3}$ (Durchschnitt: $2,2$) bzw. einer Hauptfermenterbelastung von $2,3$ bis $5,8 \text{ kg m}^{-3}$ (Durchschnitt: $4,0$) betrieben. Insgesamt ist für die elf betrachteten Pilotanlagen kein klarer Zusammenhang zwischen der Substratzusammensetzung und der organischen Raumbelastung erkennbar. In der Tendenz weisen die Anlagen mit Kovergärung von Klee-gras/tierischen Wirtschaftsdüngern höhere Raumbelastungen der ersten Stufe auf, diejenigen mit Kovergärung von Grünlandaufwuchs/tierischen Wirtschaftsdüngern niedrigere.

Die mittlere Verweilzeit in der ersten Stufe der Grünland-Pilotanlagen wies einen Wertebereich von 66 d für Anlage 18 bis 107 d für Anlage 20 auf. Die hydraulische Verweilzeit im gesamten gasdichten System lag bei vier Anlagen im Mittel zwischen ca. 200 und 230 d, nur Anlage 17 fiel hier mit über 300 d aus dem Rahmen. Im Vergleich mit den Pilotanlagen 2012 weisen die Grünlandbetriebe lange Verweilzeiten auf. Die mit Abstand längsten Gesamtverweilzeiten haben Anlagen 16 und 17 mit hohem Klee grasanteil und ohne Gülleeinsatz (Tab. 10).

Tab. 10: Mittlere hydraulische Verweilzeit in Tagen für zwölf Pilotanlagen, von links nach rechts aufsteigend sortiert hinsichtlich der Verweilzeit im gasdichten System (Anlagen mit Einsatz von Klee grassilage schraffiert)

Anlagen ID	15	14	9	11	13	18	12	21	20	19	17	16
Hauptfermenter	63	53	64	35	75	66	104	61	107	90	69	48
Gasdichtes System	63	106	131	192	196	197	207	212	214	226	309	314

4.2.3 Methanausbeute aus den Einsatzstoffen und Methanproduktivität

Die Methanausbeute (Standardbedingungen) aus der eingetragenen Frischmasse fiel bei den Anlagen 12, 15, 16 und 17 am höchsten aus, da dort keine Gülle eingesetzt wurde. Anlage 12 mit 94 % Anteil von Stärkepflanzen in der Futterration sticht einsam heraus (Tab. 11).

Tab. 11: Methanausbeuten (Standardbedingungen) aus der Gesamtmenge der Einsatzstoffe für zwölf Pilotanlagen (Anlagen mit Einsatz von Klee grassilage schraffiert)

Anlagen ID	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Aus der FM, m ³ t ⁻¹	89	63	129	74	38	80	80	84	70	53	49	70
Aus der oTM, m ³ t ⁻¹	311	320	415	341	332	290	340	286	366	320	281	348

Ansonsten gilt: Je höher der Gülleanteil, desto niedriger die Methanausbeute aus der FM. Für die elf Pilotanlagen beträgt das Verhältnis zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert der Methanausbeute aus der Frischmasse ca. 3,4.

Für die Methanausbeute aus der eingetragenen organischen TM beträgt dieses Verhältnis nur ca. 1,5. Methanausbeuten aus der oTM unter 300 m³ t⁻¹ wurden in den Anlagen mit hohen Anteilen vergleichsweise schwer abbaubarer Einsatzstoffe in Form von strohreinem Rinder-Festmist (#17) bzw. langfaseriger Grassilage (#20) gemessen. In diesen beiden Biogasanlagen traten auch erhebliche Prozessstörungen auf (vgl. Kapitel 4.1.1 und 4.1.4). Auch Anlage #15 wies eine niedrige Methanausbeute aus der oTM auf, was in diesem Fall auf die sehr kurze hydraulische Verweilzeit zurückzuführen ist und den Spitzenwert für die Restmethanausbeute aus dem Gärrest dieser Anlage bestätigt. Lässt man Anlage #12 außen vor, erzielte Betrieb 18 die nominal höchste Biogasausbeute aus der oTM, was jedoch nicht statistisch abgesichert werden kann.

Das Institut für Tierernährung führte im Rahmen des Projektes ein Silo-Controlling durch, um die Qualität der auf den Betrieben erzeugten Silagen anhand von Probenahmen und Messungen vor Ort zu beurteilen. Untersucht wurden die Temperatur und Dichte der Silage an der Siloanschnittfläche, wichtige Gärparameter (pH-Wert, Gehalt an Milch-/Butter-/Propion-/Essigsäure in der TM, Ammoniak-N-Anteil am Gesamt-N und aerobe Stabilität) sowie Keimzahlen. Die Ergebnisse des Silo-Controllings sind in einem separaten Berichts-

teil dargestellt (Ostertag & Rößl, 2015). Kurz gefasst wurden anhand der Gärparameter in folgenden Fällen Probleme mit der Qualität der (Klee)Grassilagen festgestellt: #17 in 2012; #18 in 2013; #20 in 2014; #21 in 2012 und teilweise in 2014. Bei Betrieb #20 fiel auf, dass die Grassilage deutlich zu trocken war und eine zu geringe Dichte hatte. Dies war sicherlich eine wichtige Ursache für die großen technischen Probleme in dieser Anlage. Klare Zusammenhänge zwischen einer mangelhaften Silagequalität und den beobachteten gärbiologischen Störungen können anhand der Datenlage insgesamt nicht nachgewiesen werden.

Der mittlere CH₄-Gehalt im Biogas war in den beiden Grünland-Anlagen mit Einsatz von Kleegrassilage mit 53,1 bzw. 53,9 % am höchsten. In den drei Anlagen mit Grassilage wurden hingegen während des gesamten Beobachtungszeitraums niemals Methangehalte über 53 % gemessen.

Bezüglich der Methanproduktivität des Fermentersystems wiesen vier der Anlagen mit den höchsten Gülleanteilen Werte von unter 0,4 m³ (m³ d)⁻¹ auf: ##19, 13, 14, 20 (Tab. 12). Anlage 11 erzielte trotz mehr als 50 % Gülleanteil einen doppelt so hohen Wert, der sich allerdings relativiert, wenn man berücksichtigt, dass diese über ein sehr großvolumiges Gärrestlager mit Gaserfassung verfügt. Der „einsame Spitzenwert“ der Methanproduktivität von Anlage 15 ging eindeutig zu Lasten der Methanausbeute. Bemerkenswert ist die hohe Produktivität des einstufigen Systems von Anlage 18. Anlage 16 verfügt zwar über einen hoch belasteten liegenden Hauptfermenter, diesem ist aber ein großvolumiger Rührkesselfermenter nachgeschaltet, so dass die Gesamtproduktivität bescheiden ausfällt.

Tab. 12: Methanproduktivität (Standardbedingungen) des Fermentersystems von zwölf Pilotanlagen, von links nach rechts aufsteigend sortiert

Anlagen ID	20	14	13	19	16	21	17	9	11	12	18	15
m ³ (m ³ d) ⁻¹	0,23	0,35	0,38	0,39	0,5	0,58	0,61	0,68	0,80	0,84	1,1	1,4

4.2.4 Restmethanpotential in den Gärresten

Die Proben zur Bestimmung des Restmethanpotentials der Gärückstände aus den Pilotanlagen wurden am Ablauf der letzten Vergärungsstufe, jeweils in den Wintermonaten des Messprogramms entnommen. Innerhalb der Projektlaufzeit waren deshalb maximal drei Untersuchungen möglich.

Trotz der relativ hohen Anteile an flüssigem Wirtschaftsdünger, wiesen bis auf eine Ausnahme alle untersuchten Biogasanlagen lange hydraulische Verweilzeiten von mehr als 120 Tagen auf. Die vergleichsweise kurze Verweilzeit in Anlage 18 ist auf das Fehlen eines Nachgärbehälters zurückzuführen. Die Probe zur Bestimmung des Restgaspotentials wurde bei #18 demnach am Ablauf der letzten Vergärungsstufe, also am Überlauf vom Fermenter in das Gärrestlager entnommen. Für Anlage 19 und 21 war am Tag der Probenbeschaffung für die dritte Untersuchung (2014) keine Entnahme aus den Nachgärbehältern möglich (Vakuumfass nicht verfügbar bzw. Pumpendefekt), weshalb nur Ergebnisse aus zwei Untersuchungsjahren vorliegen. Die ersten Proben zur Gärrestanalyse von Anlage 17 und 18 wurden versehentlich am Ablaufhahn entnommen, der nach der Einrichtung zur Temperaturbehandlung positioniert ist. Dieser Irrtum brachte interessante Erkenntnisse bezüglich des Effekts einer Temperaturbehandlung auf die Bakterienaktivität, da die ermittelten Potentiale nach dem Kocher nur 23 % bzw. 39 % der ermittelten mittleren Potentiale aus den Folgejahren betragen.

Das Spektrum der für die Gärrückstände der einzelnen Betriebe ermittelten Methanerträge aus einer Tonne Originalsubstanz ist weit und reicht von $V_N = 1,0$ bis $11,7 \text{ m}^3$. Dabei wiesen die Proben gleicher Anlagen aus verschiedenen Jahren keine großen Unterschiede auf. Die Betriebe #19 und #20 zeigten mit durchschnittlich $2,7$ bzw. $1,2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ je Tonne Originalsubstanz die geringsten Restmethanpotentiale. Anlage 20 zeigte in allen Jahren das niedrigste Restmethanpotential im Gärrückstand. Als Gründe hierfür sind die sehr hohe hydraulische Gesamtverweilzeit von im Mittel ca. 220 d als Folge der Fütterungsunterbrechungen bzw. des hohen Anteils an Rindergülle in der Futtermischung anzuführen (vgl. Abb. 60). Die ebenfalls im Vergleich noch niedrigen Restmethanpotentiale in Gärrückständen aus Anlage 19 können auf die stets stabile Gärbiologie sowie den hohen Anteil an Rindergülle in der Futtermischung zurückgeführt werden.

In den Betrieben 17 und 18 waren in den Jahren 2013 und 2014 die Restmethanpotentiale in Gärrestproben um bis zu eine Größenordnung höher als für Betrieb 20 (Abb. 79). Hier machen sich die wiederholten längeren Phasen mit Prozesshemmungen bemerkbar. Pilotanlage 18 ist zudem einstufig und weist mit 66 Tagen eine deutlich geringere hydraulische Verweilzeit im Fermentersystem auf als die übrigen Anlagen. Mögliche Gründe für das vergleichsweise ebenfalls hohe Restmethanpotential der Gärreste aus Anlage 21 finden sich dem vergleichsweise „unruhigen“ Betrieb mit stark variierender Raumbelastung und Futterzusammensetzung sowie Schwankungen der Prozesstemperaturen.

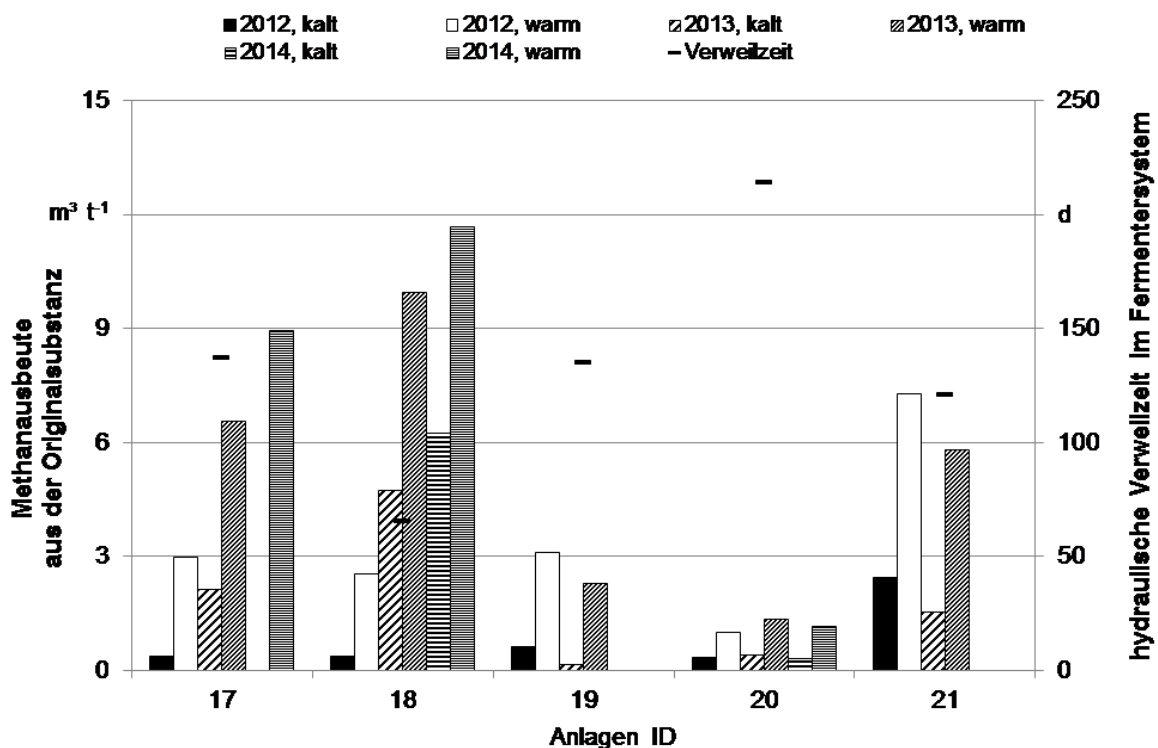


Abb. 79: Mittlere hydraulische Verweilzeiten im Fermentersystem und Restmethanpotentiale der Gärrückstände aus zwei/drei Untersuchungsjahren („kalt“: Gärtests bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$; „warm“: Gärtests bei $37 \text{ }^\circ\text{C}$; *) Proben nach Temperaturbehandlung im Kocher)

Die Ergebnisse für das Restgaspotential bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ spiegeln im Groben die Verhältnisse bei den „warmen“ Gärtests wider (Abb. 79). Im Mittel betragen die Werte der $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Varianten rund 30% der $37 \text{ }^\circ\text{C}$ Varianten. Bei Anlage 18 fällt auf, dass der Unterschied zwischen den kalten und warmen Restmethanpotentialen in den Jahren 2013 und 2014 gering-

ger war, als für die übrigen Anlagen. Der Grund hierfür erscheint nicht klar. Bei Anlage 19 war dieser Unterschied – zumindest in 2013 – am stärksten ausgeprägt. Hier kann als Erklärung die thermophile Prozessführung in den Gärbehältern herangezogen werden, die einen größeren Temperaturschock auf die Biozönose im Gärtest bedeutet.

Aus dem pro t Originalsubstanz des Gärrestes erzielten Methanertrag im warmen Gärtest kann das anteilige Restmethanpotential im Vergleich zur erzielten Methanausbeute aus den Einsatzstoffen als ein Maß für die Abbaueffizienz berechnet werden. Hier schnitten die Grünlandbetriebe im Vergleich zu den Pilotbetrieben 2012 insgesamt auffällig gut ab (Tab. 13). Anlagen ##11, 14 und 15 stechen diesbezüglich negativ heraus. Auf eine Darstellung des anteiligen Potentials der kalten Tests wurde verzichtet, da bis auf #20 alle Pilotanlagen über ein Gärrestlager mit Gaserfassung verfügten.

Tab. 13: Anteilige Methanausbeute aus den Gärresten im Gärtest bei 37 °C im Vergleich zur gemessenen Methanausbeute aus der eingetragenen Frischmasse (Mittelwert aus einer bis drei Bestimmung(en)) für zwölf Pilotanlagen

Anlagen ID	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
%	2,2	9,4	3,9	5,7	11,9	12,7	4,2	4,0	6,7	1,8	1,0	4,1

4.2.5 Elektrische Arbeitsausnutzung

Bezüglich der Auslastung der installierten elektrischen Leistung ergibt sich für die fünf Grünland-Pilotbetrieb ein uneinheitliches Ergebnis, das insgesamt schlechter ausfällt als für die vormals untersuchten Pilotbiogasanlagen (Ebertseder et al. 2012). An drei von fünf Betrieben wurden die BHKW im Mittel nur zu 80 % oder weniger ausgelastet, für die Pilotanlagen 2012 hatte sich als niedrigster Wert eine gesamte Arbeitsausnutzung von ca. 86 % ergeben (Tab. 14). Durchschnittlich erzielten die Grünland-Pilotanlagen eine elektrische Arbeitsausnutzung von 77 %, die Pilotanlagen 2012 erreichten durchschnittlich 92,8 %.

Tab. 14: Mittlere elektrische Arbeitsausnutzung der BHKW für zwölf Pilotanlagen

Anlagen ID	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
BHKW 1	91,7	90,2	97,7	92,8	91,5	86,4	97,1	90,7	89,6	94,4	58,8	67,9
BHKW 2	-	-	97,4	78,0	97,5	-	-	88,6	-	25,0	-	73,0
Gesamt	91,7	90,2	97,3	91,0	94,6	86,4	97,1	90,5	89,6	76,0	58,8	70,2

An Betrieb 19 täuscht der Mittelwert insofern, als das kleinere der beiden BHKW (Nennleistung = 37 kW) zur überwiegenden Zeit der Untersuchung nur zum Abfangen von Spitzen in der Gasproduktion verwendet wurde, da die Rohstoffe für einen Volllastbetrieb beider BHKW nicht ausreichten. Allerdings beschied das gute Erntejahr 2014 diesem Betrieb einen so reichlichen Substratvorrat, dass der kleine Motor in den letzten drei Monaten der Datenaufnahme auch zu über 90 % ausgelastet werden konnte. Für die schlechte BHKW-Auslastung der Betriebe 20 und 21 waren Prozessstörungen bzw. Substratmangel verantwortlich (vgl. Kap. 4.1).

Umso erfreulicher sind die Ergebnisse der Betriebe 17 und 18. Trotz des Einsatzes schwer zu verarbeitender Ausgangsmaterialien und daraus resultierenden ungünstigen Bedingungen für den Biogasprozess erreichte #17 mit einer Auslastung von 90,5 % das beste Ergebnis unter den „Grünland“-Pilotbetrieben. Nicht minder positiv zu bewerten ist das Er-

gebnis von #18, welcher den größten Gesamtinput bezogenen Grasanteil aufwies, bei dem ebenfalls über einen längeren Zeitraum (8 Monate) ungünstige Prozessbedingungen vorlagen, und bei dem das BHKW dennoch zu 90 % ausgelastet werden konnte.

Abb. 84 zeigt für elf Pilotanlagen die elektrische Arbeitsausnutzung aufgetragen über der spezifischen installierten Leistung je Kubikmeter Gärraum nach Effenberger et al. (2008). In dieser Darstellung – ohne Berücksichtigung einer flexiblen Biogasverstromung – gruppieren sich die fünf „Grünland“-Pilotanlagen im Vergleich zu den Pilotanlagen 2012 deutlich im „Problembereich“. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch eine nicht ausreichende elektrische Arbeitsausnutzung trotz moderater spezifischer installierter Leistung.

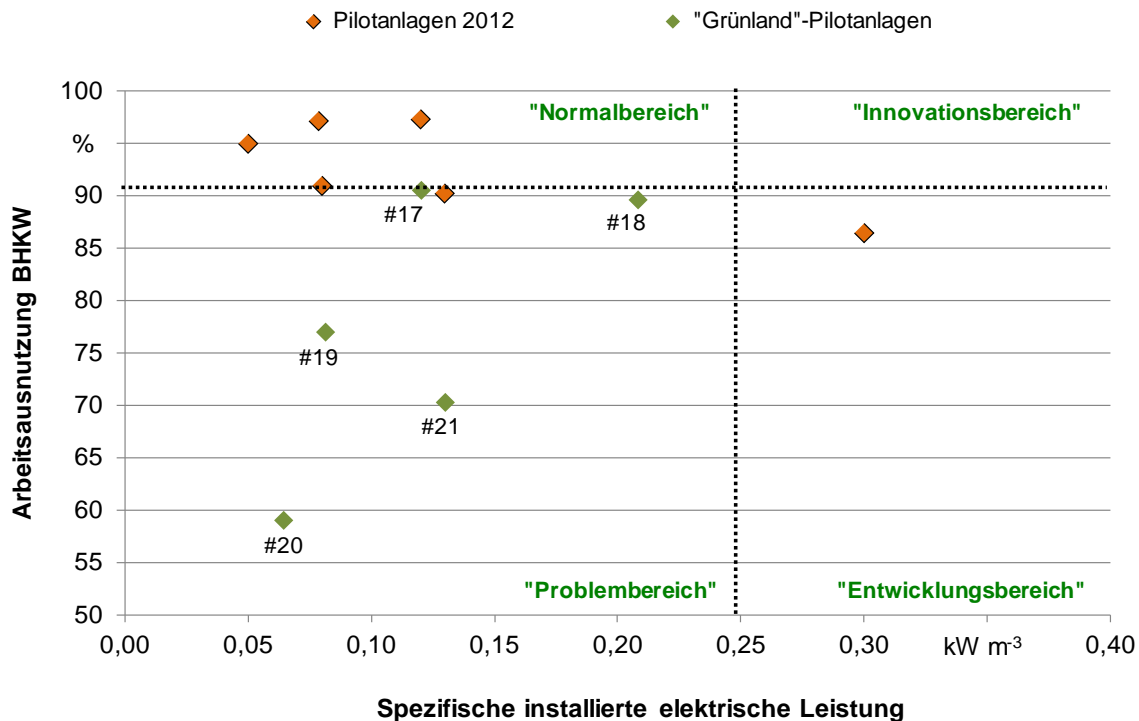


Abb. 80: Mittlere erreichte elektrische Arbeitsausnutzung aufgetragen gegen die spezifische installierte elektrische Leistung für die „Grünland“-Pilotanlagen im Vergleich zu den sechs Pilotanlagen aus dem Monitoring von 2010 bis 2012. Darstellung nach Effenberger et al. (2008)

Anlagen 17 und 18 kommen bei deutlich unterschiedlicher spezifischer installierter elektrischer Leistung an der Grenze zum Normalbereich zu liegen. Anlagen 19, 20 und 21 finden sich im „Problembereich“, was – wie oben im Detail dargestellt – für #20 im ineffektiven Gärprozess, für #19 in einer Kombination aus gärbiologischen und Management seitigen Problemen und für #21 in planerischen und Managementfehlern begründet ist.

4.2.6 Energieverwertung

Der spezifische Strombedarf je Tonne eingetragene Frischmasse ist für ##9, 12, 15, 20 und 21 deutlich höher als bei den übrigen Betrieben (Tab. 15). Dies ist offenbar nicht in erster Linie den Einsatzstoffen geschuldet, sondern den Anlagenkonzepten: #9 wird über einen externen Wärmetauscher beheizt und verfügt über ein leistungsstarkes, kontinuierlich laufendes Zentralrührwerk; ##12 und 21 weisen jeweils drei Gärbehälter mit energieintensiver Durchmischung auf, letztere zusätzlich ein Heizsystem mit externem Wärmetauscher; #15 arbeitet mit kontinuierlich betriebenen Paddelrührwerken bei sehr hohen

TM-Gehalten im Gärgemisch; und bei #20 war die vorhandene Rührtechnik nicht an das schwierige Substrat angepasst.

Dieser Umstand wird für Anlage 12 relativiert, wenn das Verhältnis von Strombedarf und Stromerzeugung betrachtet wird. Wegen der vergleichsweise hohen Energieausbeute aus den Einsatzstoffen liegt die Anlage mit einem Verhältnis von Stromerzeugung/-verbrauch von ca. 9 (anteiliger Eigenstrombedarf = 11 %) im Mittelfeld. In Anlage #21 wurden hingegen je kWh Verbrauchsstrom lediglich knapp 7 kWh Strom produziert (anteiliger Eigenstrombedarf = 14,5 %). Einen noch ungünstigeren Wert erreichte mit 17,6 % anteiligem Eigenstrombedarf (weniger als 6 kWh Stromerzeugung je 1 kWh Stromverbrauch) Anlage 20. Hierfür können der hohe Strombedarf für die Durchmischung des langfasrigen Substrats in Verbindung mit den durch Biogasmangel verursachten langen Teillastphasen des BHKW verantwortlich gemacht werden. Deutlich ökonomischer arbeiteten die übrigen drei „Grünland“-Pilotanlagen mit Werten für den anteiligen Eigenstrombedarf von unter 8 % (Tab. 15). Diese Werte können auch im Vergleich zu den früheren Pilotbetrieben als günstig gelten. Diese hatten einen anteiligen Eigenstrombedarf von 8,3 bis 16,2 %. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Stromverbrauch auch bei der Grasvergärung durch den Einsatz weniger aber effektiver Komponenten niedrig gehalten werden kann (##17, 18 und 19).

Tab. 15: Mittlere Werte für den spezifischen Strombedarf und für den anteiligen Wärme-/Strombedarf von zwölf Pilotanlagen

Anlagen ID	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Spezif. Strombedarf, kWh t ⁻¹	61,2	18,4	50,0	26,4	11,8	40,3	28,3	24,0	16,3	14,5	33,8	37,7
Eigenstrombedarf, %	16,2	8,3	11,0	10,5	9,9	11,4	9,2	6,6	5,6	7,3	17,6	14,5
Eigenwärmebedarf, %	4,4	34,4	7,7	35,8	30,5	7,3	15,0	12,7	20,6	42,6	25,2	14,5

Der größte Stromverbraucher war die Rührtechnik mit durchschnittlich 67 % Anteil am Strombedarf der Biogasanlagen ##17 bis 21 (Abb. 81). Der Verbrauch der Eintragsvorrichtungen für feste Substrate spielte mit Ausnahme von #20 eine untergeordnete Rolle, allerdings gab es in dieser Anlage keine Förderpumpe als zusätzlichen Stromverbraucher. Das Pumpen benötigte mit einem Anteil von im Mittel 6 % nur unwesentlich mehr Strom, als die für den BHKW-Betrieb erforderlichen Gasverdichter (5 %). Sonstige Verbraucher, zu denen das BHKW gehört, benötigten durchschnittlich 19 % des gesamten bezogenen Stroms (Abb. 81). Für die Pilotanlagen 2012 liegen keine im Detail vergleichbaren Werte für die Aufteilung des Strombedarfs vor.

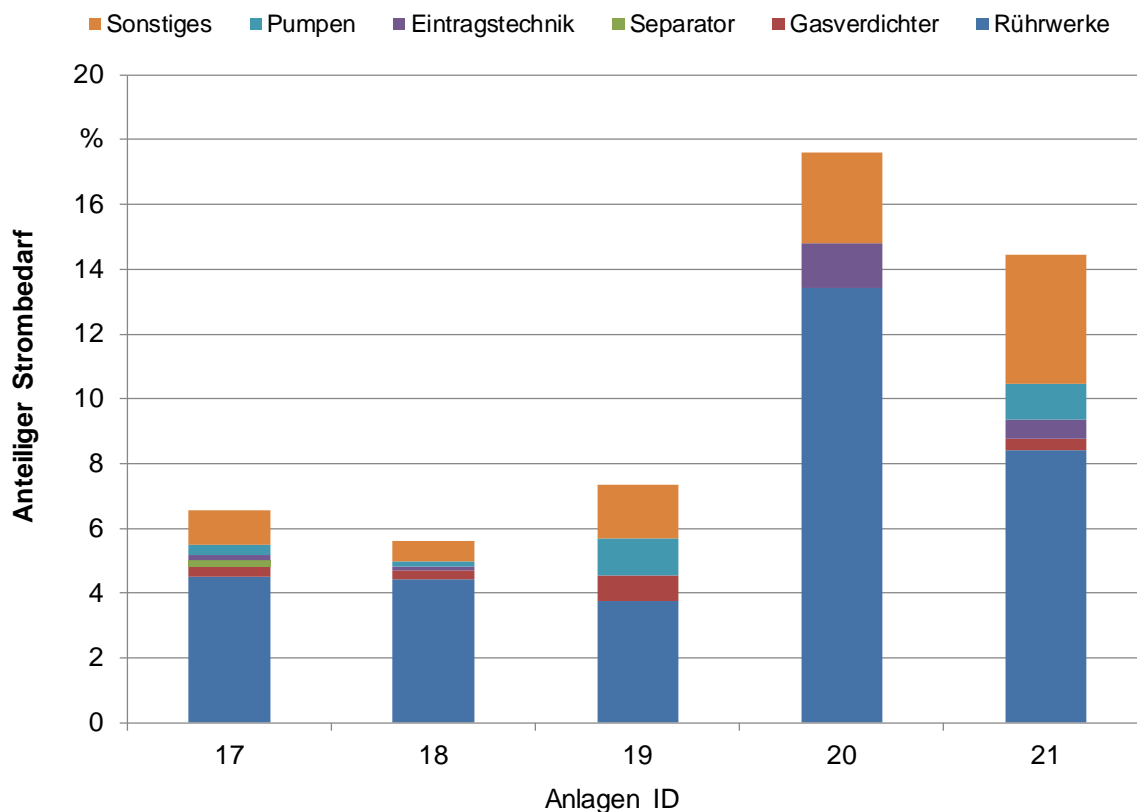


Abb. 81: Aufteilung des Strombedarfs der Biogasanlagen auf die wichtigsten Anlagenkomponenten

Der anteilige Wärmebedarf für die Beheizung der Gärbehälter der Biogasanlagen hängt stark vom Anteil flüssiger Wirtschaftsdünger am Substratmix ab, da mit der Gülle ein großer Anteil von Wasser erwärmt werden muss. Entsprechend wiesen die Anlagen ohne Gülleeinsatz ##9 und 17 den geringsten und #19 mit dem größten Gülleanteil den höchsten anteiligen Wärmebedarf auf (Tab. 15). Auffällig niedrig ist speziell der anteilige Wärmebedarf von Anlage #9, welcher dem wärmetechnisch optimal dimensionierten stehenden Hauptgärbehälter zuzuschreiben ist. Generell hatten alle hier zu vergleichenden Anlagen mit einem Gülleanteil deutlich über 1/3 einen Eigenwärmebedarf von über 25 %: ##11, 13, 14, 19 und 20.

Tab. 16: Anteiliger Wärmeabsatz und Methannutzungsgrad von zwölf Pilotanlagen

Anlagen ID	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ant. Wärmeabsatz, %	9	48	56	49	69	76	85	23	68	39	92	30
Methannutzungsgrad, %	47	48	48	54	59	70	65	53	68	49	87	53

Zu den Werten für den anteiligen Wärmeabsatz und den Methannutzungsgrad in Tab. 16 ist festzuhalten, dass hier – im Unterschied zur Bilanzierung der THG-Emissionen und des KEV (vgl. Kap. 3.7/4.2.7) – nicht nach der Art der Wärmenutzung unterschieden, sondern die gesamte außerhalb der Biogasanlage genutzte Wärmemenge angesetzt wurde. Betrieb #20 erzielte als einziger einen vollständigen Absatz der überschüssigen BHKW-Wärme

durch Einspeisung in ein von ihm selbst errichtetes Nahwärmenetz. Auch die Betriebe 15 und 16 speisen in ein Nahwärmenetz ein, dessen Bedarf deutlich über der Wärmeleistung des BHKW liegt. Betriebe ##12, 14, 17 und 18 betreiben mangels anderer Wärmesenken Trocknungsanlagen für unterschiedliche Güter.

4.2.7 THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas

Mit dem ‚THG-Rechner‘ wurden für die Biogasketten der fünf Grünland-Pilotbetriebe die Massen an THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten und der KEV in Primärenergieeinheiten für das Jahr 2013 berechnet (Tab. 17).

Tab. 17: Berechnete THG-Emissionen und KEV für die Biogasketten der Grünland-Pilotbetriebe im Jahr 2013

Anlagen ID	17	18	19	20	21
Masse CO ₂ -Äquivalente, kg	879.314	899.166	427.691	220.299	2.186.333
KEV, kWh	831.092	738.769	429.376	312.892	2.681.641

Fasst man die THG-Emissionen bzw. den KEV für die Biogasketten in die beiden Bereiche Substratbereitstellung und Biogasproduktion/-verwertung zusammen, so zeigt sich, dass in vier von fünf Betrieben die CO₂-Äquivalente mit einem Anteil von 63 bis 69 % überwiegend aus der Substratbereitstellung stammen. Der weitaus überwiegende Anteil des KEV hingegen entsteht bei vier von fünf Betrieben mit 68 bis 82 % im Bereich Biogasproduktion/-verwertung (Abb. 82).

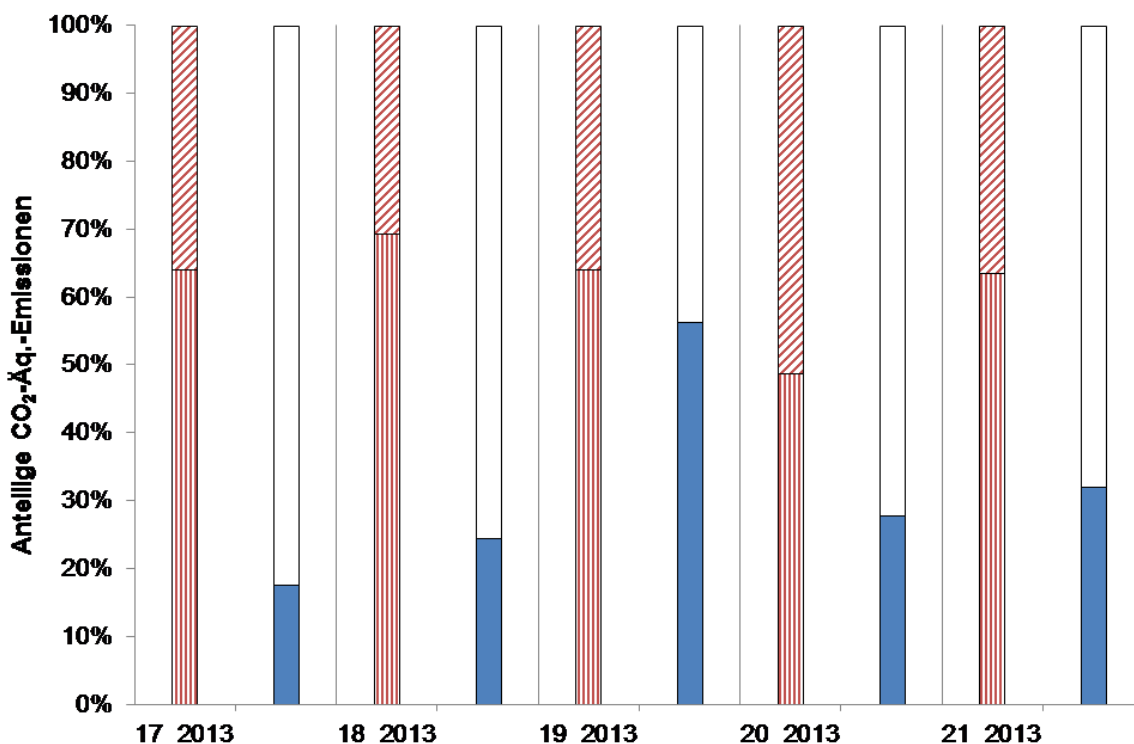


Abb. 82: Aufteilung der CO₂-Äquivalente (schraffierte Säulen) und des KEV (ausgefüllte Säulen) auf die beiden Prozessbereiche Substratbereitstellung (untere Säulenabschnitte) und Biogasproduktion/-verwertung (obere Säulenabschnitte)

Eine Aufgliederung der Substratbereitstellung zeigt für alle Betriebe die große Bedeutung von Lachgas sowie gegebenenfalls der Bereitstellung von Mineraldünger für die berechneten CO₂-Äq.-Emissionen (Abb. 83). Die kumulierten CO₂-Äquivalente aus diesen Quellen machen in den hier untersuchten Fällen ungefähr die Hälfte der gesamten THG-Emissionen aus. Im Bereich Biogasproduktion/-verwertung ist entweder der Methanschluß des BHKW oder der Strombezug aus dem Netz die dominierende Quelle für CO₂-Äquivalente. Eine offene Gärrestlagerung kommt gegebenenfalls als bedeutende Quelle hinzu. Im vorliegenden Fall wurde diese Emissionsquelle nur für Anlage #20 berücksichtigt. Mögliche Methanemissionen aus dem zweiten, kleinen Gärrestlager von Anlage #21 wurden vernachlässigt.

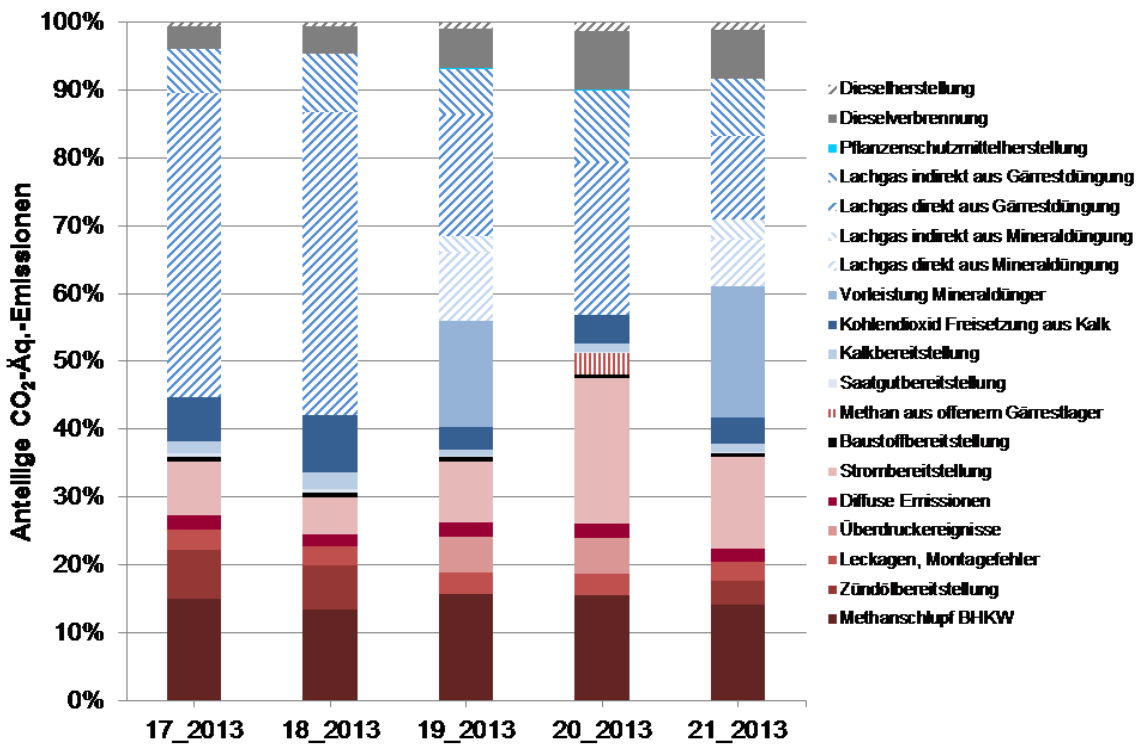


Abb. 83: Aufteilung der CO₂-Äquivalente der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse

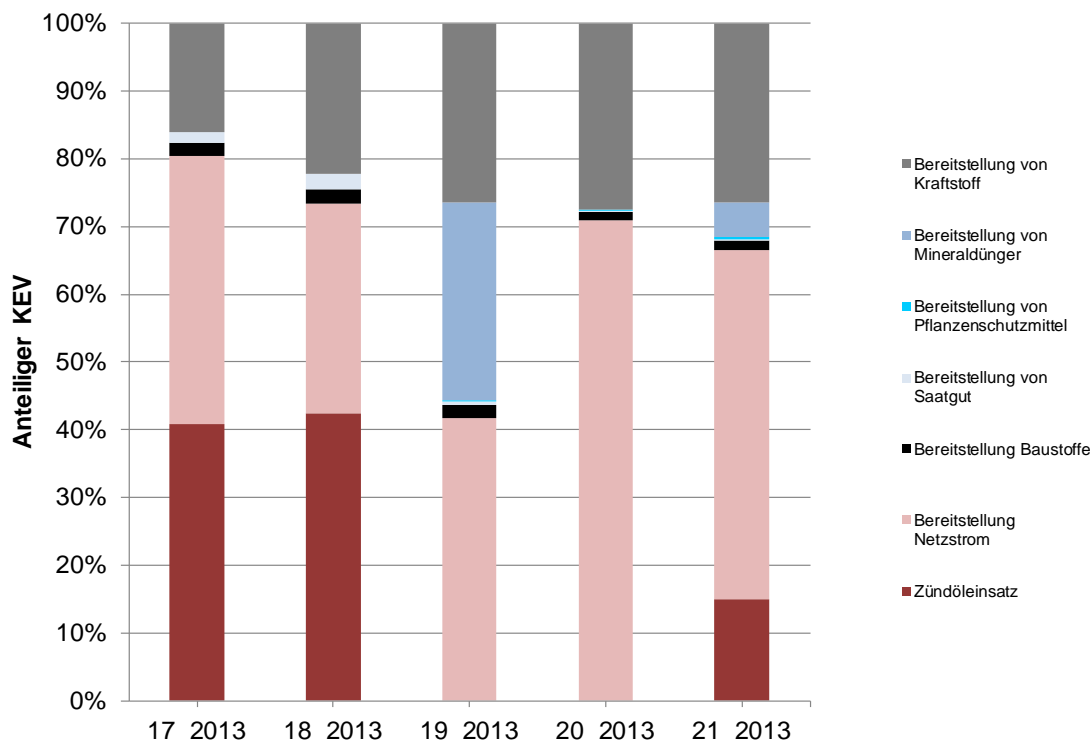


Abb. 84: Aufteilung des KEV der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse

Die berechneten THG-Emissionen und kumulierten Energieverbräuche wurden auf die Nutzenergie der Netto-Stromeinspeisung bezogen. Für die Ausweisung der spezifischen Umweltwirkungen je kWh Nutzenergie gemäß Tab. 18 wurden zwei Methoden angewandt: (1) Gutschrift für die Substitution von Wärme aus fossilen Quellen durch BHKW-Wärme, (2) Allokation nach Exergie-Methode. Bei (1) wurde eine Erdgas-Heizung mit spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen von 284 g kWh⁻¹ und einem KEV-Wert von 1,338 kWh kWh⁻¹ angesetzt. Für (2) wurde mit einer Carnot-Effizienz von 0,3546 bei einem Temperaturniveau von 150 °C (423 Kelvin) gerechnet.

Im Vergleich der fünf Grünland-Pilotbetriebe ergeben sich bezüglich der spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen der Stromerzeugung nur geringe Unterschiede (Tab. 18). Die Spannweite zwischen Betrieb 17 und Betrieb 21 beträgt 50 g kWh⁻¹ oder knapp 12 %. Die spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen der Stromeinspeisung aus den Grünland-Pilotanlagen liegen in der Nähe des Emissionsfaktors für die Strombereitstellung aus Erdgas von 446 g kWh⁻¹ (Memmler & Dreher, 2013).

Erst wenn für die externe Wärmenutzung eine Substitution von Erdgas (für die Wärmeerzeugung) angerechnet wird, ergibt sich für die den „Biogasstrom“ eine Netto-Vermeidung von CO₂-Äq.-Emissionen gegenüber der Strombereitstellung aus Erdgas. Betrieb 20 kann sich dann wegen der vollständigen Verwertung der überschüssigen BHKW-Wärme gegenüber den anderen Betrieben absetzen und erreicht gegenüber Strom aus Erdgas um 40 % geringere CO₂-Äq.-Emissionen (Tab. 18). Eine Gutschrift für vermiedene Emissionen aus der offenen Lagerung von Gülle/Mist wurde nicht vorgenommen. Bei Anwendung der Allokation ergibt sich eine veränderte Rangfolge der Betriebe bei einer insgesamt kleinen Spannweite.

Tab. 18: Spezifische Werte für die THG-Emissionen und den KEV bezogen auf die Netto-Strombereitstellung aus Biogas für die Grünland-Pilotbetriebe

Betriebs-ID	17	18	19	20	21
CO ₂ -Äquivalente, g kWh ⁻¹					
Gutschriftenmethode:					
Emissionen der Biogaskette	433	466	446	448	483
Substitution von Erdgas	-58	-121	-51	-181	-89
Saldo	375	345	395	267	394
Allokation nach Exergie	309	336	314	319	342
KEV, 1					
Gutschriftenmethode:					
KEV der Biogaskette	0,4089	0,3833	0,4475	0,6365	0,5924
Substitution von Erdgas	-0,2731	-0,5677	-0,2409	-0,8529	-0,4199
Saldo	0,1359	-0,1845	0,2067	-0,2164	0,1726
Allokation nach Exergie	0,2921	0,2761	0,3151	0,4533	0,4200

Beim KEV fallen die Unterschiede zwischen den Betrieben deutlicher aus (Tab. 18). Betrieb #20 hat einen um 66 % höheren KEV der Biogaskette als Betrieb #18. Grund für den hohen KEV von #20 ist der große Eigenstrombedarf der Biogasanlage. Für den Wärmeabsatz in Verbindung mit der relativ hohen Wärmekennzahl des BHKW erhält dieser Betrieb allerdings eine so große Gutschrift für die energetische Substitution von Erdgas, dass er im Saldo vom letzten auf den ersten Platz vorrückt. Die Anwendung der Allokation ergibt hier ein deutlich unterschiedliches Bild. Betrieb 20 landet dann auf dem letzten Rang aufgrund des hohen Eigenstrombedarfs und des vergleichsweise niedrigen elektrischen Nutzungsgrades des BHKW.

4.2.8 Effizienzbewertung mit dem Biogas Doc

Abschließend wurde eine Bewertung der fünf Pilotanlagen mit dem *Biogas Doc* der LfL durchgeführt (siehe: Buschmann et al., 2013; Effenberger et al., 2014). Hierfür wurden die mittleren Kennwerte eingesetzt, wie sie im Anhang dokumentiert sind. Tab. 19 zeigt das Ergebnis der Bewertung, das sich jeweils aus einer „Effizienzzahl“ (zwischen 0 und 100) und einer „Effizienzklasse“ zusammensetzt. Die Effizienzklassen sind wie folgt zu interpretieren: „sehr gut“ \Leftrightarrow Verbesserung praktisch kaum mehr möglich; „gut“ \Leftrightarrow Verbesserung möglich, nicht unbedingt erforderlich; „ausreichend“ \Leftrightarrow Verbesserung empfohlen; „ungenügend“ \Leftrightarrow Verbesserung unbedingt erforderlich.

Tab. 19: Ergebnisse der Effizienzbewertung der fünf „Grünland“-Pilotanlagen mit dem *Biogas Doc*

Anlagen ID	17	18	19	20	21
Biogasproduktion	25,1 „ungenügend“	78,0 „sehr gut“	37,5 „ausreichend“	13,8 „ungenügend“	37,5 „ausreichend“
Biogasverwertung	42,3 „ausreichend“	67,2 „gut“	47,1 „ausreichend“	62,5 „gut“	23,4 „ungenügend“
Gesamtbewertung	25,8 „ungenügend“	64,5 „gut“	37,5 „ausreichend“	12,7 „ungenügend“	23,8 „ungenügend“

In der Bewertung für den Bereich der Biogasproduktion erhalten die Anlagen 17 und 20 eine ungenügende Bewertung. Gründe hierfür sind die gärbiologischen Probleme und vergleichsweise niedrige Methanausbeuten. Anlage 17 schneidet hier tendenziell zu schlecht ab, da die Methodik das Gewicht auf die erzielte relative Methanausbeute legt. Für Geflügelmist ist der Wert für die theoretische Methanausbeute jedoch mit einer großen Unsicherheit behaftet. Für den Bereich der Biogasverwertung ist der energetische Nutzungsgrad ausschlaggebend, so dass Anlagen 18 und 20 mit ihrem hohen anteiligen Wärmeabsatz „gut“ abschneiden (ohne Berücksichtigung der Art der Wärmeverwertung). Da die zusammenfassende Bewertung nicht kompensatorisch ermittelt wird, erreicht hier Anlage #18 als einzige ein „gut“. Bei #19 mangelt es an einer effizienten Ausnutzung des Gär-raums und einer entsprechenden Verwertung des Biogases. Bei Anlagen 17 und 20 muss die Gärbiologie stabilisiert, bei #17 auch die Wärmenutzung verbessert werden. Das ungenügende Abschneiden von Betrieb 21 ist vor allem eine Folge von Defiziten in der Planung und im Management.

5 Schlussfolgerungen

In der hier dokumentierten Phase des Monitorings von Pilotbetrieben zur Biogasproduktion in Bayern wurden fünf Betriebe über einen Zeitraum von ca. zweieinhalb Jahren beobachtet. In diesen Betrieben wird Biogas aus Grünlandaufwuchs oder aus Klee gras von Ackerflächen des ökologischen Landbaus erzeugt und für die Bereitstellung von Strom und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung verwertet. Die Pilotbetriebe unterscheiden sich auf dem Hintergrund ihrer Standortbedingungen vor allem hinsichtlich der Kombination und Beschaffung der Einsatzstoffe, des Betriebsmanagements und der Konzepte für die Biogasverwertung sowie – obgleich in deutlich geringerem Maße als die Pilotanlagen 2012 – auch bezüglich der Anlagentechnik. Im Folgenden wird versucht, grundlegende Schlussfolgerungen in Bezug auf die Biogasproduktion aus Grasbiomasse zu ziehen. Diese unterliegen naturgemäß gewissen Einschränkungen, welche sich dem fachkundigen Leser/der fachkundigen Leserin aus der detaillierten Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die einzelnen Pilotbetriebe erschließen.

Nimmt man die fünf „Grünland“-Anlagen und drei der früheren Pilotanlagen zusammen, so lassen sich diese in zwei Gruppen einteilen. Gruppe I zeigt ein niedriges Niveau der Methanproduktivität des Gär raums. Ebenfalls ist die organische Gesamt-Raumbelastung mit weniger als $2,0 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ unterdurchschnittlich. Zu dieser Gruppe gehören Anlagen ##19, 20, 21 und – mit Einschränkung – Anlage #18. Alle vier Anlagen verfügen über konventionelle Rührkesselfermenter und setzten mehr als 30 % Gülle ein. Die Einschränkung bei #18 beruht darauf, dass diese Anlagen als einzige einstufig konzipiert ist und das großvolumige Gärrestlager daher konventionsgemäß bei der Berechnung der entsprechenden Kennzahlen nicht berücksichtigt wird. Diese extensivere Durchführung des Gärprozesses ist eine Strategie für den Umgang mit der schwieriger zu handhabenden und schlechter abbaubaren Grasbiomasse. Sie mildert die negativen Folgen für die Anlagen auslastung im Falle einer vorübergehenden Destabilisierung/Hemmung der Gärbiologie. Allerdings war diese Strategie nicht in jedem Fall erfolgreich. Sie scheint dort aufzugehen, wo die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind: (1) Die sämtlichen technischen Komponenten sind auf das Substrat abgestimmt sind; (2) die Grasbiomasse ist von möglichst einheitlicher Qualität; (3) die Anlagenkapazität und die Substratverfügbarkeit sind kompatibel.

Gruppe II der Anlagen zur Vergärung von Grasbiomasse umfasst ##9, 15, 16 und 17. Diese Anlagen verwerteten allesamt Klee grassilage in Massenanteilen von 56 bis 91 % und setzten keine Gülle ein. Die organische Raumbelastung der ersten Stufe dieser Anlagen ist mit mehr als $4,0 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ überdurchschnittlich hoch („Hochlastfermenter“). Die verfahrenstechnischen Konzepte sind dabei sehr unterschiedlich. Anlage #9 verfügt über einen Hauptfermenter nach dänischer Bauweise (Durchmesser \approx Höhe) mit Zentralrührwerk, ##15 und 17 besitzen klassisch dimensionierte Rührkesselfermenter (Durchmesser $>$ Höhe) mit Paddelrührwerken, #16 verfügt über einen liegenden „Pfropfenstromfermenter“. Anlage 15 ist einstufig, die übrigen Anlagen sind zweistufig. Bei diesen Anlagen gab es in der Regel keine Probleme mit der Durchmischung der Gärbehälter, da die Technik speziell auf die hohen Trockenmassegehalte im Gärgemisch von mehr als 12 % abgestimmt wurde. Die Methanproduktivität des Fermentersystems liegt in dieser Gruppe deutlich höher als in der ersten Gruppe. Die einstufige Ausführung dieses Konzeptes bei Anlage #15 wies die höchste Methanproduktivität aller beobachteten Pilotanlagen auf, allerdings zulasten des Ausgärungsgrades.

Da bei der Vergärung von Grasbiomasse ein hohes Risiko für eine Destabilisierung des Gärprozesses besteht, ist eine regelmäßige Prozesskontrolle obligatorisch. Als einfach vor Ort zu bestimmender Prozessindikator mit Aussagekraft kann der FOS/TAC-Wert gelten. Ein Anstieg über ein anlagenspezifisches Niveau im Bereich von 0,3 zeigte eine beginnende Destabilisierung der Gärbiologie an. Der FOS/TAC war für die hier vorgestellten fünf Anlagen deutlich korreliert mit den gesamten FFS. Wenn es zu einer Hemmung der Gärbiologie bei der Grasvergärung kam, traten im Gärgemisch stets Propionsäurekonzentrationen oberhalb von 1000 mg L^{-1} auf. Die ammoniakalischen Stickstoffgehalte in den Gärbehältern waren für die Anlagen sehr verschieden und ergeben kein klares Bild hinsichtlich der hemmenden Wirkung auf die Gärbiologie. Nur teilweise waren die ammoniakalische Stickstoffkonzentration und die Propionsäurekonzentration positiv korreliert. Das (vorübergehende) Ersetzen eines Teils der Grasbiomasse durch Mais oder andere Stärke betonte Einsatzstoffe führte in zwei Fällen zu sinkenden Ammoniak-Konzentrationen und einer Stabilisierung der Gärbiologie.

Der Einsatz von Rindergülle in Mischung mit (Klee)Grassilage erlaubt die Vergärung von Grasbiomasse in klassischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Gruppe I), ist aber keine „Versicherung“ gegen Störungen der Prozessbiologie. Er senkt auch nicht notwendiger Weise den Strombedarf. Dieser muss für die Vergärung hoher Anteile an Grasbiomasse nicht zwingend hoch sein. Durch den Einsatz weniger, aber effektiver Anlagenkomponenten können der spezifische Strombedarf je Tonne Frischmassedurchsatz und der anteilige Strombedarf niedrig gehalten werden. Anlagen mit „Hochlastfermenter“ haben tendenziell einen überdurchschnittlichen Eigenstrombedarf.

Bei zwei der hier neu vorgestellten Pilotbetriebe war die Auslastung des BHKW durch die Substratverfügbarkeit limitiert. Wie der Fall von Betrieb #21 zeigt, kann dies bei einem aufwändigen Anlagenkonzept rasch zu einem ineffizienten Betrieb und einem ökonomischen Ungleichgewicht führen.

Die absoluten, jährlichen CO_2 -Äquivalentemissionen der Strombereitstellung werden in allen fünf Betrieben vom Stickstoffkreislauf geprägt. Die spezifischen CO_2 -Äq.-Emissionen der Strombereitstellung aus der Biogaskette liegen für alle hier betrachteten Betriebe im Bereich des entsprechenden Emissionsfaktors für Erdgas. Erst durch die Berücksichtigung einer Gutschrift für die Substitution fossiler Energieträger für die Wärmebereitstellung errechnet sich gegenüber Strom aus Erdgas eine deutliche Vermeidungswirkung und es verschiebt sich die Rangfolge der Betriebe (eine Gutschrift für vermiedene Emissionen aus der offenen Lagerung von Gülle/Mist wurde nicht vorgenommen).

Der absolute, jährliche KEV wird vom Energieeinsatz in Form von Zündöl und Netzstrom geprägt, sofern nicht wie bei Betrieb #19 große Mengen an Mineraldünger verwendet werden. Der „Optimalfall“ bezüglich dieser Umweltwirkung, ein ökologisch wirtschaftender Betrieb mit Gas-Otto-BHKW, war hier nicht vertreten. Noch deutlicher als für die spezifischen CO_2 -Äq.-Emissionen verschieben sich beim spezifischen KEV die Verhältnisse durch Einrechnung einer Gutschrift für die Substitution fossiler Energieträger für die Wärmebereitstellung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Vergärung hoher Anteile von Grasbiomasse – mehr als bei anderen Substratkombinationen – die Abstimmung der Anlagentechnik auf das schwieriger zu handhabende Substrat der entscheidende Faktor für einen funktionssicheren und effizienten Anlagenbetrieb ist. Hierbei ist die Fermenterbauweise eindeutig von nachrangiger Bedeutung gegenüber der Auswahl der übrigen Anlagenkomponenten und dem Gesamtkonzept. Mit einer solchen, optimal abgestimmten Anlage und

einer sorgfältigen Prozesskontrolle lassen sich die gärbiologischen Herausforderungen bei der Vergärung hoher Anteile an Grasbiomasse meistern. Ein erfolgreicher dauerhafter Einsatz von ausschließlich Grasbiomasse – auch in Kombination mit Wirtschaftsdünger – konnte im Rahmen des Biogasanlagen-Monitorings der LfL bisher nicht beobachtet werden.

Literaturverzeichnis

Andrade, D.; T. Barufke; M. Hartel; B. Munk; M. Lebuhn et al.: Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung Vergleichende Prüfung diverser Ernteproben, Optimierung des Gärprozesses. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: N/11/04. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2014, 143 S.

Andrade, D. & A. Weber: Biogas aus Grünlandbiomasse: Empfehlungen zur Optimierung des Abbauprozesses. *Landtechnik* 68(2013), 5: 339-343

Andrade, D.; T. Metzner; B. Munk; K. Koch; H. Heuwinkel; A. Weber; A. Gronauer: Regelgrößen zur Erstellung von Mischrationen, die die Betriebssicherheit reiner NawaRo-Fermenter erhöhen. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: K/08/12. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2012, 116 S.

Aschmann, V.; M. Effenberger; J. Graf; M. Halama; U. Keymer et al.: Bayernplan: Einsatz von Biogas zum Ersatz von Gaskraftwerken - Arbeitsgruppe 1: Potential, verfahrenstechnische und ökonomische Konsequenzen für die Biogaserzeugung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 7/2013, Freising: 2013, 196 S.

Aschmann, V. & M. Effenberger: Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2012

Bachmaier, H.; F. Ebertseder; M. Effenberger; R. Kissel; E. Rivera Gracia et al.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern - Fortsetzung 2008-2010. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 5/2011, ISSN: 1611-4159, Freising: 2011

Buschmann, A.; J. Schober; M. Effenberger: Benchmarksystem für Biogasanlagen. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: K/08/05. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2013, 55 S.

Daniel-Gromke, J.; N. Rensberg; V. Denysenko; K. Hillebrand; K. Naumann et al.: Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse). Zwischenbericht Juni 2014. DBFZ Deutsches Biomasse Forschungszentrum, Leipzig: 2014, 141 S.

Ebertseder, F; H. Bachmaier; M. Effenberger; R. Kissel; E. Rivera Gracia; A. Lehner: Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 8/2012, ISSN: 1611-4159, Freising: 2012

Effenberger, M.; A. Buschmann; J. Schober; Dj. Djatkov: Webbasierte Schwachstellenanalyse an landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Landtechnik* 69(2014), 2: 295-301

Effenberger, M.; M. Maze; B. Zerhusen: Klassifizierung der Treibhausgas- und Energiebilanz landwirtschaftlicher Biogasanlagen ("THG-Rechner Biogas"). Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: N/11/33. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2014, 59 S.

Effenberger, M.; D. Andrade; H. Bachmaier; M. Lebuhn; C. Marín-Peréz et al.: Verfahrenstechnik der Grasvergärung: Technik, Gärprozess, Klimabilanz. In: Tagungsband zur 20. Biogas Jahrestagung und Fachmesse, 11.01.-13.01.2011, Nürnberg, Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.), Freising: 2011, S. 29-38

Effenberger, M.; H. Bachmaier; E. Kränzel; A. Lehner; A. Gronauer: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 1/2010, ISSN: 1611-4159, Freising: 2010

Effenberger, M.; R. Kissel; A. Lehner; A. Gronauer: Verfahrenstechnische Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen – Auslastung und energetische Effizienz. *Landtechnik* 63(2008): 290-292a

Effenberger, M. & M. Lebuhn: Biologie der Methangärung - die Belastungsgrenzen erkennen. *Mais* 2/2008, mais special 2008: 4-7

Hölker, U.: Grünes Licht für Gras. Bioreact GmbH, Troisdorf [http://www.biogaswissen.net/images/biogaswissen/pdf/Gruenes_Licht_fuer_Gras_2009-04-29.pdf] Zugriff: 14.07.2015

Lebuhn, M.; D. Andrade; C. Bauer; A. Gronauer: Intensivierung des anaeroben Biomasseabbaus zur Methanproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen, Abschlussbericht des Teilvorhabens 1 „Optimierung der Verfahrenstechnik und Prozessautomatisierung, Prozessmonitoring und Datenmanagement“ und des Teilvorhabens 6 „Identifikation und Quantifizierung funktionell relevanter Mikroorganismen bei der Vergärung LCB-reicher nachwachsender Rohstoffe“. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising: 2010, 132 S.

LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft): Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung - Machbarkeitsstudie. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 4/2011, Freising: 2011, 218 S.

Memmler, M. & M. Dreher: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012 - Aktualisierte Anhänge 1,2 und 3 der Veröffentlichung "Climate Change 15/2013", Stand Juli 2013. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau: 2013, 19 S.

Ostertag, J. & G. Röbl: Vergleichende Untersuchung alternativer Verfahrensketten für die Einwerbung und Vergärung von Grünlandaufwüchsen Schwerpunkt II – Silocontrolling. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: N/11/05. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Grub: 2015, 22 S.

Würfl, P.; M. Halama; U. Keymer: Grünlandstudie Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 9/2008, Freising: 2008, 90 S.

Anhang

Tab. 20: Zusammenstellung verfahrenstechnischer Kenngrößen für die Pilotanlagen (Mittelwerte für die einzelnen Anlagen über die gesamte Beobachtungsperiode; Ø: Durchschnitt der fünf Pilotanlagen; Ø: Durchschnitt von sechs Pilotanlagen aus 2012)

Anlagen ID		17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Auswertungszeitraum	d	953	947	913	917	810	908	775
Arbeitsvolumen Hauptfermenter	m ³	1.200	1.200	1.200	770	2.400	1.354	1.260
Arbeitsvolumen Nachgärer	m ³	1.200	0	600	770	2.400	994	1.170
Gärrestlagervolumen mit Gaserfassung	m ³	3.000	2.400	1.200	0	3.600	2.040	-
Gärrestlagervolumen offen	m ³	500	800	1.400	300	0	600	-
Installierte elektrische Leistung	kW	265 (+530)	250	147	100	625	282	261
Spezifische installierte elektrische Leistung	kW m ⁻³	0,12	0,21	0,08	0,06	0,13	0,12	0,13
Gärtemperatur Stufe 1	°C	44,8	42,7	49,9	43,5	42,8	44,7	45,3
Gärtemperatur Stufe 2	°C	47,7	-	52,5	42,3	40,0	45,6	41,0
Frischmasseeintrag	t d ⁻¹	17,5	18,3	13,3	7,2	39,6	19,2	18,2
oTM Eintrag	kg d ⁻¹	5.191	3.618	2.215	1.254	7.975	4.051	4.414
spezifischer FM-Durchsatz	kg (kW d) ⁻¹	60,5	73,2	90,4	71,8	63,3	71,8	66,4
Verweilzeit Stufe 1	d	69	66	90	107	61	78	63
Verweilzeit im Fermentersystem	d	137	66	135	214	121	135	128
Verweilzeit im gasdichten System	d	309	197	226	214	212	232	-
oTM-Raumbelastung Stufe 1	kg (m ³ d) ⁻¹	4,3	3,1	1,8	1,6	3,3	2,8	4,0
oTM-Raumbelastung Gesamt	kg (m ³ d) ⁻¹	2,2	3,1	1,2	0,8	1,7	1,8	2,2

Anlagen ID		17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Auswertungszeitraum	d	953	947	913	917	810	908	775
CH ₄ -Gehalt im Biogas	%	53,9	53,1	50,5	51,5	50,1	51,8	51,7
Biogasrate	m ³ d ⁻¹	2.713	2.413	1.407	684	5.550	2.553	3.089
Methanrate	m ³ d ⁻¹	1.461	1.282	710	352	2.779	1.319	1.598
Biogasausbeute FM	m ³ t ⁻¹	155	132	106	95	140	126	150
Biogasausbeute oTM	m ³ t ⁻¹	523	667	663	546	696	613	657
Methanausbeute FM	m ³ t ⁻¹	84	70	53	49	70	65	77
Methanausbeute oTM	m ³ t ⁻¹	281	354	335	280	348	318	340
Methanproduktivität	m ³ (m ³ d) ⁻¹	0,6	1,1	0,4	0,2	0,6	0,6	0,7
Restmethanausbeute OS (37 °C)	m ³ t ⁻¹	7,7	10,8	2,7	1,2	6,5	5,8	7,1
Restmethanausbeute OS (20 °C)	m ³ t ⁻¹	2,1	5,5	0,4	0,3	2,0	2,1	2,2
Anteilige Restmethanausbeute (37 °C)	%	4,0	6,6	2,0	1,0	3,7	3,5	8,1
Anteilige Restmethanausbeute (20 °C)	%	1,1	3,3	0,3	0,3	1,1	1,2	2,4

Anlagen ID		17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Auswertungszeitraum	d	953	947	913	917	810	908	775
tägliche Laufzeit BHKW 1	h	23,1	23,9	23,9	21,8	n.b.	23,2	-
tägliche Laufzeit BHKW 2	h	7,0		5,7		n.b.	6,3	-
täglicher Zündölbedarf	kg	75,6	69,5			77	74	-
tägliche Energiezufuhr zum BHKW	kWh	15.374	13.522	7.100	3.516	28.566	13.634	15.936
Feuerungswärmeleistung	kW	641	563	296	147	1190	568	664
Tagesstromproduktion	kWh	6.388	5.437	2.681	1.411	10.819	5.347	5.815
elektrische Gesamtleistung	kW	266	223	112	59	438	220	242
Gesamt-Arbeitsausnutzung	%	90,5	89,6	76,0	58,8	70,2	77,0	92,8
Jahresvolllaststunden	h	7.928	7.848	6.656	5.149	6.149	6.746	8.133
elektrischer Gesamt-Nutzungsgrad	%	41,5	40,2	37,8	39,0	37,9	39,2	36,5
Verstromungsfaktor (CH ₄)	kWh m ⁻³	4,4	4,2	3,8	4,0	3,9	4,0	3,6

Anlagen ID		17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Auswertungszeitraum	d	953	947	913	917	810	908	775
Tages-Stromeinspeisung	kWh	6.388	5.308	2.621	1.381	10.315	5.203	-
Stromausbeute (FM)	kWh t ⁻¹	366	297	202	196	273	267	285
Stromausbeute (oTM)	kWh t ⁻¹	1.231	1.503	1.210	1.125	1.357	1.285	1234
Tages-Strombezug	kWh	419	298	192	243	1.491	529	-
Netto-Stromausbeute (FM)	kWh t ⁻¹	342	274	183	159	223	236	255
Netto-Stromausbeute (oTM)	kWh t ⁻¹	1.165	1.391	1.101	975	1.265	1.179	1.110
Anteiliger Strombedarf								
Rührwerke	%	4,5	4,4	3,8	13,4	8,4	6,9	3,8
Gasverdichter	%	0,4	0,3	0,8	0,0	0,4	0,4	-
Separator	%	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Eintragstechnik	%	0,1	0,1	0,0	1,4	0,6	0,4	0,3
Pumpen	%	0,3	0,1	1,2	0,0	1,1	0,5	0,2
Sonstiges	%	1,1	0,6	1,6	2,8	4,0	2,0	5,7
Gesamt	%	6,6	5,61	7,3	17,6	14,5	10,3	10,1

Energiebilanz	Anlagen ID	17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Auswertungszeitraum	d	953	947	913	917	810	908	775
Wärmeleistung (Bedarf)	kW	37	52	63	25	91	53	49
Anteiliger Wärmebedarf	%	13	21	43	25	15	23	22
Tages-Wärmeabsatz	kWh	1.387	3.234	781	1.050	3.899	2.189	3.498
Wärmeabsatzleistung	kW	58	135	33	44	162	91	146
Anteiliger Wärmeabsatz	%	23	68	39	59	30	50	64,3
Netto-Methannutzungsgrad	%	53	68	48	70	53	62	58,4
Eigenschaften des	Anlagen ID	17	18	19	20	21	Ø	Ø 2012
Substratmix (Massenanteile)								
Grünlandanteil am NawaRo-Mix	%	86,6	93,0	63,1	94,8	60,8	79,6	39,3
Grünlandanteil am Gesamt-Input	%	55,8	62,8	26,0	53,4	37,3	47,0	26,0
Wirtschaftsdüngeranteil	%	35,6	32,5	58,8	43,7	38,7	41,8	38,5

Tab. 21: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 17

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges (g/l)	P ges (g/l)	K ges (g/l)
1	15,4	69,7	8,3	3.812	1.202	0,37	342	258	95	1	0	11	0			
2	13,7	68,2	8,4	4.038	1.482	0,33	3.056	902	2.617	27	0	25	0			
3	15,8	70,9	8,4	4.547	1.668	0,24	187	131	69	0	0	0	0			
4	15,9	70,8	8,2	4.281	1.146	0,32	996	812	163	18	13	39	5			
5	14,5	69,0	8,4	4.846	1.695	0,20	673	99	708	0	0	0	0	8,6		
6	15,6	70,3	8,1	4.450	945	0,40	616	550	81	0	0	0	0			
7	15,3	71,1	8,2	4.498	1.045	0,23	1.083	197	0	0	0	0	0	8,6		
8	16,1	70,8	8,1	4.140	762	0,25	715	80	0	0	0	0	0	8,4	2,3	10,8
9	16,3	70,0	8,4	4.719	1.650	0,23	291	259	0	0	0	0	0	8,8	2,5	10,9
10	14,8	70,5	8,1	4.129	792	0,23	1.232	985	228	0	0	13	10	8,0	2,2	11,1
11	16,2	70,8	8,2	4.225	1.184	0,26	1.215	895	395	0	0	0	0	8,3	2,2	9,1
12	15,7	67,4	8,4	4.772	1.890	0,23	700	289	352	3	0	8	0			
13	17,8	65,4	8,2	5.007	1.403	0,26	2.042	463	1.923	14	0	19	0			
14	17,3	68,9	8,5	4.650	1.877	0,26	750	685	76	0	5	0	0			
15	17,2	69,7	8,3	5.365	1.413	0,23	117	336	330	0	0	12	0			
16	18,4	70,3	8,2	4.857	1.022	0,27	1.751	1.329	376	7	0	9	0			
17	17,4	68,1	8,4	4.876	1.649	0,24	108	325	38	0	0	0	0			
18	19,0	68,3	8,3	5.438	1.628	0,28	1.863	1.247	752	0	0	12	0			
19	19,6	67,2	8,4	5.472	2.008	0,25	1.053	802	310	0	0	0	0			
20	19,6	68,7	8,3	4.952	1.561	0,47	2.908	1.724	1.384	32	4	62	0			
21	17,4	67,5	8,3	4.651	1.529	0,25	1.036	621	481	3	3	8	4			
22	18,5	68,6	8,3	4.967	1.566	0,34	1.481	460	1.206	21	0	51	0			
23	19,0	68,4	8,1	4.596	1.191	0,46	5.632	2.474	3.676	92	25	166	0			
24	18,6	69,0	8,1	4.688	1.160	0,48	3.429	643	3.299	61	11	91	14			
25	17,9	70,6	8,1	4.918	1.107	0,44	6.884	1.665	6.010	140	31	352	40			
26	18,3	71,5	8,2	5.019	1.406	0,56	5.956	1.216	5.159	134	51	627	63			
27	18,4	70,0	8,3	5.048	1.511	0,64	5.632	1.546	4.475	120	53	528	50			
28	17,5	69,9	8,2	4.791	1.114	0,50	5.244	2.069	3.672	88	25	162	33			
29	17,5	72,3	8,1	4.345	841	0,40	2.300	2.180	731	21	0	44	0			
*Säuren																
Mittelwert	17,1	69,4	8,3	4.693	1.360	0,33	2.045	870	1.331					8,4	2,3	10,5
Maximum	19,6	72,3	8,5	5.472	2.008	0,64	6.884	2.474	6.010					8,8	2,5	11,1
Minimum	13,7	65,4	8,1	3.812	762	0,20	108	80	0					8,0	2,2	9,1

Tab. 22: Analyseergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 17

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N mg/l	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	14,9	67,9	8,6	4.454	2.257	0,34	1.187	155	1.268	2	0	5	0	9,0	1,9	9,3
2	13,0	68,8	8,4	3.970	1.561	0,35	3.153	1.048	2.506	33	4	39	21			
3	14,9	68,5	8,5	4.533	2.037	0,26	871	50	1.013	0	0	0	0			
4	15,1	68,2	8,5	4.847	2.178	0,32	476	120	438	0	0	0	0			
5	14,8	69,6	7,9	4.720	803	0,21	222	161	75	0	0	0	0			
6	13,7	69,9	8,5	4.714	2.118	0,18	217	151	82	0	0	0	0	8,3		
7	14,2	68,2	8,4	4.765	1.874	0,19	222	103	0	0	0	0	0	8,5	2,2	10,4
8	15,5	69,1	8,4	4.888	1.922	0,20	271	188	0	0	0	0	0	8,8	2,5	10,4
9	14,0	67,4	8,2	4.590	1.332	0,19	249	223	33	0	0	0	0	8,0	2,2	9,8
10	15,6	68,9	8,2	4.265	1.238	0,25	1.543	1.192	394	11	17	23	0	8,1	2,2	9,6
11	15,1	68,0	8,4	4.818	1.894	0,21	428	196	286	0	0	0	0			
12	15,4	67,3	8,4	5.297	2.083	0,22	635	361	324	0	0	18	0	9,5	2,4	11,3
13	16,8	69,0	8,5	4.877	2.191	0,26	525	424	87	0	5	0	0	9,3	2,5	11,8
14	17,5	67,2	8,4	5.070	1.994	0,20	117	117	0	0	0	0	0	9,9	2,5	12,0
15	17,0	68,1	8,4	5.348	2.103	0,23	617	265	377	21	0	55	0	10,1	2,7	12,4
16	17,4	67,6	8,3	5.615	1.908	0,18	108	108	0	0	0	0	0	10,5	2,6	12,7
17	16,4	67,7	8,4	5.275	2.074	0,30	106	106	0	0	0	0	0	9,7	2,7	11,2
18	17,8	67,3	8,6	5.571	2.822	0,24	967	382	704	0	0	25	0	10,4	3,0	11,6
19	18,5	66,4	8,5	5.538	2.589	0,24	259	192	83	0	0	0	0			
20	18,9	67,3	8,4	5.005	2.131	0,28	1.191	385	974	3	0	23	0			
21	17,5	68,3	8,4	4.936	2.028	0,25	1.177	202	1.200	3	0	0	0			
22	18,2	66,8	8,3	4.770	1.621	0,27	1.083	169	1.102	16	0	16	0			
23	18,2	67,1	8,4	4.930	2.026	0,26	2.615	336	2.699	61	0	52	32			
24	18,2	68,0	8,4	5.021	2.063	0,37	4.384	188	5.101	60	0	34	0			
25	17,2	69,8	8,3	5.349	1.818	0,47	5.300	283	6.059	73	10	76	8			
26	16,7	69,4	8,6	5.309	2.690	0,50	5.120	373	5.225	197	37	593	46			
27	17,4	68,8	8,5	5.342	2.400	0,50	4.795	247	5.052	87	27	611	26			
28	17,2	68,8	8,4	5.065	1.991	0,39	5.822	1.046	5.778	74	18	83	27			
29	16,8	69,2	8,5	5.611	2.617	0,24	383	163	272	0	0	0	0			
*Säuren																
Mittelwert	16,3	68,2	8,4	4.982	2.012	0,28	1.519	308	1.418					9,2	2,4	11,0
Maximum	18,9	69,9	8,6	5.615	2.822	0,50	5.822	1.192	6.059					10,5	3,0	12,7
Minimum	13,0	66,4	7,9	3.970	803	0,18	106	50	0					8,0	1,9	9,3

Tab. 23: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 17

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Kleegrassilage								
1	34,3	87,5	8,5					
2	20,7	81,9	14,2					
3	23,6	88,3	13,1					
4	30,5	90,7	12,4	36,4	2,4			
5	36,0	81,1	17,1	18,0	2,8	42,8	33,8	5,1
6	35,5	84,8						
7	42,8	89,5	17,4	18,9	2,7	51,0	35,9	5,7
8	22,4	87,8	12,8	30,1	3,2	64,9	60,3	22,2
9	24,3	85,7	13,3	27,4	1,9	63,2	50,1	13,7
10	34,9	87,3	16,1	21,1	2,9	44,3	33,9	4,2
11	38,1	88,5	19,1	18,3	3,5			
12	35,2	86,5	16,3	19,0	2,4			
13	35,7	87,0						
14	36,1	88,7						
15	36,3	85,9						
16	29,0	86,0	17,8	18,9	3,2	44,7	31,6	4,6
17	53,1	91,0	9,1	23,2	2,2	54,7	37,8	7,0
18	44,0	85,7	10,4	27,4	1,7	55,6	45,1	7,2
19	41,3	83,9	11,2	25,8	1,9	53,4	45,7	7,5
20	29,6	87,4	12,9	0,0	2,8	64,2	48,5	7,8
21	37,5	91,1	11,7	25,9	2,1	52,5	39,1	5,5
22	36,6	86,2	8,6	25,8	1,4	51,4	39,2	3,6
23	43,7	93,7	11,0	34,1	1,7	65,8	39,6	4,2
24	33,6	90,0	12,9	19,6	1,8	40,2	28,7	2,6
25	37,6	87,8	15,5	21,5	1,8	43,9	31,7	3,5
26	35,6	68,0	16,5	26,8	0,6	54,1	51,5	24,6
27	27,8	79,5	16,3	26,8	1,1	54,0	39,5	6,1
28	29,1	78,9	14,5	28,4	1,0	56,5	49,9	17,3
Mittel	34,4	86,1	13,7	23,5	2,1	53,2	41,2	8,5

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Maissilage								
1	39,6	96,5	7,9	19,2	2,3			
2	41,5	97,1	8,0	17,1	2,8	36,8	23,9	2,5
3	35,7	96,1						
4	38,7	96,4	7,0	16,1	2,6	39,2	23,5	2,4
5	27,0	95,3	8,6	19,5	2,1	45,3	25,7	2,0
6	43,9	89,3	11,6	19,0	1,4	57,9	48,2	8,9
7	26,0	95,5	8,0	20,4	2,5	48,3	28,3	2,2
8	23,5	91,4	9,9	24,3	2,6	54,2	37,2	4,4
Mittel	34,5	94,7	8,7	19,4	2,3	47,0	31,1	3,7
Getreide								
1	87,4	94,1						
2	88,6	94,1						
3	90,4	97,5						
4	78,5	93,8	12,3	16,6	8,3	40,6	28,6	4,5
Mittel	86,2	94,8						
GPS								
1	35,4	93,1	9,3	27,9	1,4	51,2	37,9	6,0
2	40,9	39,3	6,8	25,4	1,7	54,2	33,6	4,4
Mittel	38,1	66,2	8,1	26,6	1,5	52,7	35,8	5,2

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Hühnermist								
1	58,1	78,5	21,4					
2	38,5	74,2	25,4					
3	52,4	81,9	22,6					
4	36,1	74,8	16,2	13,8	2,2	35,1	22,3	5,6
5	66,1	79,0						
6	46,6	79,5	20,8	21,4	1,1	48,6	34,3	10,5
7	52,6	58,6	15,9	23,0	0,9	41,9	33,3	6,4
8	39,2	74,7	16,9	21,8	1,2	51,2	43,5	18,4
9	31,6	75,0	12,7	24,6	4,3	47,9	33,2	8,3
10	44,0	73,1	13,4	27,4	3,8			
11	71,6	63,5	13,4	14,7	0,7			
12	70,1	80,3						
13	75,6	81,4						
14	76,1	59,7						
15	44,4	81,1	26,1	16,2	2,2	43,2	24,5	4,5
16	27,4	71,0	18,9	20,4	2,1	44,4	31,2	8,5
17	69,2	79,5	17,9	20,4	0,7	50,7	35,0	7,6
18	52,4	79,2	23,9	18,1	1,7	41,5	25,5	5,0
19	26,7	58,9	14,8	25,0	2,0	44,1	32,5	7,7
20	25,4	85,2	17,2	19,8	4,4	41,6	30,1	2,5
21	33,9	56,7	13,7	20,4	1,8	45,6	34,4	5,7
22	17,2	82,6	15,4	0,0	1,1	63,9	41,0	9,0
23	52,7	84,5	29,3	18,3	3,3	39,2	26,9	5,2
24	67,6	79,6	19,1	22,1	1,2	54,0	33,7	6,0
25	82,5	57,7	13,7	20,3	1,4	46,0	30,6	4,5
26	57,9	83,6	15,9	21,7	2,2	49,1	31,0	6,7
27	48,0	86,7	19,3	15,9	1,7	41,5	24,6	6,2
28	39,7	81,4	17,4	25,5	1,1	55,5	38,0	7,5
Mittel	50,1	75,1	18,4	19,6	2,0	46,6	31,9	7,1

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Rindermist								
1	23,9	86,1	12,6					
2	21,9	86,3	11,3					
3	19,3	83,9	12,5	27,2	3,5			
4	17,5	85,5	13,1	25,5	1,8	66,1	44,6	11,7
5	22,8	81,3	11,8	23,9	1,3	68,2	53,4	13,2
6	19,0	75,7	15,3	19,9	1,7	60,6	49,5	18,1
7	30,7	73,6	15,8	24,1	1,0			
8	25,5	72,8	13,8	19,5	1,5			
9	19,1	83,1						
10	25,3	68,1						
11	19,5	68,3						
12	21,0	82,0	13,6	28,3	1,2	62,5	57,1	21,0
13	15,9	81,4	15,3	22,3	0,8	59,0	51,1	19,6
14	19,4	80,9	13,6	29,1	0,9	60,9	54,3	19,9
15	21,5	81,0	15,0	25,3	1,4	63,0	52,2	21,0
16	49,3	76,6	18,7		2,0	46,1	31,1	7,9
17	32,8	77,1	11,3	28,3	1,9	60,2	46,6	11,5
18	21,6	81,5	13,5	28,9	1,6	62,4	48,5	15,6
19	31,5	71,6	14,1	31,6	0,8	52,8	42,9	11,3
Mittel	24,1	78,8	13,8	25,7	1,5	60,2	48,3	15,5

Tab. 24: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 18

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Oenanth* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	11,5	67,3	8,2	3193	742	0,22	292	276	19	0	0	0	0			
2	9,8	68,6	8,1	2809	545	0,29	203	137	81	0	0	0	0			
3	12,1	73,0	8,1	3030	587	0,32	937	431	625	0	0	0	0			
4	12,7	72,7	7,9	3259	429	0,49	4.359	2.203	2.480	74	15	129	0	6,8		
5	8,4	71,5	7,5	2194	125	0,49	2.977	1.570	1.649	33	24	52	0	4,5		
6	10,8	74,4	7,6	2668	189	0,57	4.873	2.132	3.167	90	6	161	0	5,8		
7	12,6	77,7	7,6	2542	180	0,48	3.654	2.115	1.704	39	0	43	228	5,8	1,0	8,1
8	11,8	78,0	7,6	2079	147	0,46	1.929	1.594	414	0	0	0	0			
9	9,8	76,6	7,6	2034	144	0,30	960	882	97	0	0	0	0			
10	7,7	72,4	7,6	1987	140	0,33	999	896	117	2	9	1	0			
11	9,1	71,9	7,7	1932	169	0,34	1.790	1.420	423	25	0	16	0			
12	8,3	73,0	7,5	2048	117	0,45	2.993	1.968	1.148	93	4	49	0			
13	9,3	74,2	7,7	2331	204	0,34	1.871	1.583	354	0	0	0	0	5,0	0,8	7,0
14	9,8	73,1	7,6	2454	173	0,38	2.017	1.469	522	34	0	18	0			
15	10,1	73,3	7,7	2690	235	0,37	2.513	1.615	1.061	35	0	23	0			
16	10,1	73,9	7,7	2871	251	0,39	2.618	1.410	1.452	27	0	21	0			
17	10,5	73,7	7,8	2932	315	0,39	2.755	1.524	1.446	47	0	44	0			
18	11,2	74,3	7,9	3231	426	0,43	3.494	1.486	2.367	54	0	72	0			
19	10,9	74,4	7,8	3203	345	0,51	4.505	1.284	3.902	42	5	43	0			
20	11,7	75,7	7,8	3505	377	0,56	4.582	1.367	3.856	48	0	86	0			
21	13,6	76,4	7,7	3386	296	0,64	6.211	1.800	5.077	112	30	263	14			
22	12,1	75,7	7,9	3122	411	0,71	6.869	1.862	5.556	151	71	510	0			
23	12,5	76,1	8,0	2880	462	0,71	7.673	2.223	6.387	106	11	293	0			
24	12,6	74,0	7,7	2804	245	0,76	6.729	1.875	5.525	118	34	397	0			
25	11,8	73,9	8,1	2708	525	0,60	6.409	984	6.254	94	52	114	203			
26	12,2	74,2	7,8	2958	318	0,59	7.955	1.481	7.784	91	27	96	18			
27	11,3	76,3	7,8	2657	298	0,51	3.603	1.104	3.408	32	0	24	0			
28	10,6	78,3	8,1	2243	427	0,43	2.180	1.533	794	0	0	0	9			
29	11,9	77,8	8,0	2253	328	0,25	1.284	1.128	192	0	0	0	0			
* Säuren																
Mittelwert	10,9	74,2	7,8	2.690	315	0,46	3.422	1.426	2.340					5,6	0,9	7,6
Maximum	13,6	78,3	8,1	3.505	587	0,76	7.955	2.223	7.784					6,8	1,0	8,1
Minimum	7,7	68,6	7,5	1.932	117	0,25	203	137	81					4,5	0,8	7,0

Tab. 25: Analysenergebnisse der Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage 18

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Oenanth* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	12,7	62,5	8,4	4.057	1.315	0,17	94	94	0	0	0	0	0	7,2	1,2	8,8
2	9,5	65,8	8,4	3.780	1.226	0,26	196	175	26	0	0	0	0	6,2	0,8	8,7
3	9,8	68,6	8,1	3.777	732	0,20	130	130	0	0	0	0	0	6,2	1,0	8,6
4	10,2	68,8	7,5	3.812	217	0,19	129	129	0	0	0	0	0	6,4		
5	9,8	69,9	8,0	3.689	592	0,18	451	451	0	0	0	0	0	6,1	1,0	8,2
6	9,5	71,1	8,0	3.322	533	0,33	132	132	0	0	0	0	0			
7	8,6	71,6	7,8	2.831	305	0,18	126	126	0	0	0	0	0			
8	7,4	71,5	8,0	2.628	422	0,21	84	84	0	0	0	0	0			
9	7,7	70,7	8,2	2.454	570	0,22	283	283	0	0	0	0	0			
10	6,3	68,1	8,1	2.650	514	0,22	151	151	0	0	0	0	0	4,6	0,5	6,8
11	6,9	66,9	8,0	2.672	429	0,21	53	53	0	0	0	0	0	4,6	0,8	6,7
12	5,9	66,9	8,0	2.663	427	0,20	193	193	0	0	0	0	0	4,5	0,5	6,6
13	7,6	70,6	7,9	2.870	378	0,20	213	213	0	0	0	0	0	5,0	0,7	7,3
14	8,3	69,4	8,0	3.404	546	0,18	153	153	0	0	0	0	0			
15	7,4	69,1	8,0	3.490	560	0,24	252	230	27	0	0	0	0			
16	9,0	68,0	8,1	3.620	702	0,23	1.039	780	319	0	0	0	0			
17	9,3	69,8	8,1	3.558	690	0,21	38	38	0	0	0	0	0			
18	7,8	71,6	8,2	3.693	858	0,22	91	76	11	0	0	6	5			
19	9,9	70,8	8,3	3.806	1.050	0,25	556	201	413	0	0	33	0			
20	9,4	69,0	8,1	3.605	699	0,26	411	211	150	0	0	134	0			
21	10,0	70,0	8,1	3.747	746									6,8	1,1	8,7
22	10,4	69,8	8,2	3.804	884	0,23	318	146	204	0	0	0	13			
23	10,0	69,3	8,1	3.866	722	0,22	123	123	0	0	0	0	0			
24	9,8	70,5	8,0	3.654	598	0,22	211	156	0	0	0	0	51			
25	9,5	70,4	8,0	3.629	560	0,23	462	400	77	0	0	0	0			
* Säuren																
Mittelwert	8,9	69,2	8,1	3.403	651	0,22	245	197	51					5,8	0,8	7,8
Maximum	12,7	71,6	8,4	4.057	1.315	0,33	1.039	780	413					7,2	1,2	8,8
Minimum	5,9	62,5	7,5	2.454	217	0,17	38	38	0					4,5	0,5	6,6

Tab. 26: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 18

Probe Nr.	TS %	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Grassilage								
1	31,0	89,9	16,1					
2	29,4	89,0	16,9					
3	47,5	87,4	17,1	23,2	3,5	37,0	31,7	3,3
4	26,6	89,2	20,0	21,8	2,8	44,8	31,6	3,4
5	22,5	90,1	15,1	22,5	2,5	46,8	31,3	2,9
6	24,4	86,8	13,9	35,6	2,5	64,5	49,3	10,0
7	29,7	89,2						
8	23,1	88,5						
9	17,1	89,9						
10	18,3	88,1						
11	22,5	90,8	16,4	25,3	3,9			
12	22,6	88,4	13,3	28,7	2,4			
13	19,8	89,9						
14	20,9	90,8						
15	22,4	90,8						
16	26,9	89,3						
17	21,5	88,8	19,6	19,3	3,6	44,5	32,6	5,5
18	29,3	88,1	17,5	20,0	2,9	44,0	30,6	4,3
19	27,7	87,4	19,4	18,9	3,8	43,2	28,9	3,7
20	34,8	84,9	17,3	0,0	3,7	41,4	27,3	3,1
21	27,4	88,4	20,6	20,5	4,2	44,7	31,1	3,4
22	38,9	87,6	17,7	24,4	1,5	47,5	35,8	4,9
23	48,5	91,4	10,9	24,4	1,9	52,8	35,3	3,3
24	46,7	91,8	11,1	19,7	1,8	39,7	25,8	1,9
25	16,4	93,7	14,8	4,8	2,2	17,1	7,0	0,6
26	28,9	90,1	15,1	26,7	1,7	53,5	38,0	6,3
Mittel	27,9	89,2	16,3	21,0	2,8	44,4	31,2	4,0

Probe Nr.	TS %	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Maissilage								
1	27,8	96,9	7,1	18,9	3,0	45,0	26,7	3,7
2	35,6	97,3	8,0	16,9	2,8	37,7	24,3	2,8
3	34,6	96,1						
Mittel	32,7	96,7	7,5	17,9	2,9	41,4	25,5	3,3
Rindergülle								
1	9,9	83,4	13,2	23,6	2,7	48,9	36,9	13,0
2	13,5	67,4	13,3	20,0	3,1			
3	10,6	70,6						
Mittel	11,3	73,8	13,3	21,8	2,9	48,9	36,9	13,0
Rindermist								
1	24,3	81,0	8,9	36,7	0,6	73,9	54,9	12,2
2	16,8	87,3						
3	16,5	86,8	11,3	30,1	1,5	68,3	47,1	9,5
4	37,4	84,6	16,8	30,5	0,9	63,9	52,0	18,1
5	22,1	87,9	11,3	0,0	0,7	73,0	56,7	17,2
Mittel	23,4	85,5	12,0	24,3	0,9	69,8	52,7	14,3
Getreide								
1	87,5	86,2						
2	83,3	81,3						
3	85,9	97,6	12,6	2,3	1,1			
4	86,4	98,1						
5	87,4	96,7	9,9	7,5	3,2	24,4	11,0	1,7
6	87,8	97,0	9,6	6,7	4,2	24,3	10,5	1,7
7	87,0	96,5	12,4	7,6	2,4	32,6	11,6	1,1
Mittel	86,5	93,3	11,1	6,0	2,7	27,1	11,0	1,5

Tab. 27: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 19

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	3,7	60,6	7,9	1.582	299	0,25	75	75	0	0	0	0	0			
2	4,0	59,5	8,0	1.743	395	0,16	83	83	0	0	0	0	0			
3	3,6	68,0	7,9	1.576	298	0,42	606	383	101	46	50	49	51			
4	6,2	73,1	7,9	1.587	300	0,32	204	185	23	0	0	0	0	3,0		
5	8,3	69,3	7,9	1.573	297	0,45	111	111	0	0	0	0	0	3,4		
6	6,0	65,5	8,0	1.668	378	0,28	166	166	0	0	0	0	0	3,1		
7	6,1	64,1	8,0	1.662	377	0,19	115	115	0	0	0	0	0			
8	6,1	69,8	7,9	1.506	285	0,16	55	55	0	0	0	0	0			
9	9,7	69,3	7,6	1.721	180	0,18	141	110	39	0	0	0	0			
10	8,1	69,8	7,8	1.750	273	0,19	84	84	0	0	0	0	0			
11	9,1	67,8	7,7	1.720	221	0,25	59	59	0	0	0	0	0			
12	6,2	69,9	8,0	1.569	356	0,23	205	186	23	0	0	0	0			
13	5,9	68,3	8,0	1.502	341	0,21	388	365	28	0	0	0	0			
14	4,8	72,1	8,1	1.755	473	0,22	415	390	30	0	0	0	0			
15	8,3	71,6	8,0	2.062	468	0,21	356	321	43	0	0	0	0			
16	6,0	72,6	8,2	2.050	651	0,22	402	362	50	0	0	0	0			
17	6,1	70,5	8,1	2.096	565	0,28	613	560	65	0	0	0	0			
18	5,8	69,9	8,2	2.196	697	0,23	514	475	48	0	0	0	0			
19	5,5	72,5	8,1	1.917	517	0,26	426	384	53	0	0	0	0			
20	7,3	74,4	8,0	2.189	497	0,23	497	400	66	6	9	15	9			
21	5,4	73,0	8,1	2.025	546	0,21	252	235	21	0	0	0	0			
22	5,7	72,9	7,9	1.944	367	0,22	488	441	57	0	0	0	0			
23	6,8	71,4	8,0	2.017	458	0,27	674	588	85	11	7	8	0			
24	9,5	70,9	7,8	2.364	369	0,22	394	343	43	17	29	7	6			
25	8,7	73,8	8,0	2.119	481	0,37	958	757	163	25	37	11	19			
26	8,7	72,7	7,8	2.133	353	0,27	611	531	68	0	0	0	0			
*Säuren																
Mittelwert	7,0	70,9	8,0	1.915	424	0,23	382	338	44	3	4	2	2	3,2		
Maximum	9,7	74,4	8,2	2.364	697	0,45	958	757	163	46	50	49	51	3,4		
Minimum	3,6	59,5	7,6	1.502	180	0,16	55	55	0	0	0	0	0	3,0		

*die ersten drei Probenahmen an Stufe 1 waren nicht repräsentativ und wurden beim mittleren TS deshalb nicht berücksichtigt

Tab. 28: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 19

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FF S (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	3,6	61,3	8,0	1.617	367	0,32	58	58	0	0	0	0	0	2,7	0,4	3,9
2	5,2	67,0	7,8	1.549	242	0,38	147	147	0	0	0	0	0			
3	5,2	61,9	8,0	1.646	373		43	43	0	0	0	0	0	3,1		
4	6,8	66,1	8,0	1.780	404	0,24	183	166	20	0	0	0	0			
5	5,7	63,6	8,1	1.524	411	0,19	97	97	0	0	0	0	0			
6	5,5	66,6	7,7	1.572	201	0,20	117	117	0	0	0	0	0			
7	4,7	69,1	7,8	1.482	232	0,24	532	397	129	0	43	2	0			
8	5,4	63,9	7,6	1.740	182	0,21	58	59	0	0	0	0	0			
9	4,1	59,9	7,7	1.881	241	0,18	77	78	0	0	0	0	0			
10	3,5	66,2	8,2	1.613	512	0,24	67	66	0	0	0	0	0			
11	3,0	65,9	8,1	1.416	382	0,29	198	194	5	0	0	0	0	2,4	0,4	3,4
12	4,4	71,4	7,8	1.698	265	0,27	753	551	175	14	58	20	0	2,9	0,4	3,7
13	6,4	74,1	8,2	1.956	621	0,20	227	207	25	0	0	0	0			
14	4,2	66,4	7,6	2.005	210	0,22	557	532	31	0	0	0	0			
15	4,0	68,0	8,2	2.151	683	0,18	189	189	0	0	0	0	0			
16	4,8	68,6	8,3	2.146	792	0,37	279	249	37	0	0	0	0			
17	4,9	71,4	8,2	1.872	594	0,20	135	135	0	0	0	0	0			
18	3,6	67,8	8,2	1.940	616	0,19	149	149	0	0	0	0	0			
19	4,0	65,9	7,8	2.010	314	0,17	376	367	11	0	0	0	0			
20	4,3	70,0	8,0	1.857	421	0,27	867	680	159	18	46	16	9			
21	4,8	70,5	7,3	2.106	116	0,25	726	509	114	26	45	18	33			
22	5,2	71,2	8,1	2.014	516	0,24	342	338	14	0	0	0	0			
*Säuren																
Mittelwert	4,7	67,4	7,9	1.820	404	0,23	299	256	36	3	10	3	2	2,8	0,4	3,7
Maximum	6,8	74,1	8,3	2.151	792	0,38	867	680	175	26	58	20	33	3,1	0,5	3,9
Minimum	3,0	59,9	7,3	1.416	116	0,17	43	43	0	0	0	0	0	2,4	0,4	3,4

Tab. 29: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 19

Probe Nr.	TS %	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Grassilage								
1	34,4	86,5						
2	24,8	68,2	17,8	14,5	3,1			
3	23,7	65,7	7,6	12,5	3,4	48,7	33,0	2,5
4	32,8	67,8	17,2	10,0	2,6	55,1	40,8	3,2
5	25,4	89,0	17,0	21,5	3,1	55,2	33,2	2,7
6	24,5	85,6						
7	27,6	90,1	17,6	20,2	3,7			
8	42,3	96,1	17,3	19,5	4,3			
9	28,9	90,7						
10	42,7	90,0	18,0	19,2	5,3			
11	41,1	89,6	17,8	19,6	4,5	44,7	29,7	4,6
12	22,9	85,5	20,0	18,6	4,3	49,1	30,1	3,0
13	19,6	86,8	17,8	17,9	5,3	49,7	31,9	3,3
14	30,9	96,4	8,1	19,3	2,4	44,2	25,1	2,2
15	41,7	96,7	7,4	0,0	2,5	39,0	20,7	1,9
16	40,3	96,8	6,9	15,3	1,2	41,7	22,4	1,9
17	34,8	94,0	8,4	27,9	4,1			
18	28,9	91,8	11,3	33,5	1,3	74,3	44,0	4,7
19	44,4	91,0	16,4	23,1	2,8	49,8	29,5	2,0
20	43,0	90,4	15,1	26,9	2,5	50,8	33,0	3,2
21	44,5	90,9	16,4	23,5	2,6	48,4	30,0	2,5
22	28,7	91,0	12,3	27,2	1,5	63,7	39,3	4,2
23	26,0	89,7	15,3	23,8	2,2	54,1	34,0	3,1
24	22,4	93,6	9,7	37,6	1,1	76,1	47,3	5,5
Mittel	32,3	88,1	14,1	20,6	3,0	52,8	32,8	3,2

Probe Nr.	TS %	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Maissilage								
1	32,8	97,3	7,8	18,8	2,3			
2	33,5	97,2	16,5	16,7	2,8	41,6	21,9	1,1
3	34,2	96,7	8,3	15,1	3,2	38,7	21,4	2,0
4	31,0	96,2	9,7	14,3	3,1	34,6	21,9	2,7
5	35,7	96,8	8,0	18,2	2,6	42,3	24,3	2,6
6	40,8	96,9	7,8	14,1	2,3	40,2	22,8	2,6
7	35,3	96,9	8,3	13,9	2,3	40,4	22,5	2,7
8	32,7	96,1	8,3	16,2	2,4	41,8	22,2	1,6
9	42,3	96,1	7,8	17,1	2,6	44,0	23,7	2,2
10	31,4	96,1	8,4	19,4	1,5	45,8	26,4	2,3
11	30,9	96,4	8,1	19,3	2,4	44,2	25,1	2,2
12	41,7	96,7	7,4	0,0	2,5	39,0	20,7	1,9
13	27,0	98,0	6,8	17,7	3,0	46,3	26,2	2,5
Mittel	34,6	96,7	8,7	15,4	2,5	41,6	23,3	2,2
Rindergülle								
1	3,3	67,3	17,8	11,1	3,9	34,8	30,7	12,5
2	5,8	81,4	15,7	24,0	3,2	55,6	44,3	11,2
3	7,8	68,9	13,9	11,3	3,1	57,7	44,1	10,9
4	10,4	67,3	13,1	14,6	2,9	60,8	51,0	12,0
5	9,0	79,3						
6	7,2	53,9						
7	7,4	78,5						
8	8,6	80,5	15,0	22,6	6,4	0,0	0,0	0,0
9	9,5	84,0	16,6	24,0	5,0	54,4	39,9	14,3
10	6,0	78,3	15,3	14,6	1,8	41,2	27,0	9,3
11	5,6	77,9	16,1	14,5	2,0	43,8	26,3	9,4
Mittel	7,3	74,3	15,5	17,1	3,5	43,5	32,9	10,0

Tab. 30: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N mg/l	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	10,2	67,8	8,0	3.303	544	0,37	124	124	0	0	0	0			
2	8,7	69,5	8,1	3.263	649	0,35	76	76	0	0	0	0			
3	8,5	69,1	8,3	711	201	0,30	1.788	311	1.802	23	0	1			
4	10,0	70,6	8,1	3.802	756	0,47	2.941	402	3.089	29	0	25			
5	10,0	71,1	8,2	4.009	955	0,52	3.714	566	3.827	35	0	37	7,4		
6	10,9	70,9	8,1	4.045	805	0,62	6.050	930	6.118	81	0	168	7,8		
7	9,8	70,4	8,0	4.022	662	0,61	6.121	250	7.181	34	0	42	7,3		
8	9,4	70,2	8,1	3.810	758	0,50	4.465	636	4.512	18	0	20	6,8	0,8	8,8
9	9,1	67,5	8,1	3.502	696	0,33	1.068	616	558	0	0	0	6,4		
10	9,3	63,8	8,1	3.587	713	0,24	578	414	203	0	0	0	6,3		
11	6,6	68,5	7,8	3.227	357	0,19	157	156	0	0	0	0			
12	6,5	63,8	8,1	3.130	622	0,41	2.833	2.637	151	26	21	72			
13	10,0	69,6	8,1	3.701	736	0,39	2.313	460	2.188	42	0	27			
14	10,7	69,7	8,1	3.939	783	0,39	2.429	388	2.501	17	0	2			
15	10,6	68,1	8,2	4.081	972	0,34	2.117	358	2.142	23	0	13			
16	10,4	68,8	8,3	4.072	1.150	0,29	1.208	432	953	6	0	0			
17	11,3	70,1	8,3	4.006	1.131	0,30	1.054	232	1.014	0	0	0			
18	11,2	66,2	8,2	4.203	1.001	0,29	1.094	231	1.065	0	0	0			
19	14,9	67,8	8,2	4.180	995	0,34	1.594	484	1.369	0	0	0			
20	11,2	67,6	8,3	4.629	1.307	0,24	658	200	564	0	0	0			
21	14,1	71,7	8,4	4.814	1.595	0,52	5.246	1.019	4.564	97	28	732			
22	8,8	74,6	7,5	3.098	182	0,77	6.428	3.444	2.840	221	160	647			
23	10,7	73,7	8,3	5.143	1.452	0,86	11.903	4.443	6.018	1.291	226	2.494			
24	12,4	71,3	7,8	4.792	530	0,66	6.119	1.324	5.056	76	29	1.030			
25	10,5	72,6	7,9	4.005	542	0,47	4.356	404	4.650	50	26	65			
26	9,0	70,4	7,9	3.796	514	0,29	730	692	26	14	17	11			
27	9,3	70,3	8,1	3.930	726	0,25	564	563	20	0	0	0			
28	9,5	70,0	8,0	3.687	619	0,26	402	397	49	0	0	0			
29	10,6	69,3	8,1	3.789	686	0,27	590	531	72	0	0	0			
*Säuren															
Mittel	10,1	69,5	8,1	3.803	781	0,41	2.714	783	2.156	72	17	186	7,0	0,8	8,8
Maximum	14,9	74,6	8,4	5.143	1.595	0,86	11.903	4.443	7.181	1.291	226	2.494	7,8	0,8	8,8
Minimum	6,5	63,8	7,5	710,6	182	0,19	76	76	0	0	0	0	6,3	0,8	8,8

Tab. 31: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 20

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH ₄ -N (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	11,1	68,0	8,3	3.633	957	0,33	56	57	0	0	0	0	6,7	1,1	7,0
2	7,0	68,7	8,3	2.834	747	0,20	47	48	0	0	0	0			
3	8,3	66,4	8,1	4.133	761	0,42	148	122	32	0	0	0	6,8	0,8	7,7
4	8,5	66,0	8,4	4.515	1.402	0,19	112	68	54	0	0	0	7,3		
5	8,3	66,1	8,4	4.438	1.378	0,33	1.068	616	558	0	0	0	7,1		
6	8,2	63,3	8,4	4.139	1.285	0,24	578	414	203	0	0	0	6,6		
7	9,4	63,2	8,3	3.980	1.048	0,19	157	156	0	0	0	0			
8	6,9	65,9	8,3	3.807	1.003	0,19	61	29	23	0	0	0	6,2	0,5	7,2
9	8,0	65,7	8,3	4.059	1.069	0,22	181	96	106	0	0	0	6,8	0,7	8,2
10	9,5	64,4	8,3	4.320	1.138	0,19	173	148	31	0	0	0	7,1	1,1	8,2
11	9,7	65,6	8,3	4.675	1.231	0,20	104	105	0	0	0	0	7,8	0,9	9,3
12	9,8	65,6	8,3	4.550	1.199	0,20	68	68	0	0	0	0	7,7	0,9	9,5
13	10,3	65,8	8,3	4.642	1.223	0,21	74	74	0	0	0	0	7,9	1,0	9,8
14	12,2	66,6	8,4	5.085	1.579	0,22	157	85	73	0	0	22	8,6	1,3	10,7
15	11,5	67,6	8,4	4.769	1.481	0,22	688	464	177	26	39	39	8,1	1,2	9,3
16	11,6	67,2	8,5	5.106	1.847	0,26	1.333	115	1.501	0	0	2	8,5	1,2	9,9
17	11,2	67,3	8,4	5.231	1.624	0,49	656	267	391	15	17	72			
18	10,9	68,5	8,4	4.721	1.466	0,20	195	141	52	0	0	16	7,8	1,4	10,1
19	10,2	68,2	8,4	4.913	1.525	0,22	91	91	0	0	0	0	7,9	1,2	8,8
20	9,8	67,2	8,3	4.882	1.264	0,19	72	72	0	0	0	0			
21	8,5	65,7	8,3	4.465	1.098	0,20	99	92	0	0	0	0			
*Säuren															
Mittel	9,6	66,3	8,3	4.424	1.254	0,24	291	159	152	2	3	7	7,4	1,0	8,9
Maximum	12,2	68,7	8,5	5.231	1.847	0,49	1.333	616	1.501	26	39	72	8,6	1,4	10,7
Minimum	6,9	63,2	8,1	2.834	747	0,19	47	29	0	0	0	0	6,2	0,5	7,0

Tab. 32: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 20

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Grassilage								
1	28,4	92,0						
2	24,2	90,8						
3	24,5	87,9						
4	24,1	89,5						
5	31,4	87,7	17,7	19,3	3,5	48,0	34,1	3,2
6	27,7	87,7	9,7	25,3	3,3	61,6	41,0	6
7	22,2	83,4	19,1				36,7	
8	28,4	71,7	19,1	16,5	3,3	48,7	31,4	3,2
9	36,0	91,7						
10	56,4	92,4	16,4	17,8	2,9			
11	38,2	94,4	16,0	25,4	2,1			
12	29,4	86,4	14,6	26,1	2,5			
13	31,1	92,9	19,2	19,6	2,8			
14	31,1	85,8	15,3	21,8	3,4			
15	33,5	77,5	14,4	18,7	3,2			
16	47,7	91,2	19,3	19,8	3,8			
17	51,4	90,5	19,3	21,3	4,1			
18	53,6	92,3	16,8	22,8				
19	43,6	93,1	16,4	21,5				
20	40,7	90,2	15,8	21,3	3,4			
21	47,8	93,5	18,8	22,0	3,1			
22	34,8	91,6	15,8	26,0	1,7			
23	31,9	89,2	14,5	19,0	2,3			
24	22,7	90,9						
25	27,0	91,6						
Mittel	34,7	89,0	16,5	21,4	3,0	52,8	35,8	4,1

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Maissilage								
1	24,8	95,0						
2	35,6	96,4						
3	36,9	95,5						
4	32,1	97,5	7,9	18,3	2,6	48,8	31,3	3
5	28,5	96,5	8,1	23,7	2,5	52,4	32,2	3,8
6	24,5	95,5	8,4	19,7	2,7	52,0	31,6	4,6
7	25,4	97,3						
Mittel	29,7	96,2	8,2	20,6	2,6	51,1	31,7	3,8
Rindergülle								
1	5,2	75,0						
2	5,3	73,8	15,4	17,7	3,4			
3	6,6	77,5	13,8	12,4				
Mittel	5,7	75,4	14,6	15,1	3,4			

Tab. 33: Analysenergebnisse der Proben aus der ersten Vergärungsstufe von Pilotanlage 21

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N mg/l	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	12,4	70,9	8,0	2.487	399	0,26	417	408	60	0	0	4	0			
2	9,1	72,5	8,0	2.236	359	0,29	328	304	29	0	0	0	0			
3	8,2	74,8	7,8	1.551	167	0,22	414	378	45	0	0	0	0			
4	7,7	75,3	7,8	1.412	152	0,41	216	201	19	0	0	0	0			
5	10,0	68,4	7,6	1.694	120	0,24	86	85	0	0	0	0	0	4,5		
6	9,9	70,1	7,2	1.602	47	0,28	61	61	0	0	0	0	0	4,5		
7	8,5	72,4	7,6	1.601	102	0,26	87	87	0	0	0	0	0	4,1		
8	8,2	73,2	7,7	1.429	112	0,22	101	101	0	0	0	0	0	4,2	0,7	5,2
9	8,3	73,6	7,4	1.315	60	0,21	35	35	0	0	0	0	0	3,9	0,7	5,2
10	10,2	71,0	7,6	1.642	104	0,23	44	44	0	0	0	0	0	4,3	0,7	5,6
11	9,3	72,2	7,6	1.763	125	0,26	197	185	10	0	0	0	0			
12	11,5	71,8	7,8	1.777	191	0,26	335	335	0	0	0	0	0			
13	12,5	64,4	7,6	2.201	156	0,20	281	272	12	0	0	0	0			
14	10,4	63,6	7,6	2.106	149	0,27	1.346	1.051	193	54	81	79	0			
15	13,1	67,7	7,8	2.855	277	0,22	322	314	11	0	0	0	0			
16	13,0	71,6	7,7	2.725	238	0,21	308	293	19	0	0	0	0			
17	12,7	71,8	7,7	3.176	278	0,37	629	424	177	12	66	7	6			
18	11,6	74,2	7,5	3.033	155	0,28	448	416	21	0	14	8	0			
19	8,7	76,1	7,8	2.612	253	0,25	607	596	14	0	0	0	0			
20	8,7	77,6	7,5	1.932	110	0,25	353	313	30	3	13	10	0			
21	8,9	78,7	7,5	1.571	90	0,29	959	874	55	18	32	10	0			
22	10,7	75,8	7,4	1.464	67	0,35	962	915	47	26	14	25	0			
23	9,9	78,1	7,6	1.641	116	0,22	531	501	26	0	8	0	0			
24	8,4	73,6	7,5	1.950	104	0,34	1.076	761	241	9	116	17	34			
*Säuren																
Mittel	10,1	72,5	7,6	1.991	164	0	423	373	42	5	14	7	2	4,3	0,7	5,3
Maximum	13,1	78,7	8,0	3.176	399	0	1.346	1.051	241	54	116	79	34	4,5	0,7	5,6
Minimum	7,7	63,6	7,2	1.315	47	0	35	35	0	0	0	0	0	3,9	0,7	5,2

Tab. 34: Analysenergebnisse der Proben aus der zweiten Vergärungsstufe von Pilotanlage 21

Proben Nr.	TS (%)	oTS (%)	pH	NH4-N (mg/l)	NH3-N (mg/l)	FOS/TAC (mmol/l)	FFS (ges.) (mg/l)	Essig* (mg/l)	Propion* (mg/l)	iso-Butter* (mg/kg)	Butter* (mg/kg)	Iso-Valerian* (mg/kg)	Valerian* (mg/kg)	N ges. (g/l)	P ges. (g/l)	K ges. (g/l)
1	10,7	66,2	8,1	2.700	524	0,24	250	237	17	0	0	0	0			
2	8,4	70,1	7,9	2.342	309	0,28	68	68	0	0	0	0	0	4,7	0,7	5,3
3	7,6	73,8	7,8	1.552	167	0,24	282	275	9	0	0	0	0			
4	7,6	75,0	7,8	715	77	0,40	240	220	24	0	0	0	0			
5	9,7	67,5	7,5	1.698	97	0,27	38	38	0	0	0	0	0	4,4	0,8	5,7
6	8,9	67,4	7,6	1.686	119	0,24		0	0	0	0	0	0	4,3		
7	9,6	72,2	7,6	1.679	119	0,24	44	44	0	0	0	0	0	4,6		
8	8,0	71,6	7,6	1.584	112	0,27	23	23	0	0	0	0	0	4,1	0,7	5,1
9	7,5	72,8	7,6	1.413	100	0,34	51	17	0	0	0	0	0	3,8		
10	7,8	70,6	7,4	1.381	63	0,24	27	27	0	0	0	0	0			
11	9,1	68,6	7,7	1.731	151	0,21	29	29	0	0	0	0	0	4,3	0,7	5,7
12	7,6	69,3	7,7	1.731	151	0,27	183	167	20	0	0	0	0	3,9	0,6	5,2
13	9,6	67,7	7,6	2.117	150	0,24	64	64	0	0	0	0	0			
14	11,1	66,3	7,6	2.382	168	0,17		109	0	0	0	0	0	5,4	0,9	6,9
15	11,5	62,0	7,7	2.539	222	0,18		293	33	0	0	23	0	5,7	1,1	7,8
16	10,6	63,4	7,8	2.871	309	0,19		132	0	0	0	0	0	5,7	1,1	7,1
17	11,0	68,3	7,8	3.166	341	0,17		64	0	0	0	0	0	6,1	1,2	7,3
18	12,0	69,2	7,7	3.048	266	0,29		151	0	0	0	0	0	6,1	1,2	7,0
19	10,2	71,8	7,7	3.157	276	0,21		262	10	0	0	0	0	5,9	1,2	7,1
20	8,4	73,0	7,9	3.020	398	0,19		102	0	0	0	0	0	5,2	1,1	6,1
21	7,7	73,1	7,6	2.367	167	0,19		135	7	0	0	1	0	4,5	0,9	5,8
22	7,3	73,9	7,7	2.068	181	0,17		160	23	0	0	0	0			
23	6,7	74,3	7,7	1.895	166	0,46		84	0	0	0	0	0	4,0	0,9	5,1
24	7,9	66,6	7,2	1.865	55	0,17		85	0	0	0	0	0			
25	6,6	71,9	7,5	1.667	93	0,43		1.346	580	30	321	49	92			
*Säuren																
Mittel	8,8	70,0	7,7	2.070	177	0	95	162	29	1	13	3	4	4,9	0,9	6,2
Maximum	12,0	75,0	7,9	3.166	398	0	282	1.346	580	30	321	49	92	6,1	1,2	7,8
Minimum	6,6	62,0	7,2	715	55	0	23	0	0	0	0	0	0	3,8	0,6	5,1

Tab. 35: Ergebnisse der Substratanalysen von Pilotanlage 21

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Grassilage								
1	25,7	88,8	12,9					
2	22,0	91,7	12,6	29,3	2,3			
3	27,4	76,9	14,4	19,0	3,1	51,6	37,1	4,1
4	26,3	89,4	14,3	27,5	3,2	58,3	44,3	6
5	23,0	87,3	14,4	26,3	3,2	61,6	45,7	8,3
6	28,1	88,8	12,8	25,9	1,5	63,7	46,8	6,4
7	23,8	91,9	12,8	30,7	3,1	67,5	32,4	18,8
8	25,3	88,7	11,6	28,6	2,4	64,4	41,0	5,8
9	20,7	88,3	11,6	20,1	3,0			
10	19,8	90,5	12,8	28,6	3,8			
11	31,3	91,9						
12	31,7	90,3	18,4	21,4	4,0			
13	27,3	75,7	11,8	11,7	2,2			
14	24,6	88,5	14,8	16,8	3,4			
15	20,1	89,9	12,7	32,7	3,7			
16	23,3	88,2	13,2	26,0				
17	21,5	90,5						
18	25,9	83,7	16,3	22,5	2,8			
19	27,3	87,1	14,4	20,6	1,8			
20	22,5	81,6	14,4	26,0				
21	20,3	86,5						
22	22,4	85,4						
Mittel	24,6	87,4	13,7	24,3	2,9	61,2	41,2	8,2
Rindermist								
1	22,0	73,0	16,1					
2	24,3	70,6	16,4	27,8	1,1	59,5	46,1	10,9
3	30,6	80,1	11,8	27,4	1,6			
4	22,7	88,2	14,3	25,2				
Mittel	24,9	78,0	14,7	26,8	1,4	59,5	46,1	10,9
Rindergülle								
1	4,6	77,2	15,4	25,9	2,2			

Probe Nr.	TS (%)	oTS (% TS)	RP (% TS)	RF-TM (% TS)	OEL-TM (% TS)	NDF (% TS)	ADF (% TS)	ADL (% TS)
Maissilage								
1	42,0	96,9	7,9					
2	30,1	95,8	8,8	19,7	2,7	45,6	26,9	2,3
3	33,2	96,9	8,9	14,3	3,4	38,0	21,6	1,7
4	34,4	96,7	11,0	17,8	3,2	45,8	26,5	2,6
5	34,2	96,4	8,1	19,3	3,0	46,1	25,8	2,8
6	31,7	95,2	8,3	19,4	3,0	42,5	25,3	27,2
7	36,7	95,3	8,4	19,3	3,0	42,9	26,4	3
8	32,6	96,6	7,9	15,9	2,8			
9	28,8	98,9	7,5	15,8	1,9			
10	30,7	94,5	8,2	24,1	2,8			
11	30,8	95,9	8,0	18,0	3,4			
12	38,1	96,6	8,8	17,0	3,7			2,2
13	35,5	97,1	8,1	14,6	3,2			
14	33,0	96,1	8,8	14,8	3,0			
15	31,9	96,6						
16	36,0	96,8						
Mittel	33,7	96,4	8,5	17,7	3,0	43,5	25,4	6,0
Getreide								
1	84,0	93,7	9,2	1,5	1,3			
2	86,2	98,2	10,0	1,6	1,6			
3	74,9	98,2	9,5	2,4	1,5			
4	73,0	89,1	10,3	1,5	1,2			
5	86,5	91,3	11,4	1,8	1,3			
6	87,9	88,5	9,8	2,1	1,4			
7	89,2	98,3	10,1	1,4				
	83,1	93,9	10,0	1,8	1,4			
GPS								
1	25,1	92,7	7,1	27,9	3,7			