

Monitoring von Biogasanlagen - Diversifizierung der Einsatzstoffe und Verfahrenstechnik

Abschlussbericht



Impressum:

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Vöttinger Straße 38, 85354 Freising

Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de

Tel.: 08161/71-3450

März 2016

© LfL



Monitoring von Biogasanlagen – Diversifizierung der Einsatzstoffe und Verfahrenstechnik

Abschlussbericht

Gabriel Streicher
Robert Kliche
Andreas Buschmann
Amelie Pohl
Dr. Mathias Effenberger

Auftraggeber:	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Ludwigstraße 2 86179 München
Auftragsdatum:	07.05.2012 EW/12/03
Projektleitung:	Dr.-Ing. Mathias Effenberger
Bearbeiter:	Gabriel Streicher Andreas Buschmann Robert Kliche Amelie Pohl
Berichtsabschluss:	08.03.2016
Berichtsumfang:	157 Seiten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	13
2	Zielsetzung	15
3	Material und Methoden.....	16
3.1	Auswahl neuer Biogasanlagen für das Betriebsmonitoring	16
3.2	Weitergeführte Pilotanlagen.....	18
3.3	Messtechnik und Datenerfassung.....	19
3.3.1	Gasmengenerfassung.....	19
3.3.2	Ermittlung der Gaszusammensetzung.....	20
3.3.3	Erfassung der Stromverbräuche	21
3.3.4	Einwicklung eines webbasierten elektronischen Betriebstagebuchs	22
3.3.5	Probenahme und chemische Analysen.....	24
3.3.6	Bewertung der erzielten Methanausbeute aus den Einsatzstoffen	26
3.4	Geographische Lage der Pilotbetriebe	27
3.5	Dokumentation baulicher und technischer Einrichtungen	27
3.6	Detaillierte Beschreibung der Biogasanlagen	28
3.6.1	Pilotanlage 8.....	28
3.6.2	Pilotanlage 10.....	30
3.6.3	Pilotanlage 12.....	31
3.6.4	Pilotanlage 15.....	33
3.6.5	Pilotanlage 16.....	35
3.6.6	Pilotanlage 22.....	37
3.6.7	Pilotanlage 23.....	39
3.6.8	Pilotanlage 24.....	41
3.6.9	Pilotanlage 25.....	43
3.7	Berechnung der Treibhausgasbilanz und des kumulierten Energieverbrauchs für die Energiebereitstellung aus Biogas.....	47
4	Ergebnisse und Diskussion	48
4.1	Einzelbetrachtung der Pilotanlagen.....	48
4.1.1	Pilotanlage 8.....	48
4.1.1.1	Einsatzstoffe	49
4.1.1.2	Prozessparameter.....	50
4.1.1.3	Leistungsparameter	53
4.1.2	Pilotanlage 10.....	57

4.1.2.1	Einsatzstoffe	57
4.1.2.2	Prozessparameter.....	59
4.1.2.3	Leistungsparameter	61
4.1.3	Pilotanlage 12.....	65
4.1.3.1	Einsatzstoffe	65
4.1.3.2	Prozessparameter.....	67
4.1.3.3	Leistungsparameter	70
4.1.4	Pilotanlage 15.....	73
4.1.4.1	Einsatzstoffe	73
4.1.4.2	Prozessparameter.....	75
4.1.4.3	Leistungsparameter	76
4.1.5	Pilotanlage 16.....	80
4.1.5.1	Einsatzstoffe	80
4.1.5.2	Prozessparameter.....	82
4.1.5.3	Leistungsparameter	85
4.1.6	Pilotanlage 22.....	89
4.1.6.1	Einsatzstoffe	89
4.1.6.2	Prozessparameter.....	91
4.1.6.3	Leistungsparameter	94
4.1.7	Pilotanlage 23.....	97
4.1.7.1	Einsatzstoffe	97
4.1.7.2	Prozessparameter.....	99
4.1.7.3	Leistungsparameter	101
4.1.8	Pilotanlage 24.....	104
4.1.8.1	Einsatzstoffe	104
4.1.8.2	Prozessparameter.....	107
4.1.8.3	Leistungsparameter	108
4.1.9	Pilotanlage 25.....	111
4.1.9.1	Einsatzstoffe	112
4.1.9.2	Prozessparameter.....	113
4.1.9.3	Leistungsparameter	115
4.2	Vergleich der Pilotanlagen.....	119
4.2.1	Einsatzstoffauswahl.....	119
4.2.2	Raumbelastung und Verweilzeit	120
4.2.3	Relative Gasausbeute	122

4.2.4	Realisierte elektrische Leistung und Auslastung der BHKW	123
4.2.5	Eigenstrombedarf	124
4.2.6	Wärmeproduktion und Wärmenutzung.....	125
4.2.7	Methanproduktivität.....	126
4.2.8	Stromausbeute aus Frischmasse und organischer Trockenmasse	127
4.2.9	Nutzungsgrad Methanenergie	129
4.2.10	Biogaszusammensetzung	130
4.2.11	Restmethanpotential in Gärrückständen aus den Pilotanlagen	131
4.2.12	Abbaugrad der oTS	132
4.2.13	THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas	133
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	138
6	Wissenstransfer	141
6.1	Publikationen	141
6.2	Veranstaltungen für die Betreiber der Pilot-Biogasanlagen.....	141
7	Literaturverzeichnis.....	142
	Anhang	144

Abbildungsverzeichnis

1.	Drallzähler für die Gasmengenerfassung auf Pilotanlage #12.....	20
2.	Gasanalysestation der Pilotbiogasanlage #24	21
3.	Stromzähler im zentralen Schaltkasten der Pilotbiogasanlage #24	22
4.	Eingabemaske Einsatzstoffe im Online-Betriebstagebuch	23
5.	Dateneingabemaske Technik im Online-Betriebstagebuch	24
6.	Eingabemaske von Wartungen und Routinearbeiten im Online- Betriebstagebuch.....	24
7.	Geografische Lage der beschriebenen Pilotanlagen im Biogas-Monitoring	27
8.	Fließbild der Pilotanlage #8	28
9.	Fließbild der Pilotanlage #10	30
10.	Fließbild der Pilotanlage #12	32
11.	Fließbild der Pilotanlage #15	34
12.	Fließbild der Pilotanlage #16	36
13.	Lageplan von Pilotbetrieb #22	37
14.	Fließbild der Pilotanlage #22	38
15.	Lageplan des Pilotbetriebs #23	39
16.	Fließbild der Pilotanlage #23	40
17.	Lageplan des Pilotbetriebs #24	41
18.	Fließbild der Pilotanlage #24	42
19.	Lageplan des Pilotbetriebs #25	44
20.	Fließbild der Pilotanlage #25	45
21.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #8 im Jahresmittel 2014	49
22.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #8 (tägliche Auflösung)	50
23.	Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 1 und Fermenter 2 von Pilotanlage #8	51
24.	Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Nachgärer 1 von Pilotanlage #8	52
25.	Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern und Nachgärern der Pilotanlage #8 52	
26.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #8	53
27.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 1 (250 kW) von Pilotanlage #8	54

28.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 2 (190/250 kW) von Pilotanlage #8	55
29.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 3 (250 kW) von Pilotanlage #8	56
30.	Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #8.....	56
31.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #10 im Jahresmittel 2014	58
32.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #10 (tägliche Auflösung)	58
33.	Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 1 von Pilotanlage #10 (n.v. = keine Probe verfügbar)	59
34.	Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 2 von Pilotanlage #10 (n.v. = keine Probe verfügbar)	60
35.	Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern 1 und 2 sowie im Nachgärbehälter der Pilotanlage #10	60
36.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 1 (240 kW) von Pilotanlage #10	61
37.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 2 (150 kW) von Pilotanlage #10	62
38.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 4 (265 kW) von Pilotanlage #10	63
39.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #10	64
40.	Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #10	65
41.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #12 im Jahresmittel 2014	66
42.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #12 (tägliche Auflösung)	66
43.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter 1 von Pilotanlage #12	67
44.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter 2 von Pilotanlage #12	68
45.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter 1 von Pilotanlage #12	68
46.	Trockensubstanzgehalte in den Hauptgärbehältern sowie im Nachgärbehälter 1 von Pilotanlage #12.....	69
47.	Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern 1 und 2 sowie in den Nachgärern 1 und 2 der Pilotanlage #12	70

48.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #12	71
49.	Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #12	72
50.	Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #12	73
51.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #15 im Jahresmittel 2014	74
52.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #15 (tägliche Auflösung)	74
53.	Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #15	75
54.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Gärbehälter von Pilotanlage #15	76
55.	Monatsmittelwerte der Raumbelastung und der Verweilzeit für Pilotanlage #15	76
56.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW von Pilotanlage #15	77
57.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #15	78
58.	Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #15	79
59.	Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #15 im Jahresmittel 2014	79
60.	Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #15	80
61.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #16 im Jahresmittel 2014	81
62.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage 16 (tägliche Auflösung)	81
63.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem vorderen Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16	82
64.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem mittleren Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16	83
65.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem hinteren Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16	83
66.	Monatsmittelwerte der Raumbelastung und der Verweilzeit für Pilotanlage #16	84
67.	Verlauf der Gärtemperatur im Fermenter und im Nachgärer von Pilotanlage #16	85
68.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW 1 (250 kW) von Pilotanlage #16	86

69.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW 2 (190 kW) von Pilotanlage #16	86
70.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #16	87
71.	Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #16.....	88
72.	Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb 16	89
73.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #22 im Jahresmittel 2014	90
74.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #22 (tägliche Auflösung)	90
75.	Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #22.....	91
76.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter 1 von Pilotanlage #22.....	92
77.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter 2 von Pilotanlage #22	92
78.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage #22	93
79.	Verlauf der Gärtemperatur in den Hauptgärbehältern 1 und 2 der Pilotanlage #22.....	93
80.	Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW von Pilotanlage #22.....	94
81.	Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #22	95
82.	Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #22.....	96
83.	Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #22 im Jahresmittel 2014	96
84.	Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #22	97
85.	Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #23 im Jahresmittel 2014	98
86.	Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #23 (tägliche Auflösung)	98
87.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter von Pilotanlage #23.....	99
88.	Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #23	100
89.	Verlauf der Gärtemperatur im Fermenter und Nachgärer der Pilotanlage #23.....	100
90.	Verfügbarkeit, Lastbetrieb und elektrischer Nutzungsgrad des BHKW ($P_{el} = 75 / 250\text{kW}$) der Pilotanlage #23	101

91. Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #23	102
92. Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #23.....	103
93. Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #23 im Jahresmittel 2014	103
94. Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb 23	104
95. Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #24 im Jahresmittel 2014	105
96. Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #24 (tägliche Auflösung)	106
97. Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #24.....	106
98. Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage #24.....	107
99. Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #24.....	108
100. Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #24	109
101. Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #24.....	110
102. Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #24 im Jahresmittel 2014	110
103. Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #24	111
104. Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #25 im Jahresmittel 2014	112
105. Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #25 (tägliche Auflösung) Prozessparameter	113
106. Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus der Hydrolysestufe von Pilotanlage #25.....	114
107. Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage #25.....	114
108. Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #25.....	115
109. Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #25	116
110. Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #25.....	116

111. Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #25 im Jahresmittel 2014	117
112. Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #25	118
113. Gegenüberstellung der Einsatzstoffmischung und des täglichen Frischmasseeintrags der Pilotanlagen	119
114. Gegenüberstellung der oTS-Raumbelastung der ersten Prozessstufe und des gesamten Fermentersystems der Pilotanlagen	120
115. Gegenüberstellung der anteiligen hydraulischen Verweilzeit in der ersten Prozessstufe und im Fermentersystem der Pilotanlagen.....	121
116. Gegenüberstellung der relativen Biogas-/Methanausbeute aus den Einsatzstoffen für die Pilotanlagen	122
117. Gegenüberstellung der mittleren realisierten elektrischen Leistung, der Laufzeit, der Auslastung und des elektrischen Nutzungsgrades der BHKW	123
118. Gegenüberstellung der elektrischen Bedarfsleistung und des anteiligen elektrischen Energiebedarfs („Eigenstrombedarfsanteil“) der Pilotanlagen im Jahresmittel	124
119. Gegenüberstellung der thermischen BHKW-Leistung, des anteiligen Prozesswärmebedarfs („Eigenwärmebedarfsanteil“) und des externen Wärmenutzungsanteils für die Pilotbetriebe	126
120. Gegenüberstellung der Methanproduktivität des Fermentersystems der Pilotanlagen.....	127
121. Gegenüberstellung der erreichten Netto-/Brutto-Ausbeute an elektrischer Energie der eingebrachten Frischmasse in den Pilotanlagen	128
122. Gegenüberstellung der erreichten Netto-/Brutto-Ausbeute an elektrischer Energie aus der eingetragenen organischen Trockenmasse in den Pilotanlagen	128
123. Gegenüberstellung des mittleren Brutto-/Netto-Nutzungsgrades der Methanenergie für die Pilotanlagen	129
124. Gegenüberstellung der volumetrischen Gehalte an Methan, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff im Biogas aus den Pilotanlagen (Mittelwert und Standardabweichung).....	130
125. Gegenüberstellung der im „kalten“ und „warmen“ Gärtest ermittelten Restmethanausbeuten aus Gärrückstandsproben der Pilotanlagen	132
126. Gegenüberstellung der berechneten oTS-Abbaugrade für die Pilotanlagen im Beobachtungszeitraum 2014 (Mittelwert und Spannweite).....	133
127. Aufteilung der CO ₂ -Äquivalente (schraffierte Säulen) und des KEV (ausgefüllte Säulen) auf die beiden Prozessbereiche Substratbereitstellung (untere Säulenabschnitte) und Biogasproduktion/-verwertung (obere Säulenabschnitte)	134
128. Aufteilung der CO ₂ -Äquivalente der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse	134
129. Aufteilung des KEV der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse	135

130. Spezifische CO ₂ -Äq.-Emissionen der Strombereitstellung aus den Biogas-Pilotbetrieben nach Gutschriftenmethode im Vergleich zu ausgewählten Referenzsystemen	136
---	-----

Tabellenverzeichnis

1.	Hauptauswahlkriterien für die Aufnahme von Neuanlagen in das Biogas-Monitoring	16
2.	Stammdaten der vier neu aufgenommenen Pilotanlagen	17
3.	Aktuelle Stammdaten der fünf weitergeführten Pilotanlagen.....	18
4.	Übersicht der Analyseparameter für Proben von Substraten, Gärgemischen und Gärrückständen	25
5.	Übersicht der Methoden zur Analyse der Substrate und Gärreste	25
6.	Biogasausbeuten und Methananteile im Biogas aus unterschiedlichen Fraktionen der oTS (nach BASERGA, 1998).....	26
7.	Einheitliche Annahmen für die Berechnung der THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas für die Pilotbetriebe	47
8.	Gängige Warnwerte und Interpretationshinweise für ausgewählte chemische Prozessindikatoren in Rührkesselfermentern (nach EFFENBERGER & LEBUHN, 2008; EFFENBERGER <i>et al.</i> , 2011)	48
9.	Zusammenstellung der Raumbelastung und Verweilzeit der Pilotanlagen in der ersten Prozessstufe und im Fermentersystem	121
10.	Berechnete THG-Emissionen und KEV für die Biogasketten der Pilotbetriebe im Jahr 2014.....	133
11.	Spezifische Werte für die THG-Emissionen und den KEV bezogen auf die Netto-Strombereitstellung aus Biogas für die Biogas-Pilotbetriebe	135
12.	Übersicht der elektrischen Verbraucher von Pilotbiogasanlage #8	144
13.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #10	144
14.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #12	145
15.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #15	145
16.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #16	146
17.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #22	146
18.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #23	147
19.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #24	147
20.	Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #25	148
21.	Zusammenstellung verfahrenstechnischer Kenngrößen für die Pilotanlagen im Untersuchungszeitraum 2014	150

Abkürzungsverzeichnis

ADF	Säure-Detergenzien-Faser
ADL	Säure-Detergenzien-Lignin
AF	Ackerfläche
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
CCM	Corn-Cob-Mix
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el.	elektrisch
FFS	Flüchtige Fettsäuren
FOS/TAC	Quotient aus flüchtigen org. Säuren und Carbonatpuffer
GO	Gas-Otto-Motor
GPS	Ganzpflanzensilage
K	Kalium
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
N	Stickstoff
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NH ₃ -N	Ammoniakalischer Stickstoff
N _{org.}	Org. Stickstoff
oTM	Org. Trockenmasse
oTS	Org. Trockensubstanz
P	Phosphor
PB	Pilotbetrieb
th.	thermisch
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
ZS	Zündstrahl-Motor
ZwFr	Zwischenfrucht

1 Einleitung

Der bereits im Zuge der ersten Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2004 eingeführte „NAWARO-Bonus“ und ein drastischer Einbruch der Getreidepreise im Jahr 2009 bewegten viele Landwirte dazu, nach alternativen Einkommensquellen zu suchen. Stromerzeugung durch Vergärung von Wirtschaftsdünger und nachwachsenden Rohstoffen garantiert unter dem Vergütungsregime des EEG ein längerfristiges, sicheres Betriebseinkommen. Aus diesem Grund entschieden sich zahlreiche Landwirte für den Bau einer Biogasanlage, was schließlich zu einem Rückgang der Anbaufläche für Marktfrüchte und einer entsprechenden Zunahme der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe zur energetischen Nutzung führte.

Aufgrund des einfachen und wenig arbeitsintensiven Anbauverfahrens bei gleichzeitiger Erzielung hoher Biomasseerträge je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche etablierte sich Silomais als die beliebteste Fruchtart für die Biogaserzeugung (EDER *et al.*, 2012). Besonders in Regionen mit einer starken Verbreitung von Biogasanlagen brachte die Intensivierung des Silomaisanbaus für die Biogaserzeugung jedoch einige negative ökologische Effekte und einen starken Anstieg der Nachfrage nach Ackerflächen für den Energiepflanzenanbau mit sich. Der intensive Maisanbau führte auch zu einer Ausbreitung von Schädlingen wie dem Maiswurzelbohrer. Zur Bekämpfung dieses Schädlings wurden in etlichen Landkreisen Anbauauflagen in Form von Fruchtfolgevorschriften festgesetzt. Demnach darf in drei aufeinanderfolgenden Erntejahren nur noch zweimal Mais angebaut werden, womit viele Biogasanlagenbetreiber vor der Frage nach der Eignung und dem Anbau alternativer Kulturen zur Biogaserzeugung stehen.

Für eine langfristig ausgewogene Nahrungsmittel- und Energieerzeugung in der Landwirtschaft muss der Fokus der Substratbereitstellung für die Biogaserzeugung mehr auf alternative Einsatzstoffe gerichtet werden. Neben anderweitigen Energiepflanzen für vielfältigere Energiepflanzenfruchtfolgen sind Wirtschaftsdünger und pflanzliche Reststoffe für die Biogasproduktion besonders interessant. Durch Drosselung der Zuckerrübenanbauflächen aufgrund hoher Zuckerimporte aus dem Weltmarkt werden Rübenanbauflächen für die Energiegewinnung frei. Zur Beibehaltung der vielgliedrigen Fruchtfolgen auf diesen Flächen wäre der Einsatz größerer Mengen an Zuckerrüben in der Biogasproduktion denkbar.

Mit der Einführung des EEG 2012 wurde die Stromerzeugung in kleineren, güllebetonten Hofbiogasanlagen mit einem Massenanteil von Wirtschaftsdünger an den Einsatzstoffen von mehr als 80 % besonders gefördert. Der NAWARO-Bonus wurde abgeschafft und für die Vergütung des Stroms aus neu errichteten Biogasanlagen ein System von Einsatzstoffklassen geschaffen. Darin wird der Strom aus der Vergärung alternativer Energiepflanzen wie Durchwachsene Silphie, Klee gras oder Aufwuchs von Blühstreifen, aber auch landwirtschaftlicher Reststoffe wie Stroh und Mist besser vergütet, als der Strom aus Vergärung herkömmlicher Substrate wie Maissilage und Getreide-GPS. Zudem wurde gesetzlich sowohl für Neu- wie auch Bestandsanlagen die Möglichkeit eröffnet, den Strom außerhalb des EEG direkt zu vermarkten und die Flexibilisierung der Stromeinspeisung aus Biogas-BHKW wird finanziell gefördert. Die Vergütung wurde an folgende Restriktionen gekoppelt: Der Einsatz von Maissilage, CCM und Getreidekörnern ist auf einen Massenanteil von 60 % im Substratmix beschränkt und für mindestens 60 % des in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms muss eine Wärmenutzung nachgewiesen werden (BMELV, 2012).

Das „EEG 2014“ lässt schon an seinem Titel erkennen, dass der deutsche Gesetzgeber den Schwerpunkt von der Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energiebereitstellung auf die Integration der EE in das Energieversorgungssystem verlagert hat: „Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts“. Über diese Integration besteht insofern ein intensiver Diskurs, als die bestehenden Strukturen der Elektrizitätsversorgung sehr stark auf die Nutzung von fossilen und atomaren Brennstoffen in Großkraftwerken ausgerichtet sind. Mit diesen Strukturen sind die EE aber prinzipiell nicht kompatibel (SCHEER, 2010). Das „EEG 2014“ brachte für Anlagen zur Stromerzeugung aus EE die grundsätzliche Neuerung, dass die geförderte Direktvermarktung nun den Regelfall für den Absatz von Strom aus EE darstellt, während die Einspeisevergütung für Strom stark gesenkt wurde. Eine je nach betrieblicher Gegebenheit potentiell kostendeckende Einspeisevergütung wird nur noch bei der Vor-Ort-Verstromung von Biogas aus der Vergärung von Gülle oder Mist (mit Ausnahme von Geflügelmist) in Anlagen mit höchstens 75 kW installierter elektrischer Leistung gewährt. Die Direktvermarktung von Strom aus Biogasanlagen ist nur am Regelleistungsmarkt profitabel, weshalb die sogenannte „Flexibilisierung“ der Anlagen das aktuelle wirtschaftliche Gebot ist. Darunter versteht man die Auslegung/Ertüchtigung der Biogasanlagen für die zeitliche Verlagerung der Stromerzeugung durch die leistungsmäßige Entkopplung der Einrichtungen zur Erzeugung und Verwertung des Biogases – sprich: das Biogas muss ausreichend lange zwischengespeichert und in bestimmten Zeitfenstern mit einer höheren Leistung verstromt werden können (HÄRING *et al.*, 2013).

Das „Biogas-Monitoring“ der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) zielt darauf ab, tiefere Einblicke in den Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen mit unterschiedlichsten Einsatzstoffen und Konfigurationen zu gewinnen. Die Auswertung der umfangreichen Daten liefert Aufschluss über Funktionalität, Betriebssicherheit, Umweltwirkungen und Ökonomie landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern. Die dabei gestellten Anforderungen an die Auflösung und den Umfang der erhobenen Daten sind in Deutschland einmalig. Für die Auswahl neuer zu untersuchender Pilotanlagen hatte man sich dabei auch an den gesetzlichen Rahmenbedingungen orientiert, die eine starke Lenkungswirkung auf die Struktur der neu errichteten Biogasanlagen entfalteten (BACHMAIER *et al.*, 2011). So lag zu Beginn des Monitorings 2005/‘06 bei den ersten zehn Pilotbetrieben zur Biogasproduktion nach Einführung des „NAWARO-Bonus“ im EEG 2004 der Schwerpunkt auf der Verwertung nachwachsender Rohstoffe (EFFENBERGER *et al.*, 2010). Bei den von 2009 bis 2011 beobachteten Pilotanlagen lag der Schwerpunkt auf der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischen Ursprungs und einem ausgereiften Wärmenutzungskonzept (EBERTSEDER *et al.*, 2012). Von 2012 bis 2015 erfolgte ein Monitoring von fünf Biogasanlagen, die überwiegend Grasbiomasse (vom Grünland oder Ackerland) und tierische Wirtschaftsdünger verwerteten (KISSEL *et al.*, 2015). Die Zielsetzung des im vorliegenden Bericht dokumentierten Monitorings wird im folgenden Kapitel dargelegt.

2 Zielsetzung

Seit einigen Jahren werden von unterschiedlichen Herstellern kleine „Hofbiogasanlagen“ mit fertig vormontierten Kompaktmodulen angeboten – mit dem Ziel, den baulichen Aufwand vor Ort auf ein Minimum zu senken und die neu errichteten Biogasanlagen möglichst schnell in Betrieb nehmen zu können. Um die modularen Biogasanlagen transportieren zu können, ist das Gärvolumen der Fermenter bautechnisch begrenzt und damit die hydraulische Verweilzeit der Substrate im Gärraum relativ kurz.

Ein Ziel des Projektes „Monitoring von Biogasanlagen – Diversifizierung der Einsatzstoffe und Verfahrenstechnik“ war es, Funktionssicherheit, Handhabung, Eigenenergiebedarf sowie Abbauleistung unterschiedlicher Kompaktbiogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von bis zu 100 kW und einem Massenanteil von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft in der Futterration etwa 80 % zu untersuchen und zu bewerten.

Daneben standen auch Biogasanlagen, die größere Mengen pflanzlicher Reststoffe und alternative nachwachsende Rohstoffe wie Szarvasigras, Zwischenfrüchte oder Zuckerrüben vergären, im Fokus der aktuellen Phase des Biogas-Monitorings. Zuckerrüben zeichnen sich durch ihren hohen Gehalt an leicht vergärbaren Inhaltstoffen aus und sind im Hinblick auf einen Intervallbetrieb von Biogasanlagen interessant für eine mögliche Flexibilisierung der Gasproduktion. Die Vergärung von Zuckerrüben bringt neben Vorteilen wie der geringeren Viskosität des Gärgemisches allerdings auch Herausforderungen mit sich. Je nach Bodenart der Rübenanbaufläche, Ernteverfahren und Nachreinigung der Zuckerrüben gelangt eine mehr oder weniger große Menge an Erd- bzw. Schmutzanhang mit in die Gärbehälter. Im Laufe der Zeit kann es so je nach Korngrößenzusammensetzung der Schmutzpartikel zur Bildung von Sinkschichten/Sedimentkörpern im Fermenter kommen, die das effektive Arbeitsvolumen reduzieren. Auch die Lagerung von Zuckerrüben für den ganzjährigen Einsatz in Biogasanlagen stellt aufgrund der leichten Verderblichkeit der Rüben besondere Anforderungen an die Verfahrenstechnik. Im hier dokumentierten Biogas-Monitoring sollten ausgewählte Biogasanlagen mit Kofermentation alternativer Einsatzstoffe wissenschaftlich begleitet werden, um die Prozesseffizienz bei dieser Form der Biogasgewinnung beurteilen zu können.

Schließlich sollte mit der Fortführung des Biogas-Monitorings auf bereits bekannten Pilotanlagen die Datengrundlage für die ökologische und ökonomische Bewertung der Energiebereitstellung aus Biogas weiter verbessert werden. Nur durch eine längerfristige Datenerhebung auf Biogasanlagen über mehrere Jahre lassen sich gesicherte Erkenntnisse über die Auswirkungen baulicher oder technischer Veränderungen und von Verschleißerscheinungen auf die Anlageneffizienz gewinnen.

3 Material und Methoden

Nach einer Übersicht über die Anlagenkonfiguration der weitergeführten und neu aufgenommenen Pilotanlagen werden diese technisch detailliert beschrieben. Es folgt eine genaue Darstellung der messtechnischen Ausstattung sowie die Vorstellung des zur Erleichterung der Datenerfassung auf Pilotbetrieben neu entwickelten elektronischen Betriebsstagebuchs für Biogasanlagen „BAMILT“.

3.1 Auswahl neuer Biogasanlagen für das Betriebsmonitoring

Anders als in den Vorläuferprojekten wurden aufgrund der speziellen Anforderungen an die Anlagenkonfiguration und den Substratmix keine Festlegungen hinsichtlich der geografischen Lage der Betriebe getroffen. Dennoch gestaltete sich die Suche nach Betrieben, die den gewünschten Anforderungen entsprachen, als schwierig. Dank der Unterstützung von Anlagenherstellern sowie Mitarbeitern der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten konnten schließlich vier Betriebe ausgewählt werden, die hinsichtlich Anlagenkonzept und Einsatzstoffen geeignet erschienen.

Grundvoraussetzung für eine Aufnahme der Biogasbetriebe in das Messprogramm waren ein schlüssiges Wärmenutzungskonzept, die Ausstattung der Anlage mit innovativer Verfahrenstechnik sowie die Kooperationsbereitschaft des Betriebsleiters für das Erzielen belastbarer Ergebnisse aus dem Monitoring. Als innovative Anlagentechnik galten in diesem Zusammenhang speziell Flüssigfütterungen, Einrichtungen zur weitergehenden Substrataufbereitung sowie mehrstufige Anlagenkonzepte mit Hydrolyse-/Versäuerungsstufe. Mindestens eines der beiden Hauptauswahlkriterien, welche in der folgenden Tabelle 1 erläutert sind, musste von den neu aufzunehmenden Betrieben erfüllt werden.

Tabelle 1: Hauptauswahlkriterien für die Aufnahme von Neuanlagen in das Biogas-Monitoring

Kriterium	„kleine Hofbiogasanlage“	„alternative Einsatzstoffe“
Anforderungen	→ Massenanteil Wirtschaftsdünger am Substratmix $\geq 80\%$ → installierte el. Leistung $\leq 100\text{ kW}$ → kompakte Anlagenbauweise mit Fertigmodulen → alternative Fermenterbauweise (stehend/liegend)	→ Einsatz größerer Mengen an Zuckerrüben über einen längeren Zeitraum → Vergärung von Szarvaszigras oder Zwischenfrüchten → Verwertung von Reststoffen wie Stroh, Kartoffelpülpe oder Biertreber

Auch Anlagenbetreiber, die ihre Biogasanlage im Zuge des EEG 2012 bereits auf Flex- bzw. Intervallbetrieb umgestellt hatten und damit ihren Strom auch direkt vermarkteten, sollten mit ins Messprogramm aufgenommen werden. Zu Projektbeginn konnten jedoch bayernweit keine geeigneten Anlagen identifiziert werden, die bereits erste Erfahrungen mit flexibler Verstromung gesammelt hatten.

Um zu zeigen, dass auch unter Einsatz landwirtschaftlicher Reststoffe und alternativer Energiepflanzen Biogas erzeugt werden kann, ohne mehrgliedrige Fruchtfolgen für einen intensiven Maisanbau aufgeben zu müssen, floss auch der Ackerflächenverbrauch in Relation zur Anlagengröße mit in die Auswahl der Betriebe ein. Von 13 besichtigten Betrieben erfüllten nur zwei die Anforderungen des Auswahlkriteriums „kleine Hofbiogasanlage“ und weitere zwei die Anforderungen des Kriteriums „alternative Einsatzstoffe“.

Bezüglich der Größe der ausgewählten Betriebe zeigt sich ein ausgewogenes Bild. Das Spektrum der installierten elektrischen BHKW-Leistung reicht von 75 bis 536 kW (Tabelle 2). Im Hinblick auf den Umfang der bewirtschafteten landwirtschaftlichen Nutzfläche waren mittelgroße Betriebe (≈ 150 ha LN) bis zu einem für bayerische Verhältnisse sehr großen Gutsbetrieb (≈ 800 ha LN) vertreten. Allen Betrieben gemeinsam ist der Einsatz von Grassilage und Maissilage. Die Pilotbetriebe 22 und 23 stellen typische „80/20-Anlagen“ im Sinne des EEG 2012 dar, werden aber nach dem EEG 2009 vergütet. Bei diesen Anlagen setzt sich der Substratmix zu 80 % aus Wirtschaftsdünger und zu 20 % aus anderweitigen Einsatzstoffen zusammen.

Tabelle 2: Stammdaten der vier neu aufgenommenen Pilotanlagen

Anlagen-ID	22	23	24	25
Jahr der Inbetriebnahme	2009	2011	2004	2006
el. Leistung, kW	103	75	536	190
BHKW (Anzahl, Typ)	1 GO	1 ZS	1 GO	1 GO
Volumen Anmischgrube, m ³	/	/	170	85
Fermentervolumen, m ³	2 x 110	110	2100	700
Nachgärervolumen, m ³	/	850	2100	600
Gärrestlagervolumen, m ³	1400	1700	3100	1950
Spezifische installierte elektrische Leistung*, kW m ⁻³	0,45	0,08	0,14	0,14
Einsatzstoffe pflanzlich	Maissilage, Grassilage, ZwFrSilage	Maissilage, Szarvasigras, Triticale-GPS,	Maissilage, Grassilage, Grünroggen, Zuckerrüben, Pülpe, Pressschnitzel, Biertreber, Stroh	Maissilage, Grassilage, GPS, ZwFrSilage, Zuckerrüben
Einsatzstoffe tierisch	Rindergülle, Rindermist	Schweinegülle	Rindergülle	Rindergülle, Rindermist
Wärmenutzung	Nahwärmenetz, Hackschnitzel-/ Getreidetrocknung	Schweineestall	Hackschnitzeltrocknung, Gewächshaus, Gebäudeheizung	Nahwärmenetz

*) Summe Nutzvolumen aller Gärbehälter ohne Gärrestlager

Die beiden anderen Pilotbetriebe setzen saisonal einen nennenswerten Anteil an Zuckerrüben ein, wobei sie sich in der Verfahrensweise zur Lagerung und Aufbereitung der Zuckerrüben für die Biogasgewinnung unterscheiden. Die Pilotanlage 24 vergärt zudem Reststoffe wie Kartoffelpresspülpe, Biertreber und Stroh.

Das Temperaturniveau in den Gärbehältern der vorgestellten neuen Pilotbiogasanlagen liegt mit 40 bis 53 °C im mesophilen bzw. thermophilen Bereich. Nach Aussagen der Betreiber wurden die thermophilen Prozesstemperaturen gewählt, um der kurzen Verweilzeit in den hochbelasteten kompakten Fermentern durch einen beschleunigten Abbau bei höheren Temperaturen entgegenzuwirken.

Bei Betrachtung der spezifischen installierten elektrischen Leistung bezogen auf den Gärraum der Anlagen zeigt sich eine Spanne von 0,08 bis 0,45 kW m⁻³. Die mit 0,45 kW m⁻³

hochbelasteten Fermenter der Anlage 22 in kompakter Bauweise stellen eine Ausnahme dar.

Alle Betriebe setzen Maissilage nur in einem begrenzten Umfang ein und weisen einen niedrigen Ackerflächenbedarf für den Anbau von Energiepflanzen in Relation zur Anlagengröße auf. Der überwiegende Teil der bewirtschafteten Ackerflächen wird zur Erzeugung von Marktfrüchten oder Tierfutter verwendet.

Die Anlagen verfügen über ein ausgereiftes Wärmenutzungskonzept, wobei die BHKW-Wärme in erster Linie zur Beheizung von Wohn- und Betriebsgebäuden genutzt wird. Aufgrund des niedrigen Wärmebedarfs zur Gebäudeheizung im Sommer haben sich zwei Betriebe für eine Hackschnitzel- und Getreidetrocknung in dieser Zeit entschieden. Bei den Anlagen wurden während des Monitorings keine Konfigurationsänderungen vorgenommen. Zwei der vier Betriebe planen aber für das folgende Jahr eine Erweiterung. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Betriebe und Anlagenkonfigurationen wird in den nachfolgenden Abschnitten vorgenommen.

3.2 Weitergeführte Pilotanlagen

Die wieder ins intensive Monitoring aufzunehmenden bzw. weiterzuführenden Pilotanlagen wurden anhand konkreter Fragenstellungen zu den Themenbereichen Nährstoff-, Treibhausgas- und Ökobilanzen bei unterschiedlicher Substratkonfiguration im Konsens der Projektbearbeiter am ILT und IAB ausgewählt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Aktuelle Stammdaten der fünf weitergeführten Pilotanlagen

Anlagen-ID	8	10	12	15	16
Jahr der Inbetriebnahme	2004	2005	2007	2005	2008
El. Leistung, kW	750	920	800	240	440
BHKW (Anzahl, Typ)	3 GO	2 GO +2 ZS	2 GO	1 GO	2 GO
Fermentervolumen, m ³	2 x 900	1400 + 850	2 x 1800	800	900
Nachgärervolumen, m ³	2 x 1250	850	2 x 1800	-	2300
Gärrestlagervolumen, m ³	4100	2 x 2700	-	1200	2700
Spezifische installierte el. Leistung*, kW m ⁻³	0,17	0,31	0,11	0,30	0,14
Einsatzstoffe pflanzlich	Maissilage, Grassilage, Getreide-GPS, CCM	Maissilage, Grassilage, Getreide-GPS, CCM	Maissilage, Grassilage, Roggen-GPS	Maissilage, Klee-gras-silage, Roggen-GPS	Maissilage, Klee-gras-silage, Getreide-GPS
Einsatzstoffe tierisch	Rindergülle	Schweinegülle, Rindergülle, Rindermist	Hähnchenmist, Rindermist	Geflügelmist	Rindermist
Wärmenutzung	Nahwärmenetz, Scheitholztrocknung	Betriebsgebäude, Nahwärmenetz Klinik	Nahwärmenetz, Hopfen-/Scheitholztrocknung	Nahwärmenetz	Nahwärmenetz

*) bezogen auf den Gärraum = Summe Nutzvolumen aller Gärbehälter ohne Gärrestlager

Seit dem Monitoring in den Jahren 2007 bis 2011 wurden einige der weitergeführten Pilot-Biogasanlagen sowohl im Hinblick auf die Leistung der BHKW, als auch die technische Ausstattung deutlich ausgebaut. Hauptgründe für die Erweiterung der Anlagen waren die im EEG 2012 garantierte Flexibilitätsprämie sowie die anstehende Novelle der Düngeverordnung. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die Ist-Konstellation der fortgeführten Anlagen. Genauere Einzelheiten zu den durchgeführten Anlagenmodifikationen sind den technischen Detailbeschreibungen zu entnehmen.

3.3 Messtechnik und Datenerfassung

Sowohl an den fortgeführten wie auch an den neu in das Messprogramm aufgenommenen Pilotanlagen mussten zahlreiche Messgeräte installiert werden. Während die neu aufgenommenen Pilotanlagen grundsätzlich eine geringe oder ungeeignete messtechnische Ausstattung aufwiesen, musste bei den fortgeführten Anlagen die vorhandene Messtechnik aufgrund von Defekten teilweise ausgetauscht werden.

Die Datenerfassung auf den Pilotbetrieben umfasste im Wesentlichen die folgenden Maßnahmen:

1. Probenahmen (monatlich: Beprobung aller Einsatzstoffe und Gärbehälterinhalte)
2. Datenlogger (zweimal täglich: Erfassung und Aufzeichnung aller automatisch erfassbaren Messwerte im Anlagenbetrieb)
3. Betriebstagebuch (ein- bis zweimal täglich: Dokumentation aller Einsatzstoffmengen, ablesbaren Zählerstände und Störungen im Anlagenbetrieb)
4. Restgasansatz (jährlich: Ermittlung des Restgaspotentials einer Gärrestprobe)

Alle erfassten Daten wurden in Tabellenblättern für die Datenauswertung zusammengeführt und zusätzlich in einer Datenbank archiviert. Dabei erfolgte eine kontinuierliche Plausibilitätsprüfung der erhobenen Daten. Zusätzlich zur fortlaufenden Datengewinnung und -verwaltung erfolgte eine einmalige, umfangreiche Erhebung sämtlicher Basisdaten der einzelnen Biogasanlagen, die in den technischen Detailbeschreibungen dargestellt sind.

3.3.1 Gasmengenerfassung

Grundsätzlich wurden Drallzähler zur Gasmengenerfassung bevorzugt, weil mit diesen nach den bisherigen Erfahrungen im Anlagenmonitoring relativ einfach zuverlässige, normierte Gasmengen in Kombination mit einem Druck- und Temperaturfühler ermittelt werden können. Die Ermittlung normierter Gasmengen mit thermischen Massestromzählern gestaltet sich deutlich aufwändiger, da für eine Normierung neben dem Parameter stemperatur auch die aktuelle Gaszusammensetzung mit verrechnet werden muss.

Insgesamt wurden sechs Gaszähler nachgerüstet. An den Pilotanlagen 12, 24 und 25 wurden Drallzähler in Verbindung mit einer Temperatur- und Druckmessung zur Normierung der erfassten Gasmenge verbaut. Da die Drallzähler als Zwischenflanschversionen ausgeführt sind, mussten die Gasleitungen an einer geeigneten Stelle hinter dem Gasverdichter aufgeschnitten und entsprechende Flanschstücke in die Leitung eingeschweißt werden.



Abbildung 1: Drallzähler für die Gasmengenerfassung auf Pilotanlage #12

Die an der Pilotanlage 12 vorhandenen thermischen Massestromzähler wurden vor den beiden BHKW abmontiert und direkt an den Hauptfermentern der Anlage zur Feuchtgasmengenerfassung installiert. Die Feuchtgasmengenerfassung ermöglicht es nun, die Gasproduktion der parallelgeschalteten Fermenter bei unterschiedlicher Fütterung zu erfassen.

An der Pilotanlage 8 war es technisch leider nicht möglich, in die Gasleitungen Flanschstücke einzuschweißen, um Drallzähler installieren zu können. Daher wurden zwei thermische Massestromzähler über vorhandene Aufschweißadapter in die beiden Gasleitungen der drei BHKW eingesetzt.

Aufgrund der Erweiterung einiger Anlagen um ein weiteres BHKW zur flexiblen Stromerzeugung wird im laufenden Jahr mit einem Nachrüstungsbedarf von drei weiteren Gaszählern gerechnet.

3.3.2 Ermittlung der Gaszusammensetzung

Keine der neu in das Messprogramm aufgenommenen Biogasanlagen verfügte über einen stationären Gasanalysator. Bei den fortgeführten Anlagen musste ein defekter und veralteter Gasanalysator gegen ein neues Gerät getauscht werden. Insgesamt wurden daher fünf neue Gasanalysestationen angeschafft und an den Anlagen 8, 22, 23, 24, 25 installiert.

Die auf den Pilotanlagen 10, 12 und 15 vorhandenen Gasanalysestationen mussten aufgrund kleinerer technischer Defekte gewartet werden. Nach Installation und Wartung aller Geräte wurden sämtliche Gasanalysestationen neu kalibriert und lieferten zuverlässige Messwerte.



Abbildung 2: Gasanalysestation der Pilotbiogasanlage #24

3.3.3 Erfassung der Stromverbräuche

Aufgrund des enormen Aufwands für die Installation von Stromzählern zur Erfassung der Stromverbräuche sämtlicher Einzelkomponenten der Biogasanlagen wurden nur die neu in das Messprogramm aufgenommenen Anlagen 22, 23, 24 und 25 vollständig mit Stromzählern und entsprechenden Datenloggern ausgestattet. Grund für einen Verzicht der Installation von Stromzählern auf den fortgeführten Anlagen war, dass an diesen Anlagen die Stromverbräuche der Einzelkomponenten bereits in den vorangegangenen Messperioden ermittelt und die damals installierten Stromzähler nach Abschluss der Projektphasen ausgebaut worden waren. Insgesamt wurden 65 Stromzähler und neun Datenlogger für die Ermittlung des Stromverbrauchs wesentlicher Anlagenkomponenten an den neuen Pilotanlagen installiert.

Um die mithilfe der Datenlogger automatisch aufgezeichneten Datenreihen zeitnah kontrollieren und im Falle von Aufzeichnungsfehlern oder -lücken rasch handeln zu können, wurde den Datenloggern auf jeder Anlage ein PC nachgeschaltet. Von dort erfolgte die Datenübertragung täglich per E-Mail an das Institut, wo die Daten dann in der Datenbank abgelegt wurden und von den Projektarbeitern kontrolliert und ausgewertet werden konnten.

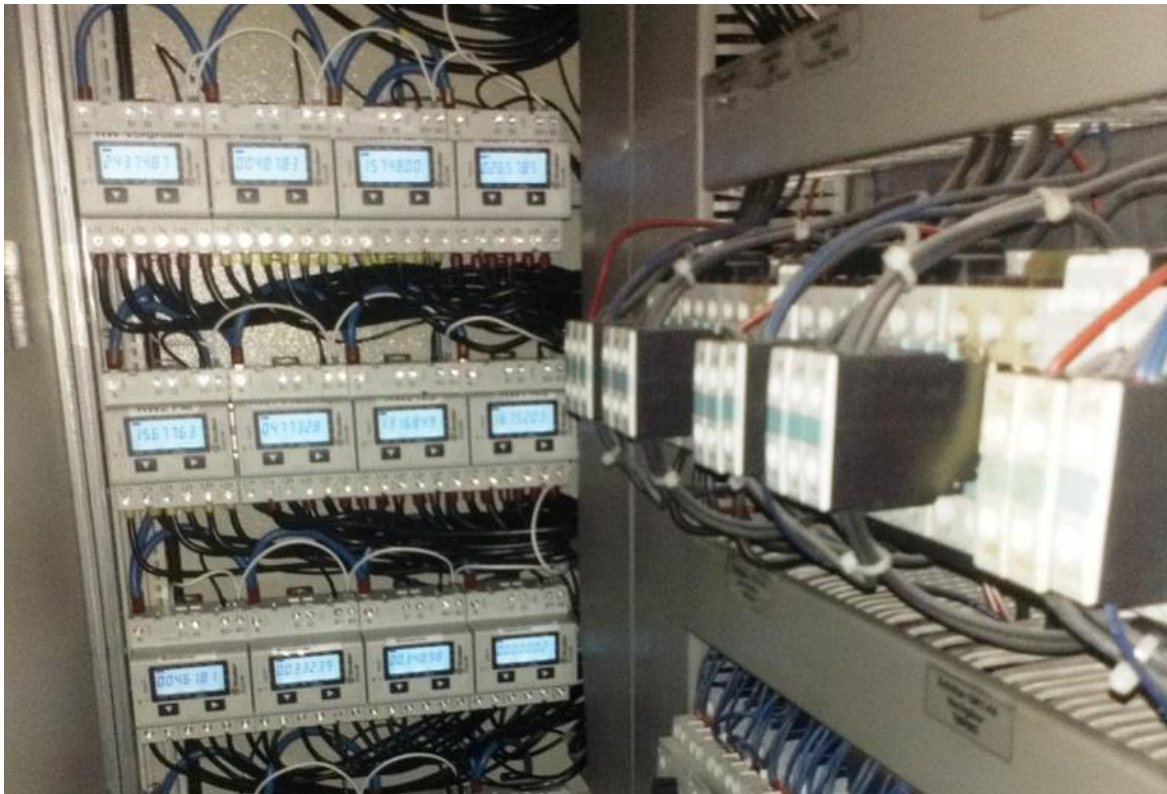


Abbildung 3: Stromzähler im zentralen Schaltkasten der Pilotbiogasanlage #24

3.3.4 Einwicklung eines webbasierten elektronischen Betriebstagebuchs

Neben den automatisch erfassbaren Parametern wie Stromverbrauch, Gasmenge und Gaszusammensetzung muss der Anlagenbetreiber im gesamten Beobachtungszeitraum auch ein spezielles Betriebstagebuch führen, in dem er täglich neben den Einsatzstoffmengen weitere Parameter wie Gärbehältertemperaturen, Rührzeiten und sonstige Vorkommnisse im Betriebsalltag dokumentiert.

Um die manuelle Datenerfassung zu erleichtern, wurde bereits im vorgegangenen Messprogramm ein elektronisches Betriebstagebuch für PDA (Personal Digital Assistant) programmiert. Der Anlagenbetreiber kann hier alle relevanten Parameter über eine Erfassungsmaske in den PDA eingeben. Die gespeicherten Datensätze lädt er in regelmäßigen Abständen auf den PC vor Ort herunter. Dort stehen ihm diese dann in Form einer Tabelle in Microsoft® Excel zur Verfügung und werden zudem per E-Mail an die Projektbearbeiter am Institut übermittelt. Die Vorteile des Systems liegen auf der Hand:

- Möglichkeit der zeitnahen Prüfung der eingetragenen Daten;
- fortlaufende Kontrolle, ob das Tagebuch regelmäßig geführt wird;
- direkte Verfügbarkeit der Daten in elektronischer Form zur Weiterverarbeitung sowie
- sofortige Verfügbarkeit der Daten für den Betreiber am PC.

Da die PDAs mittlerweile weitgehend vom Markt verschwunden sind, musste ein neuer, für den Betreiber attraktiver Weg für die elektronische Datenerfassung und –übertragung gefunden werden. Am ILT wurde hierfür das geräteunabhängige, webbasierte Datenerfassungstool „BAMILT“ entwickelt, mit dem das elektronische Betriebstagebuch je nach

Wunsch des Anlagenbetreibers mit einem Desktop-PC, Smartphone oder auch Tablet-PC geführt werden kann.

Ähnlich wie beim PDA gibt der Anlagenbetreiber täglich sämtliche anlagenspezifisch relevanten Daten in die Erfassungsmaske ein, speichert diese nach Abschluss der Eingabe jedoch nicht mehr lokal, sondern in einer Online-Datenbank. Um die Erfassungsmaske nicht unübersichtlich lang werden zu lassen und die Daten geheim halten zu können, wurde diese für jede Anlage speziell konfiguriert und mit einem Zugangspasswort versehen. Eine ebenfalls integrierte Datencloud ermöglicht es sowohl Projektarbeitern als auch Anlagenbetreibern, sämtliche im Betriebstagebuch erfassten Daten in Form einer Microsoft® Excel -Tabelle abzurufen. Den Betreibern wurde für die Datenerfassung ein Tablet-PC mit Internet-Verbindung über Mobilfunk zur Verfügung gestellt.

Ein Praxistest des Betriebstagebuchs auf den Pilotanlagen 15, 22 und 23 ergab positive Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge, auf deren Grundlage derzeit eine überarbeitete Version der Erfassungsmaske erstellt wird. In der Folge werden zwei weitere Betriebe einen Tablet-PC für die Nutzung des elektronischen Betriebstagebuchs erhalten. Vier der neun aktuellen Pilotbetriebe führen nach wie vor das Betriebstagebuch auf einem PC vor Ort in MS Excel und werden daher das System „BAMILT“ nicht nutzen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Screenshots des webbasierten Betriebstagebuchs „BAMILT“.

The screenshot displays the 'BAMILT' web-based operation log interface. On the left is a sidebar menu with categories like 'Gärrest', 'Management', 'Nawaro', 'Getreideschrot', and 'Grassilage', with 'Maissilage' currently selected. The main area is titled 'Maissilage' and includes a 'Menge [t/d]' input field and a 'Boniturnformationen:' section with checkboxes for 'Nacherwärmung' and 'Schimmel'. At the bottom, there are two buttons: 'Dateneingabe abbrechen' and 'Dateneingabe speichern'.

Abbildung 4: Eingabemaske Einsatzstoffe im Online-Betriebstagebuch

Abbildung 5: Dateneingabemaske Technik im Online-Betriebstagebuch

Abbildung 6: Eingabemaske von Wartungen und Routinearbeiten im Online-Betriebstagebuch

3.3.5 Probenahme und chemische Analysen

In den vorliegenden Bericht wurden die Analyseergebnisse aller Proben aufgenommen, welche im Jahr 2014 auf den Pilotbetrieben gewonnen wurden. Die Probennahmen erfolgten im monatlichen Zyklus. Beprobte wurden alle Ausgangsmaterialien (Einsatzstoffe), die Gärgemische in den Gärbehältern und der Gärrest. In Tabelle 4 sind alle chemischen und physikalischen Parameter dargestellt, die in den unterschiedlichen Proben untersucht wurden. Die bei der Analyse der Proben angewandten Methoden sind in Tabelle 5 aufgelistet und kurz beschrieben.

Tabelle 4: Übersicht der Analyseparameter für Proben von Substraten, Gärgemischen und Gärrestständen

Probenart	Feststoffe	Gülle	Gärgemisch	Gärrest
TM in der Frischmasse, %	x	x	x	x
oTM in der TM, %	x	x	x	x
FOS/TAC, l			x	
FFS gesamt, mg L ⁻¹			x	
pH-Wert, l			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

Tabelle 5: 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, DIN 12176	DEWAS	Elektrode
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

3.3.6 Bewertung der erzielten Methanausbeute aus den Einsatzstoffen

Um die in den Biogasanlagen erzielte Methanausbeute zu bewerten, wurde auf eine Referenzmethode zurückgegriffen. Die „relative Methanausbeute“ wurde als Quotient der erzielten (gemessenen) und der zu erwartenden Methanausbeute berechnet. Hierfür wurde die zu erwartende Methanausbeute aus den Einsatzstoffen nach dem sogenannten „Futterwertmodell“ wie folgt ermittelt.

Von den Einsatzstoffen wurden möglichst repräsentative Proben aus den Silostöcken der Pilotbetriebe entnommen. Für die Berechnung der theoretischen Biogas-/Methanausbeute wurden in diesen Proben die folgenden Parameter bestimmt: TS, oTS, Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und Rohfaser (XF). Der Gehalt an Stickstoff freien Extraktstoffen (NfE) wurde als Differenz zwischen der gesamten oTS und der Summe aus XP, XL, XF berechnet.

Die Biogasausbeute aus der oTS des jeweiligen Einsatzstoffs errechnet sich dann nach folgender Formel:

$$Y_S, \text{ L kg oTS}^{-1} = \sum_{i=XP, XL, XF, NfE} \{Y_i * VQ_i * X_i\}$$

mit X_i = Massenanteil der Komponente i an der oTS, VQ_i = Verdaulichkeitsquotient der Komponente i, Y_i = Biogasausbeute aus der Komponente i. Durch Multiplikation von Y_i mit dem theoretischen Methananteil des Biogases aus der Komponente i erhält man die entsprechende Methanausbeute. Die für die Berechnung verwendeten Werte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Biogasausbeuten und Methananteile im Biogas aus unterschiedlichen Fraktionen der oTS (nach BASERGA, 1998)

	Rohprotein	Rohfett	Rohfaser	NfE
Y, L kg⁻¹	700	1250	790	790
Methananteil	71 %	50 %	68 %	50 %

3.4 Geographische Lage der Pilotbetriebe

Die geographische Lage der Betriebe wurde in dem Kartenausschnitt in Abbildung 7 kenntlich gemacht. Die in der Karte grünfarbig markierten Geocodierungen repräsentieren die neu ins Monitoring aufgenommenen Pilotbetriebe, rotfarbig dargestellt sind die weitergeführten Pilotbetriebe. Die Betriebe konzentrieren sich mit zwei Ausnahmen auf den Raum Ansbach und Pfaffenhofen an der Ilm. Der am nächsten gelegene Betrieb (#16) ist ca. 20 km vom Institut entfernt, der am weitesten entfernte Pilotbetrieb (#22) ca. 190 km.



Abbildung 7: Geografische Lage der beschriebenen Pilotanlagen im Biogas-Monitoring

3.5 Dokumentation baulicher und technischer Einrichtungen

Für die Biogas-Pilotanlagen wurden hochwertige Dokumentationsunterlagen angefertigt bzw. im Falle der weitergeführten Anlagen aktualisiert. 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 wurde unter Microsoft Publisher für jede Pilotanlage ein Poster (DIN A0) nach einheitlichem Aufbau gestaltet. Auf diesen Postern werden die Anlagen mit den wichtigsten technischen Daten, einem Lageplan mit Kennzeichnung der Funktionsbereiche, einem Grundriss und Detailfotos vorgestellt. Die Betreiber können dieses 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.

Im Jahr 2010 wurde eine Bypassleitung zwischen den beiden Fermentern installiert, in die eine Drehkolbenpumpe mit Lochscheiben-Nasszerkleinerer und nachgeschalteter elektrokinetischer Desintegration eingebaut ist. Bei der elektrokinetischen Desintegration wird durch Anlegen eines Hochspannungspulses (28 kV) ein elektrischer Durchschlag durch den Materialstrom erreicht. Durch die resultierende Schockwelle in der Gärsuspension platzen die Zellwände in den Substratpartikeln. Hauptziel dieser technischen Aufrüstung war neben einer Verringerung der Partikelgröße zur Senkung des Strombedarfs für das Durchmischen der Fermenter die Verbesserung der Abbauleistung und damit eine Verringerung des Restgaspotentials im Gärückstand.

Den Fermentern sind zwei gleichgroße Nachgärer (Maße: 19 m x 5 m; Arbeitsvolumen: ca. 1250 m³) in Reihe nachgeschaltet. Nachgärer I ist mit einem Tragluftdach zur Gasspeicherung ausgerüstet und wird mithilfe einer Wandheizung auf einer durchschnittlichen Prozesstemperatur von 40 °C gehalten. Eine Drehkolbenpumpe beschickt den Behälter mit Gärsubstrat aus den beiden Hauptfermentern. Durchrührt wird der erste Nachgärer mithilfe eines Stabmixers und eines Langachsührwerks. Das Gärgemisch aus dem ersten Nachgärer kann über einen freien Überlauf in den zweiten Nachgärer fließen. Nachgärer II besitzt eine EDPM-Gasspeicherhaube und wird nicht beheizt. Da die Behälterwand gedämmt ist, wurde eine durchschnittliche Prozesstemperatur von 27 °C im Behälter erreicht. Als Rührwerke sind in diesem Behälter ein Tauchmotorrührwerk sowie ein Stabmixer installiert.

Der Gärrest aus dem Nachgärer II wird über eine zentrale Pumpstation mit Drehkolbenpumpe in das mit einem Tragluftdach und zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattete Gärrestlager gepumpt (Maße: 30 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 4100 m³). Das Gärrestlager ist nicht wärmegeklämt, so dass der Gärrest vor einer Ausbringung auf die Felder abkühlen kann.

Insgesamt verfügt die Biogasanlage über eine Gasspeicherkapazität von etwa 2700 m³. Das erzeugte Biogas wird in einem im Boden verlegten Gasregister und zusätzlich mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät entfeuchtet. Das entfeuchtete Biogas wird von drei Gas-Otto-BHKW in Strom und Wärme gewandelt. Zum Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme bestand das BHKW aus zwei Gas-Otto-Motoren mit einer elektrischen Nennleistung von jeweils 190 kW, im Jahr 2007 wurde es um eine 250 kW Maschine erweitert. In 2011 wurde einer der beiden 190 kW Gas-Otto-Motoren gegen eine zweite 250 kW Maschine ausgetauscht. Der letzte 190 kW Gas-Otto-Motor wurde im Jahr 2014 durch eine dritte 250 kW Maschine ersetzt. Die installierte elektrische Anlagenleistung wurde folglich seit der Anlageninbetriebnahme sukzessive von 380 kW auf 750 kW erhöht.

Die Biogasanlage deckt ihren Strombedarf selbst und betreibt damit eine sogenannte Überschusseinspeisung ins Stromnetz. Seit Mitte des Jahres 2014 ist die Biogasanlage Teilnehmer an einem Direktvermarktungspool. Es ist angedacht, im Zuge der Flexibilisierung in Zukunft negative Regelernergie bereitzustellen.

Die nicht für die Beheizung der Gärbehälter benötigte BHKW-Wärme wird zur Beheizung von Wohnhäusern in einem Nahwärmenetz, eines nahe gelegenen Seniorenheimes sowie zur Trocknung von Scheitholz und Holzhackschnitzeln verwendet. 2014 wurde mit dem Bau eines zusätzlichen Nahwärmenetzes begonnen, um weitere Wohnhäuser der nahegelegenen Ortschaft mit Wärme zu versorgen.

3.6.2 Pilotanlage 10

Diese Pilotanlage wurde im Jahr 2005 von der Firma agriKomp geplant und mit einem großen Anteil an Eigenleistung errichtet. Bei der Anlage handelt es sich um eine klassische Kofermentations-Biogasanlage, in der etwa 30 % Wirtschaftsdünger zusammen mit 70 % nachwachsenden Rohstoffen vergoren werden (Frischmasseanteile). Die in einen Tierhaltungsbetrieb integrierte Biogasanlage speist ihren erzeugten Strom nach den Regelungen des EEG 2004 ins Netz ein.

Wie im Fließschema (Abbildung 9) dargestellt, verfügt die Anlage über zwei parallel geschaltete Fermenter. Während der Fermenter I (Maße: 14 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 850 m³) seit der Inbetriebnahme der Anlage existiert, wurde der Fermenter II (Maße: 18 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 1400 m³) erst im Jahr 2012 im Zuge einer Leistungserhöhung der Anlage errichtet. Beide Fermenter sind mit einer EPDM Gasspeicherhaube ausgestattet und werden mithilfe von Kunststoffrohr-Wandheizungen auf einem erhöhten mesophilen Temperaturniveau von durchschnittlich 47°C gehalten. Durchmischt werden beide Behälter mittels FU betriebener horizontaler Paddelrührwerke, wobei Fermenter I über ein Rührwerk und der größere Fermenter II über zwei Rührwerke verfügt. Feste Einsatzstoffe werden aus jeweils einem Vorlagetrichter (Fassungsvolumen: 13 m³) mit einer einzigen Auflöse-/Stopfschnecke direkt in die beiden Fermenter eingetragen. Gülle aus dem betriebseigenen Schweinestall am Standort und von benachbarten Betrieben wird mithilfe einer Tauchschneidpumpe aus der Vorgrube (Maße: 5 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 70 m³) in den Fermenter I dosiert. Zur Verbesserung der Abbauleistung des Gärgemisches wurde ursprünglich zwischen dem ersten Fermenter und dem Nachgärer eine Ultraschall-Desintegration installiert, welche im Zuge der Umbaumaßnahmen im Jahr 2012 aber stillgelegt wurde.

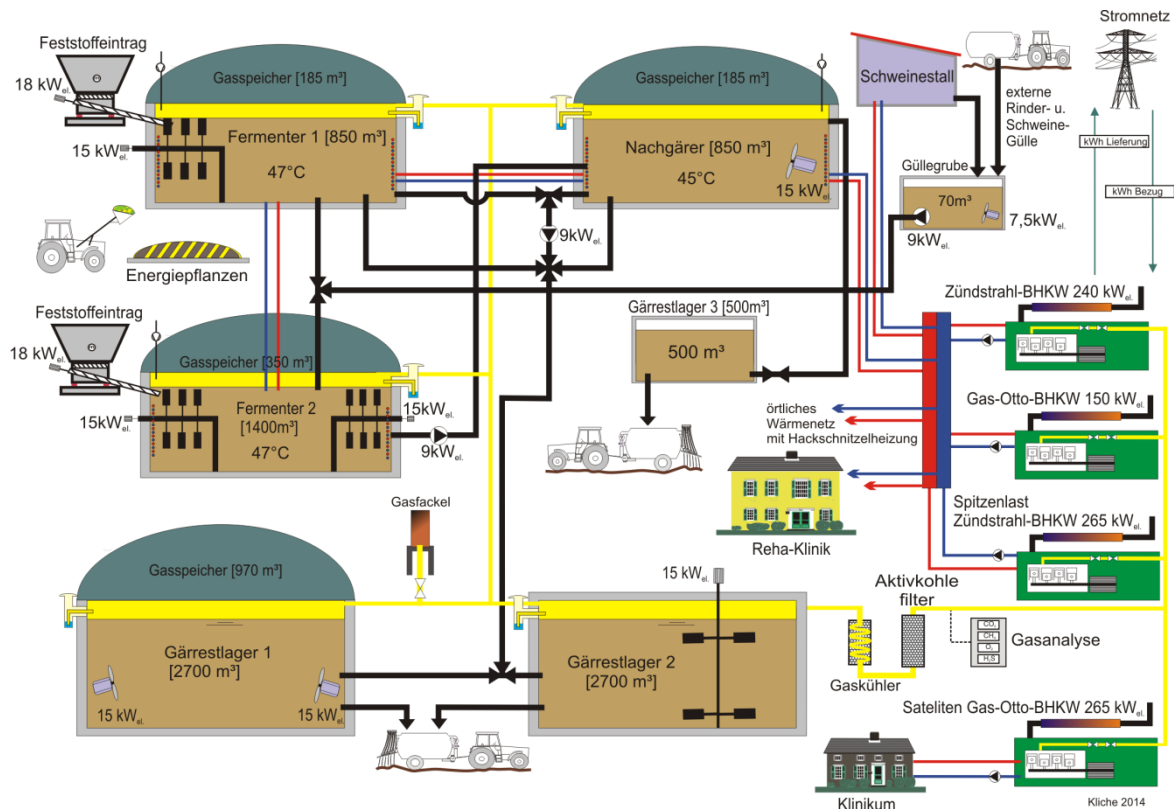


Abbildung 9: Fließbild der Pilotanlage #10

Den beiden Fermentern ist ein gemeinsamer, verhältnismäßig kleiner Nachgärer (Maße: 14 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 850 m³) nachgeschaltet, dem das Gärgemisch mittels zweier Exzentralschneckenpumpen zugeführt wird. Der Nachgärbehälter ist ebenfalls mit einer EPDM-Gasspeicherhaube ausgestattet und wird mithilfe einer Wandheizung auf einer durchschnittlichen Prozesstemperatur von 45 °C gehalten. Der Behälter wird mit einem Tauchmotorrührwerk durchmischt.

Über eine weitere Exzentralschneckenpumpe wird der Gärrest aus dem Nachgärer in das ebenfalls mit einer EPDM Gasspeicherhaube und zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattete erste Gärrestlager gepumpt (Maße: 25 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 2700 m³). Ist das Gärrestlager I voll, so wird der Gärrest aus dem Nachgärer in ein zweites, erst im Jahr 2012 errichtetes Gärrestlager gepumpt (identische Maße wie Gärrestlager I). Um aufgrund eines zu großen Gaslagervolumens nicht in die Störfallverordnung zu fallen, wurde das zweite Gärrestlager mit einer Betondecke anstelle der EPDM Gasspeicherhaube versehen. Das Gärrestlager II ist mit einem stehenden Paddelrührwerk ausgerüstet, das über ein festes und ein schwimmendes Paddel zur Anpassung an den schwankenden Behälterfüllstand verfügt. Ein drittes, nicht gasdicht ausgeführtes älteres Gärrestlager (Maße: 13 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 400 m³) bietet bei Bedarf zusätzliche Lagerkapazität. Alle Gärrestlager sind nicht wärmedämmend, so dass der Gärrest vor der Ausbringung abkühlt.

Insgesamt verfügt die Biogasanlage über eine Gasspeicherkapazität von etwa 1800 m³ und ist damit gut für eine mögliche flexible Stromproduktion gerüstet. Die Kühlung und Entfeuchtung des erzeugten Gases erfolgt mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät.

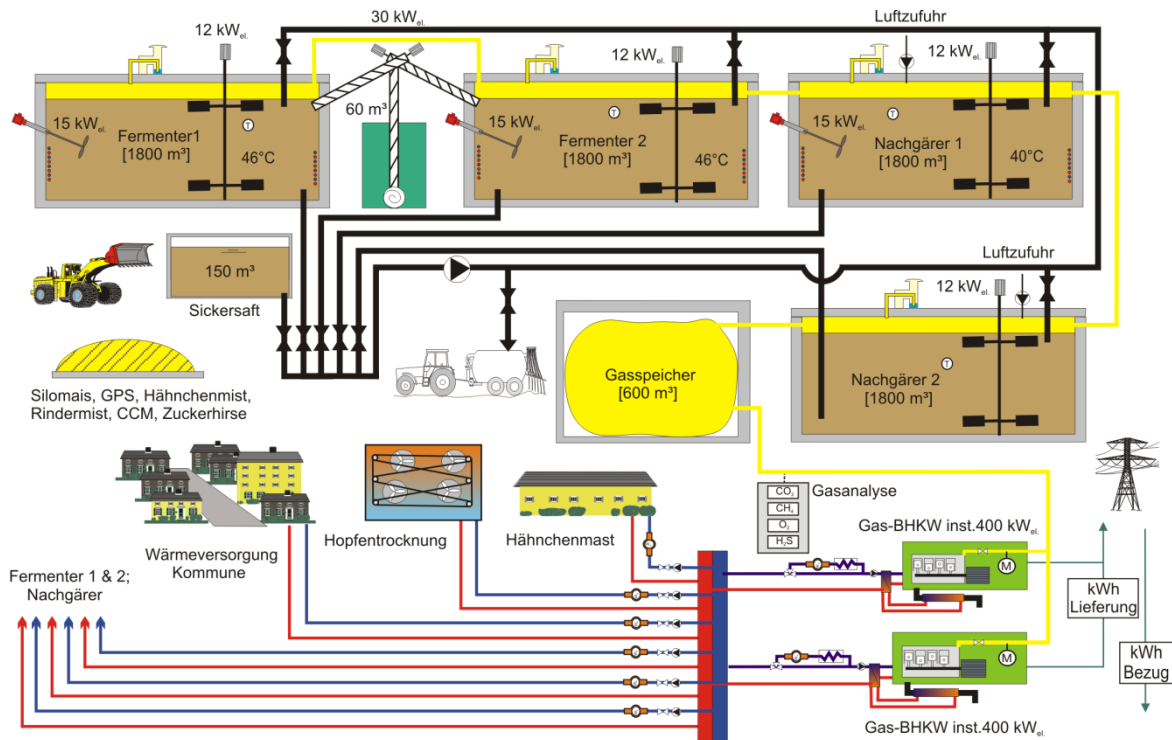
Ursprünglich wurde das in der Anlage erzeugte Biogas von einem 240 kW Zündstrahlmotor und einem 150 kW Gas-Otto-Motor zu Strom umgewandelt. Im Rahmen der Anlagenenerweiterung wurde im Jahr 2012 ein weiteres Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 265 kW als Satelliten-BHKW installiert. Um in Zukunft bedarfsgerecht Strom produzieren zu können, wurde im Jahr 2014 ein Spitzenlast-BHKW mit einem 265 kW Zündstrahl-Motor am Standort der Biogasanlage errichtet. Die installierte elektrische BHKW-Leistung wurde damit seit der Anlageninbetriebnahme schrittweise von 390 kW auf 920 kW mehr als verdoppelt. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme wird zur Beheizung eines Schweinestalls, von Betriebsgebäuden und einer nahegelegenen Klinik genutzt.

3.6.3 Pilotanlage 12

Die von der Firma Niederlöhner und Quirrenbach (NQ) geplante und mit einem großen Anteil an Eigenleistung errichtete Biogasanlage befindet sich in der Holledau in der Nähe von Wolnzach und ist seit Ende 2007 in Betrieb. In einen Hähnchenmastbetrieb integriert, stellt die Anlage eine überwiegende NAWARO-Biogasanlage dar, die den Trockenfermentationsbonus gemäß EEG 2004 in Anspruch nimmt.

Wie im Fließschema in Abbildung 10 dargestellt, verfügt die Anlage über zwei parallel geschaltete Fermenter (Maße: 20 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 1800 m³), denen zwei hintereinandergeschaltete Nachgärer (Maße: 20 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 1800 m³) folgen. Alle Gärbehälter sind baugleich und verfügen über eine Betondecke, sind rundum wärmedämmend und werden mithilfe von Kunststoffrohr-Wandheizungen beheizt. Die Wärmedämmung der Betondecken wurde an der Innenseite angebracht und fungiert damit gleichzeitig als Betonschutz und Besiedelungsfläche für Schwefelbakterien.

Die beiden Fermenter werden zur leichteren Durchmischung aufgrund verbesserter Viskosität mit einer erhöhten Gärtemperatur von etwa 46 °C betrieben und sind jeweils mit einem stehendem, langsam drehenden Paddelrührwerk und einem schnell drehenden Stabmixer ausgestattet. Die festen Einsatzstoffe werden aus einem 60 m³ fassenden Schubbo-dencontainer mittels Fräsrollen in eine seelenlose lange Trogschnecke dosiert, die über eine zentrale Steigschnecke und zwei Stopfschnecken die beiden Fermenter beschickt. Zur Vermeidung witterungsbedingter Korrosionsprozesse ist der gesamte Feststoffvorlagebe-hälter mit Wiegeeinrichtung eingehaust.



Kissel 2014

Abbildung 10: Fließbild der Pilotanlage #12

Mit der zentral installierten, leistungsstarken Drehkolbenpumpe kann das Gärgemisch von einem Gärbehälter zu einem beliebigen anderen, aber auch in denselben Gärbehälter recirkuliert werden. Der Drehkolbenpumpe ist ein sogenannter Hacker vorgeschaltet, in welchem zwei gegenläufige Messerwellen die Substratpartikel zerreißen, so dass die Durchmischung der Gär suspension erleichtert wird.

Über die Pumpstation wird auch der erste Nachgärer mit Gärgemisch aus den beiden parallel geschalteten Fermentern befüllt. Die Gärtemperatur im Nachgärer I wird mit knapp 40 °C niedriger gehalten als in den Hauptfermentern. Ein stehendes Paddelrührwerk in Kombination mit einem Stabmixer sorgt für die Homogenisierung der Suspension in diesem Gärbehälter.

Vom ersten Nachgärer wird das Gärgemisch wieder über die zentrale Pumpstation in den zweiten Nachgärer gefördert, der mit durchschnittlich ca. 34 °C die niedrigste Gärtemperatur aufweist. Dieser Behälter ist nur mit einem Paddelrührwerk versehen, das wie die Paddelrührwerke in den anderen Behältern über ein festes bzw. fixiertes und ein schwimmendes Paddel verfügt und sich damit schwankenden Behälterfüllständen gut anpassen kann. Die in der Vorgrube (Maße: 8 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 150 m³) gesammelten

Sickersäfte sowie der Oberflächenabfluss von der Fahrsiloplanlage werden erst in Nachgärer II dem Gärprozess zugeführt.

Die Biogasanlage verfügte bisher über kein separates Gärrestlager, in dem das Substrat vor einer Ausbringung aufs Feld abkühlen kann. Für das Jahr 2016 ist aber die Errichtung eines solchen geplant.

Da alle Gärbehälter mit einer Betondecke versehen sind, erfolgt die Gaslagerung in einem separaten Betonbehälter (Maße: 12 m x 6 m) mit integriertem Gasspeichersack (Lagervolumen: ca. 600 m³). Die Kühlung und Entfeuchtung des erzeugten Gases wird mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät realisiert. Besonderheit des Klimageräts ist, dass es so groß dimensioniert wurde, dass damit im Falle einer Selbsterwärmung der Gärbehälter über eine Bypassleitung in den Behälterwandheizungen auch deren Kühlung möglich ist.

Das in der Anlage erzeugte Biogas wird mit zwei baugleichen Gas-Otto-Motoren mit einer elektrischen Nennleistung von 400 kW in Strom und Wärme umgewandelt. Die installierte elektrische Leistung beträgt demnach 800 kW, wobei die beiden Motoren mit jeweils durchschnittlich 340 kW in Teillast betrieben werden und damit die Anlage eine elektrische Bemessungsleistung von in Summe etwa 680 kW erreicht. Seit Mitte des Jahres 2014 ist die Biogasanlage Teilnehmer eines Direktvermarktungspools. Es ist angedacht, im Zuge der Flexibilisierung in Zukunft negative Regelernergie bereitzustellen.

Trotz des ausgelagerten Standorts der Anlage kann ein hoher Anteil der BHKW-Wärme effektiv genutzt werden. Mit Wärme versorgt werden die ebenfalls ausgelagerten Hähnchenmastställe, ein Nahwärmenetz in der Ortschaft sowie eine benachbarte Hopfentrocknungsanlage. Während der Hopfenerntekampagne ist der Wärmebedarf so hoch, dass die Abwärme aus der Biogasanlage nicht ausreicht.

3.6.4 Pilotanlage 15

Die im oberbayerischen Landkreis Pfaffenhofen gelegene Biogasanlage wurde von der Firma Agraferm geplant und errichtet. Sie ist in einen tierhaltenden, ökologisch wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betrieb integriert und speist seit dem Jahr 2005 Strom in das Netz ein. Da im Ökolandbau kein synthetischer Stickstoffdünger eingesetzt werden darf, baut der Betrieb zur Stickstofffixierung in den Boden mehrjähriges Klee gras an, das in Form von Silage für die Biogasproduktion verwertet wird. Durch die Schnittnutzung und energetische Verwertung des Klee grasses wird nicht nur die Stickstofffixierungsleistung der Knöllchenbakterien am Klee verbessert, sondern dem Betrieb steht zusätzlich mit dem Gärrest auch ein wertvolles Düngemittel zur bedarfsgerechten Pflanzendüngung zur Verfügung. Der Betrieb kooperiert mit einem weiteren ökologisch wirtschaftenden Betrieb, dessen Klee gras ebenfalls in der Biogasanlage verwertet wird. Die Anlage wird gänzlich ohne Zugabe flüssiger Einsatzstoffe betrieben und realisiert den Trockenfermentationsbonus gemäß EEG 2004. Weitere Substrate wie Maissilage, Getreideschrot und Putenmist werden nur in geringen Mengen zur Feinstuerung der Anlage eingesetzt.

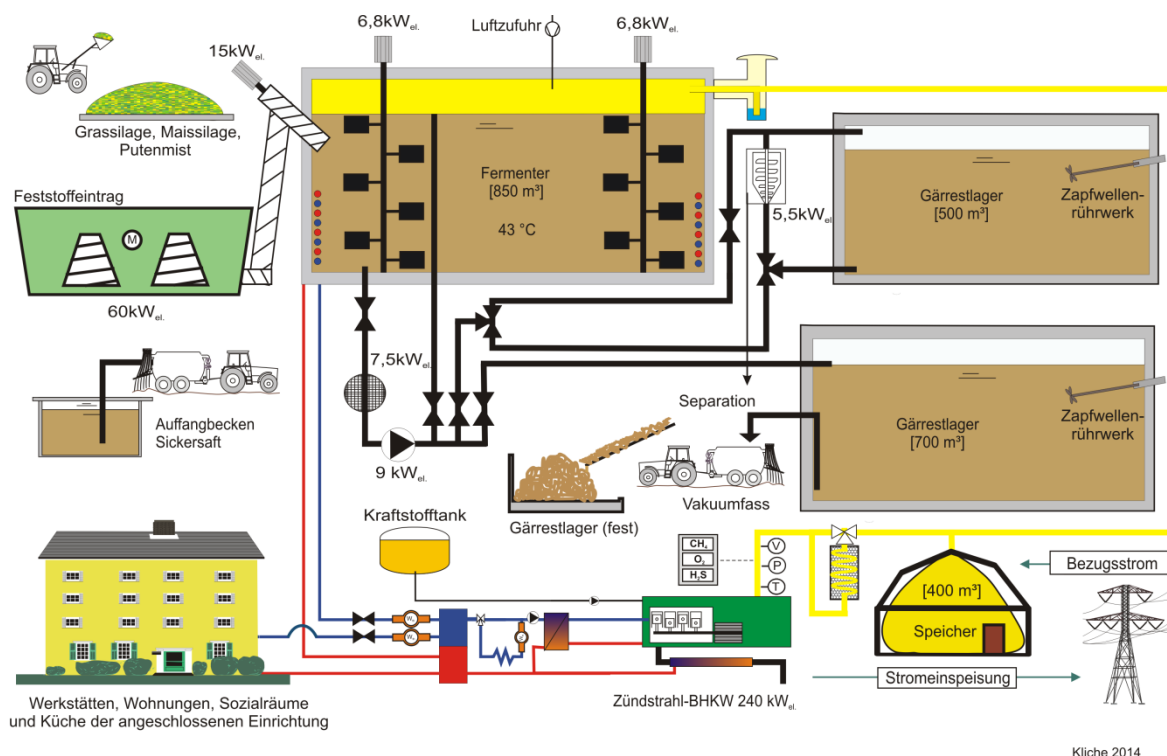


Abbildung 11: Fließbild der Pilotanlage #15

Wie im Fließschema in Abbildung 11 dargestellt, verfügt die Anlage nur über einen einzigen, aus Spannbeton-Fertigteilen erstellten Fermenter (Maße: 14 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 850 m³), der bei einer Prozesstemperatur von durchschnittlich 43 °C betrieben wird. Die Errichtung eines Nachgärers ist für das Jahr 2016 geplant. Es handelt sich bei der Biogasanlage laut Hersteller um eine „Hochleistungsanlage“, welche durch ein einstufiges Vergärungssystem mit relativ geringem Fermentationsraum im Verhältnis zur installierten elektrischen Leistung gekennzeichnet ist. Der Fermenter mit Betondecke ist voll wärmedämmend ausgeführt und wird mithilfe von Kunststoffrohr-Wandheizungen auf der gewünschten Prozesstemperatur gehalten.

Der Einsatz der mit Ladewagen eingefahrenen und daher langfaserigen Kleegrassilage bedingt eine sehr hohe mechanische Belastung der Feststoffeintrags- und Rührtechnik. Die Feststoffe werden mithilfe eines 40 m³ fassenden Zweischnecken-Vertikalmischers über eine Konstruktion aus Steig- und Stopfschnecke oben in den Fermenter eingetragen. Um das äußerst zähe und dickflüssige Gärgemisch mit sehr hohem Trockensubstanzgehalt durchrühren zu können, ist der Fermenter mit zwei äußerst langsam laufenden, stehenden Paddelrührwerken ausgestattet, die im Falle eines technischen Defekts während des Betriebs der Anlage durch die Behälterdecke ausgetauscht werden können. Die Rührwerke zielen weniger auf eine vollständige Homogenisierung des Behälterinhalts ab, als vielmehr auf die radiale Vermischung und das Austreiben des entstehenden Biogases. Zur Verringerung der Viskosität des Gärgemisches wurde im Jahr 2011 eine Bypassleitung am Fermenter installiert, über die – vergleichbar einem Wiederkäuer – Substrat mithilfe einer Exzentrerschneckenpumpe aus dem Fermenter angesaugt, durch einen Lochscheiben-Nasszerkleinerer mit integrierter Störstoffabscheidung gepumpt und anschließend wieder in den Fermenter zurückgeführt wird.

Das Gärgemisch aus dem Fermenter wird über die zentrale Exzentrerschneckenpumpe in einen Pressschneckenseparator gefördert und dort abgepresst. Der separierte feste Gär-

rückstand wird in einem überdachten Fahrsilo gelagert, die flüssige Phase in zwei nicht gasdicht ausgeführten Gärrestlagern (Lagervolumen: ca. 1200 m³).

Da der Fermenter wärmeoptimiert mit Betondecke ausführt ist, erfolgt die Gaslagerung in einem eingehausten, separaten Gasspeichersack (Lagervolumen: ca. 400 m³). Die Kühlung und Entfeuchtung des erzeugten Gases erfolgt mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät. Das in der Anlage erzeugte Biogas wird mit einem Zündstrahl-BHKW mit $P_{el} = 240$ kW in Strom und Wärme umgewandelt. Die stiftungseigenen Gebäude (Kloster, Werkstätten und Wohnhäuser) nehmen die gesamte überschüssige BHKW-Wärme ab. Es ist angedacht, im laufenden Jahr das BHKW um einen zusätzlichen Motor zu erweitern, um in Zukunft Regelleistung bereitstellen zu können.

3.6.5 Pilotanlage 16

Die von der Firma Novatech geplante und errichtete Biogasanlage befindet sich im oberbayerischen Landkreis Freising. Ähnlich der Pilotanlage 15 ist auch diese Biogasanlage in einen tierhaltenden, ökologisch wirtschaftenden Gutsbetrieb integriert und speist seit dem Jahr 2008 Strom in das Netz ein. Der pflanzenbauliche Schwerpunkt des Betriebs liegt in der Saatgutvermehrung und -erzeugung. Gründe für die Errichtung einer Biogasanlage auf dem Betrieb waren die energetische Nutzung des in der Ökofruchtfolge zur Stockstofffixierung in den Boden angebauten mehrjährigen Kleeegrases und die gleichzeitige Erzeugung eines wertvollen organischen Düngers für die Ökosaatgutvermehrung in Form des Gärrestes. Zur Verringerung gärbiologischer Probleme wird der Substratmix durch zugekaufte Maissilage, Getreide-GPS und im Betrieb anfallenden Rindermist ergänzt. Die Biogasanlage wird gänzlich ohne Zugabe von flüssigen Einsatzstoffen betrieben und realisiert den Trockenfermentationsbonus gemäß EEG 2004.

Eine Besonderheit der Anlage stellt der im Fließschema dargestellte liegende Pfropfenstromfermenter (Maße, $L \times B \times H = 16 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$; Arbeitsvolumen: ca. 900 m³) dar. Der Fermenter ist von allen Seiten wärmegeklämt und wird mithilfe von Edelstahlrohr-Wandheizungen auf einer Gärtemperatur von 44 °C gehalten. Um das durch den großen Anteil an Klee gras bedingte extrem zähe und dickflüssige Gärgemisch im Fermenter durchmischen zu können, verfügt der Pfropfenstromfermenter über ein durchgehendes, sehr langsam laufendes Haspelrührwerk. Das beidseitig gelagerte Haspelrührwerk ist in der Mitte geteilt und wird von zwei synchronisierten Getriebemotoren mit FU angetrieben. Die festen Einsatzstoffe werden aus einem 35 m³ fassenden Abschiebecontainer mittels stehender Fräswalzen in eine Trog schnecke dosiert, die über eine senkrechte Steigschnecke und eine Stopfschnecke den Fermenter beschickt.

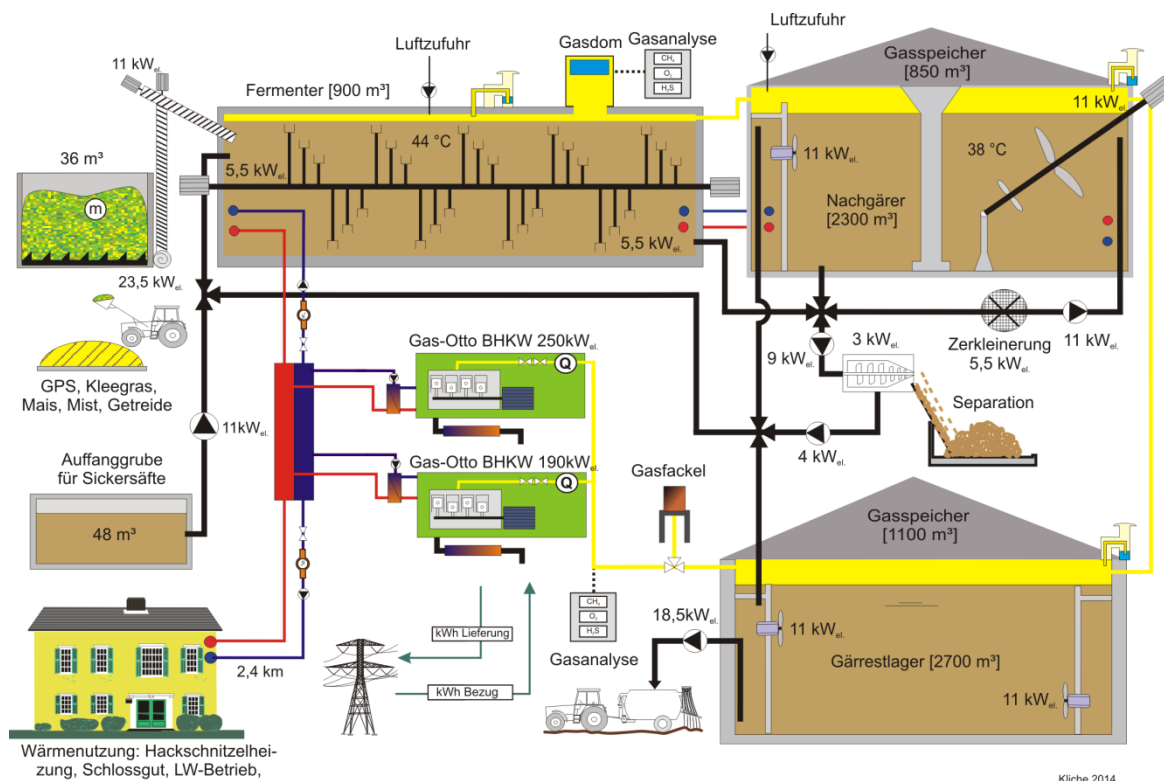


Abbildung 12: Fließbild der Pilotanlage #16

Dem liegenden Fermenter ist ein herkömmlicher stehender Nachgärbehälter (Maße: 23 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 2300 m³) mit Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagerkapazität: 850 m³) nachgeschaltet. Eine Drehkolbenpumpe pumpt das Gärgemisch über einen Lochscheiben-Nasszerkleinerer aus dem Fermenter in den Nachgärer. Der an Wand und Boden wärmegeädämmte Behälter wird mittels einer Wand- und Bodenheizung auf einer Gärtemperatur von 38 °C gehalten und ist mit einer Kombination aus langsam drehendem Langachsrührwerk und schnell drehendem Tauchmotorrührwerk ausgestattet. In der Fahr-siloanlage anfallender Silagesickersaft wird von einer Kreispumpe aus der Vorgrube (Maße: 4 m x 4 m; Lagerkapazität: ca. 50 m³) in den Nachgärer gefördert.

Weitgehend ausgegorenes Gärgemisch wird über eine Exzentrerschneckenpumpe in einen Pressschneckenseparator gefördert und dort abgepresst. Die separierten festen Gärrückstände werden in ein Fahrsilo transportiert, leicht verdichtet und mit einer Folie abgedeckt gelagert. Die flüssige Phase wird mithilfe einer weiteren Exzentrerschneckenpumpe in ein gasdichtes Gärrestlager (Maße: 25 m x 6 m; Lagerkapazität: ca. 2700 m³) gepumpt, wo der flüssige Gärrest bis zur Ausbringung auf die Felder abkühlen kann. Das Gärrestlager ist mit einem Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagerkapazität: 1100 m³) und zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattet.

Das in der Anlage erzeugte Biogas wird in zwei Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 190 kW und 250 kW in Strom wie auch Wärme umgewandelt. Die BHKW-Wärme deckt zusammen mit einem Biomasseheizkraftwerk (thermische Leistung 800 kW), das mit Hackschitzeln aus betriebseigenen Waldflächen befeuert wird, den gesamten Wärmebedarf des ökologischen Betriebs mit Gewächshäusern sowie des ca. zwei Kilometer entfernt liegenden Schlosses mit seinen Tagungs- und Gastronomieräumen.

3.6.6 Pilotanlage 22

Die von der Firma 4Biogas geplante und errichtete Biogasanlage des Typs NOVA befindet sich in Mittelfranken oberhalb der Stadt Ansbach. Sie ist in einen großen Milchviehbetrieb mit Nachzucht und Bullenmast integriert und speist seit dem Jahr 2009 Strom in das öffentliche Netz ein. Neben der Viehhaltung stellt der Marktfruchtanbau das zweite große Betriebsstandbein dar, während die Biogaserzeugung insgesamt eine eher untergeordnete Rolle im Betriebsablauf spielt. Der Substratmix der Hofbiogasanlage setzt sich zu 80 % aus im Betrieb anfallendem Wirtschaftsdünger und zu 20 % aus Energiepflanzen bzw. Futterresten zusammen (Frischmasseanteile).

Die Besonderheit dieser Anlage ist die modulare Kompaktbauweise. Dabei wurden die beiden stehenden Fermenter, welche optisch Hochsilos ähneln, als vormontierte Fertigteile aus Edelstahl geliefert und vor Ort nur noch zusammengesetzt. Der vergleichsweise sehr kleine „Fußabdruck“ dieser Fermenter wird im Lageplan ersichtlich (Abbildung 13).

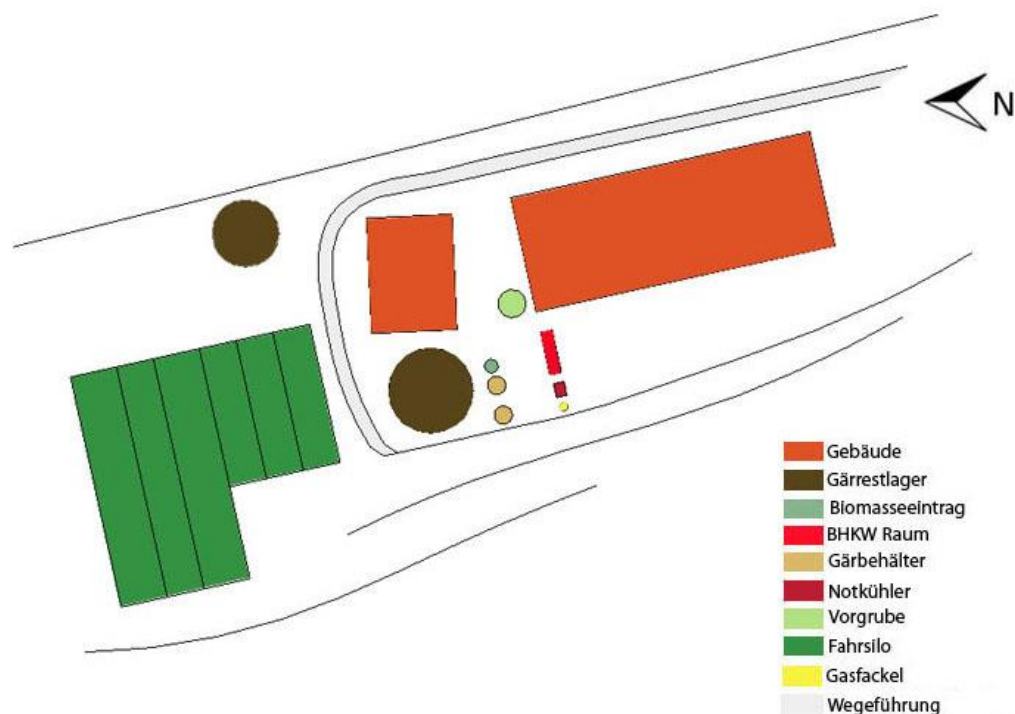


Abbildung 13: Lageplan von Pilotbetrieb #22

Wie im Fließschema dargestellt (Abbildung 14), verfügt die Anlage über zwei parallel geschaltete, baugleiche Hochfermenter (Maße: 3,5 m x 12 m; Arbeitsvolumen: ca. 110 m³). Die aus Edelstahl gefertigten Behälter sind voll wärmedämmend und werden mithilfe einer Hohlkammerheizung in der Behälterwand auf einer Gärtemperatur von 53 °C gehalten. Da die gesamte Behälterwand als Hohlkammer mit Heißwasser durchströmt wird, ist die Oberfläche für die Wärmeübertragung um ein Vielfaches höher als in herkömmlichen Gärbehältern mit Heizungsrohren an der Behälterwand. Eher ungewöhnlich ist auch die Durchmischung der beiden Fermenter ohne mechanische Rührereinrichtung. Stattdessen wird das Gärgemisch durch kontinuierliches Umpumpen des Behälterinhalts mittels einer Exzentrerschneckenpumpe von unten nach oben in Bewegung gehalten und dabei durchmischt.

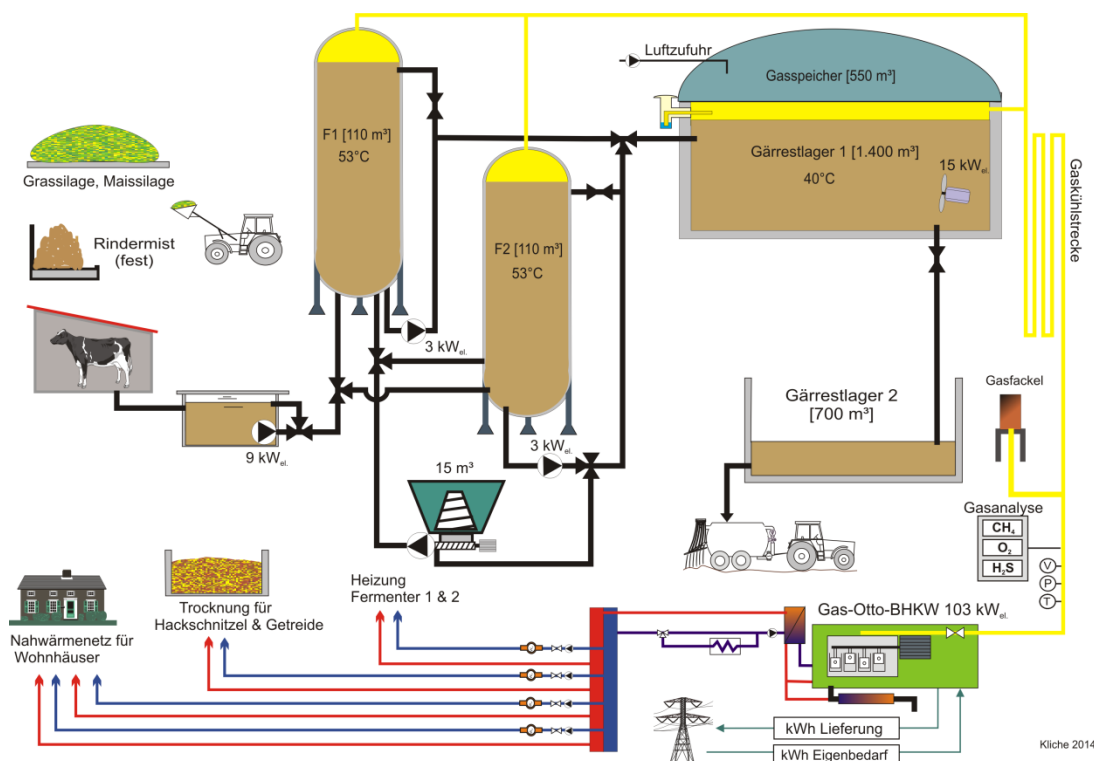


Abbildung 14: Fließbild der Pilotanlage #22

Die festen Einsatzstoffe werden aus einem 15 m³ fassenden Einschnellen-Vertikalmischer in den Rachen einer Flüssigfütterungsanlage dosiert. Dort vermengt eine Exzentralschneckenpumpe die eindosierten Feststoffe mit Rezirkulat aus dem jeweiligen Gärbehälter, der mit Frischsubstrat beschickt werden soll, und pumpt den Substratbrei in die Fermenter. Ein in die Gärbehälter integriertes sogenanntes „Hydrolyserohr“ wird nach dem Prinzip eines Überlaufs von unten mit Frischsubstrat beschickt und soll versäuertes Material nach oben hin in den Gärraum abgeben. Rindergülle, die aus den Ställen in der Vorgrube (Maße: 6 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 110 m³) zusammenläuft, wird mithilfe einer Tauchschneid-Kreiselpumpe in die beiden Fermenter gefördert.

Den beiden Fermentern ist ein gemeinsames Gärrestlager (Maße: 18 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 1400 m³) mit Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagervolumen: ca. 550 m³) nachgeschaltet, das von den Zirkulationspumpen mit Gärgemisch aus den Fermentern beschickt wird. Wand und Boden des ersten Gärrestlagers sind wärmegeklämt, wodurch im Behälter eine Prozesstemperatur von etwa 40 °C gehalten werden kann. Aufgrund der kurzen Verweilzeit des Substrats in den Fermentern und der für ein Gärrestlager relativ hohen Temperatur fungiert das erste Gärrestlager eher als Nachgärer. Um die Bildung einer Schwimmschicht zu verhindern, wurde ein langsam drehendes Großflügeltauchmotorrührwerk installiert.

Dem ersten Gärrestlager ist ein offener zweiter Lagerbehälter nachgeschaltet (Maße: 15 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 700 m³), in dem der Gärrest vor der Ausbringung auf die Felder abkühlen kann. Das offene Gärrestlager, das von der übrigen Anlage etwas abgesetzt ist (vgl. Abbildung 13), wird in zeitlichen Abständen mittels eines Schnellüberlaufs aus dem ersten Gärrestlager befüllt.

Die Kühlung und Entfeuchtung des in der Anlage erzeugten Biogases erfolgt mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät. Ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 103 kW wandelt das Gas in Strom und Wärme um. Die BHKW-Wärme

wird außer für die Beheizung der Gärbehälter im Winter vor allem zur Wärmeversorgung von Wohnhäusern über ein Nahwärmenetz und im Sommer zur Trocknung landwirtschaftlicher Schüttgüter genutzt.

3.6.7 Pilotanlage 23

Die von der Firma Agrikomp konzipierte und schlüsselfertig gebaute Biogasanlage des Typs GÜLLEWERK liegt im oberbayerischen Landkreis Eichstätt. Sie ist in einen großen Schweinemast- und Zuchtsauenhaltungsbetrieb integriert und speist seit dem Jahr 2011 Strom in das öffentliche Netz ein. Ähnlich dem Pilotbetrieb 22 liegt auch der Schwerpunkt dieses landwirtschaftlichen Betriebes nicht in der Biogaserzeugung, sondern im Marktfrucht- und Futterbau mit angeschlossener Veredelung. Auch diese Hofbiogasanlage setzt zu 80 % Wirtschaftsdünger aus dem Betrieb und zu 20 % Energiepflanzen bzw. Futterreste ein (Frischmasseanteile).

Besonderheit dieser Anlage ist die modulare Kompaktbauweise, die sich durch einen geringen Platzbedarf auszeichnet. Dabei sind Fermenter, Anlagensteuerung, Pumpen, Behälterheizung, Gasaufbereitung und BHKW in einem einzigen Container untergebracht, der vollständig vormontiert mithilfe eines Schwerlastkranes am Standplatz abgestellt und angeschlossen wurde. Wie in Abbildung 15 dargestellt, ist die gesamte Anlage räumlich sehr konzentriert angeordnet.

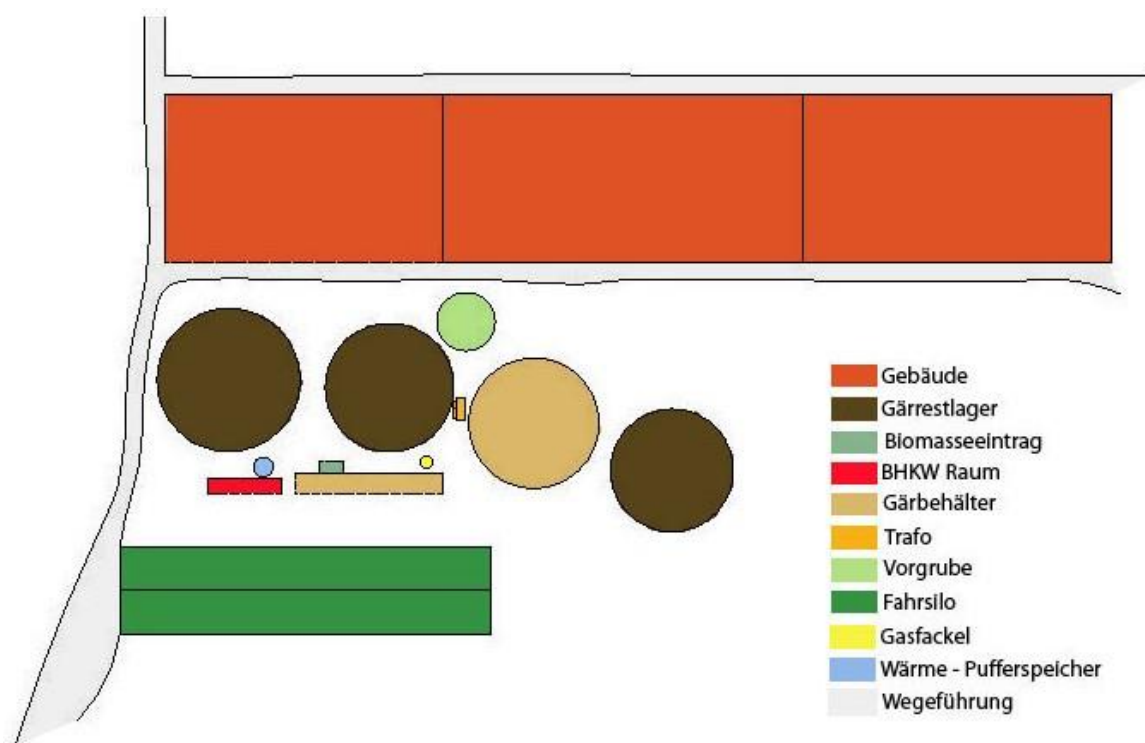


Abbildung 15: Lageplan des Pilotbetriebs #23

Der in den Container integrierte liegende Fermenter (Maße: 2,9 m x 18 m; Arbeitsvolumen: ca. 110 m³) ist als Pfropfenströmer mit einem durchgehenden zentralen Haspelrührwerk ausgeführt, das einseitig von einem Getriebemotor mit FU langsam gedreht wird. Der wärmegedämmte Fermenter wird durch einen externen Wärmetauscher auf einer Gärtemperatur von 53 °C gehalten. Feste Einsatzstoffe werden aus einem 7 m³ fassenden Vorlagetrichter mithilfe zweier Auflöseschnecken in eine Trog- bzw. Steigschnecke dosiert, die das Substrat an eine Stopfschnecke übergibt und oben in den Fermenter einträgt. Gül-

le, die aus den angrenzenden eigenen Schweineställen in der Vorgrube (Maße: 5 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 75 m³) zusammenläuft, wird von einer Exzentrerschneckenpumpe angesaugt und in den Fermenter gefördert (Abbildung 16).

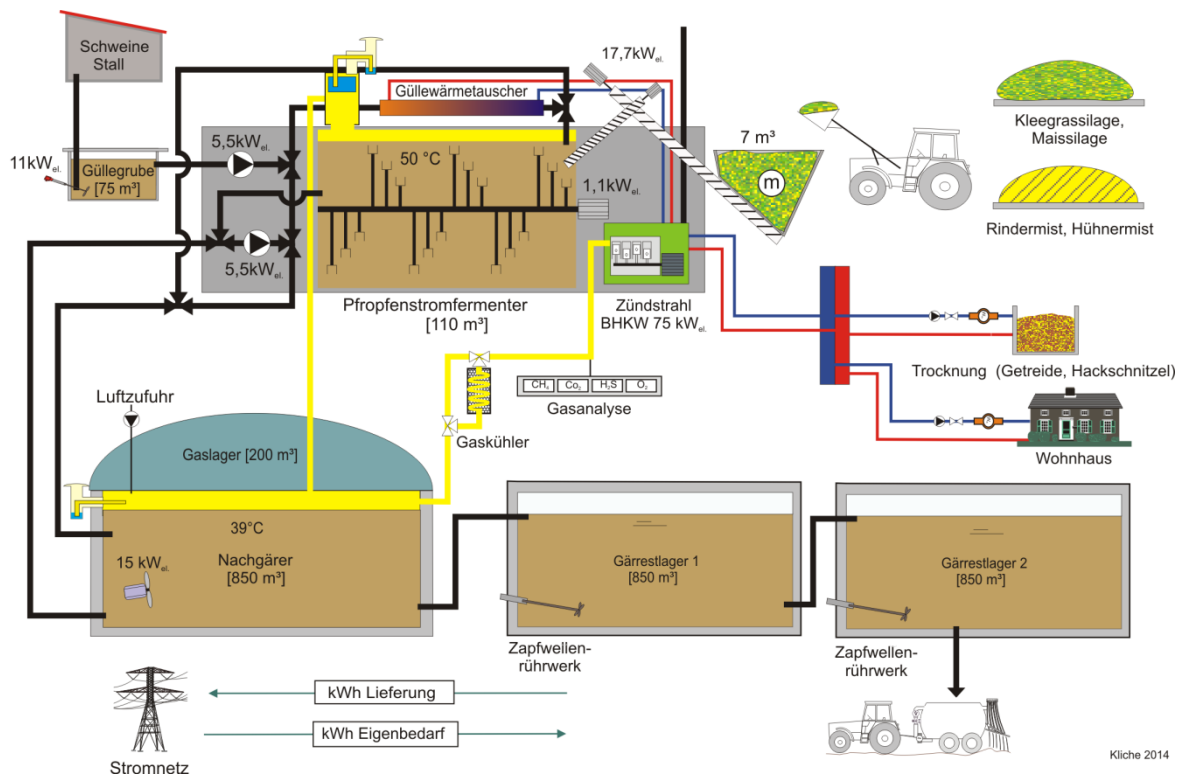


Abbildung 16: Fließbild der Pilotanlage #23

Dem liegenden Fermenter ist ein stehender Nachgärer (Maße: 14 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 850 m³) mit EPDM-Gasspeicherhaube (Lagervolumen: ca. 200 m³) nachgeschaltet. Der sowohl an der Wand wie auch am Boden wärmegeämmte Nachgärbehälter wird durch denselben externen Wärmetauscher wie der Hauptgärbehälter aufgeheizt und auf einer Gärtemperatur von etwa 39 °C gehalten. Für den Aufheizvorgang wird die Bypassleitung des Fermenters pneumatisch geschlossen und eine Bypassleitung am Nachgärer geöffnet. Über dieselbe Substratleitung wird der Nachgärer auch mit Gärgemisch aus dem Fermenter beschickt. Durchrührt wird der Nachgärer mithilfe eines Tauchmotorrührwerkes. Um im Fermenter den Abbauprozess zu stabilisieren und den Fermenterinhalt zu verdünnen, wird regelmäßig Gärgemisch aus dem Nachgärer über den Wärmetauscher in den Fermenter rezirkuliert.

Der Gärrest aus dem Nachgärbehälter fließt in zeitlichen Abständen über einen Schnellüberlauf in zwei baugleiche, nicht gasdicht ausgeführte Gärrestlager (Maße: 17 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 850 m³). Dort kann der Gärrest vor der Ausbringung auf die Felder abkühlen. Um in Zukunft das während der Gärrestlagerung anfallende Restgas auffangen und verwerten zu können, ist die Errichtung eines dritten Lagerbehälters mit Gasspeicherhaube geplant.

Die Kühlung und Entfeuchtung des in der Anlage erzeugten Biogases erfolgt mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät. Ein Zündstrahl-BHKW mit $P_{el} = 75 \text{ kW}$ wandelt das Gas in Strom und Wärme um. Die BHKW-Wärme wird zur Beheizung der angrenzenden Schweineställe und eines Wohnhauses genutzt. Im Zuge der Anlagenerweiterung

um ein gasdichtes Gärrestlager ist für 2015 auch die Investition in ein Spitzenlast-BHKW geplant, um in Zukunft Regelleistung zur Verfügung stellen zu können.

3.6.8 Pilotanlage 24

Die von der Firma MT-Energie geplante und errichtete Biogasanlage liegt in einem großen Zuckerrübenanbaugebiet in Niederbayern nahe der Zuckerfabrik Plattling. Sie ist in einen für bayerische Verhältnisse sehr großen landwirtschaftlichen Gutsbetrieb mit eigener Brauerei angegliedert und speist seit dem Jahr 2004 Strom in das Netz ein. Hauptbetriebszweig ist der Marktfruchtanbau, wo sich aufgrund bester Bodenqualitäten im Gäuboden hohe Ernteerträge erzielen lassen. Anbauschwerpunkt des Betriebes bilden Zuckerrüben, Kartoffeln und Winterweizen. Die Biogasanlage wird zu größeren Anteilen mit Reststoffen aus der Brauerei sowie der Kartoffel- und Zuckerrübenverarbeitung betrieben. Um Schwankungen in der Verfügbarkeit dieser Reststoffe auszugleichen und eine gewisse Kontinuität der Substratmischung zu gewährleisten, werden auch nachwachsende Rohstoffe zur Biogaserzeugung eingesetzt. Die Anlage weist damit den vielfältigsten Substratmix aller bisher untersuchten Pilotbetriebe auf.

Anlage 24 hat entsprechend ihrer großzügigen Dimensionierung und Bauweise einen entsprechenden Flächenbedarf. Das gesamte Anlagengelände ist aber auch sehr gut erschlossen und die Silos wurden so angelegt, dass die für die Beschickung zurückzulegenden Wege gering sind (Abbildung 17).

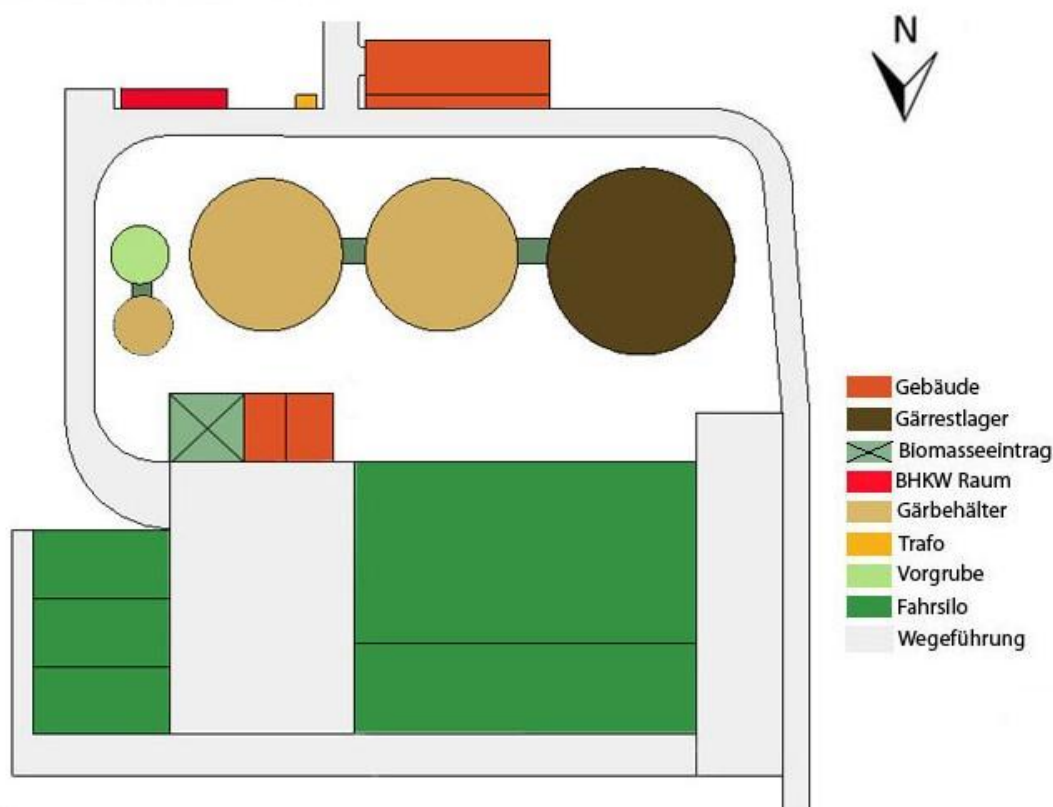


Abbildung 17: Lageplan des Pilotbetriebs #24

Eine Besonderheit der Anlage ist der dem Fermenter vorgeschaltete, beheizte Anmaischbehälter (Maße: 8 m x 4 m; Arbeitsvolumen: ca. 170 m³). Dieser Behälter ist mit einer wärmeisolierten Betondecke versehen und wird mithilfe einer Wandheizung auf einer Prozesstemperatur von 38 °C gehalten. Ursprünglicher Zweck dieses Behälters war es,

festen und flüssige Einsatzstoffe mit aktivem Gärgemisch aus dem Fermenter zu vermengen, aufzuheizen und in Form eines Breis an den Hauptfermenter abzugeben. Die Anmischgrube wurde ursprünglich mithilfe einer Konstruktion aus Trog-, Steig- und Stopfschnecke von einem Feststoffdosierer beschickt. Da die Eintragsschnecken durch faserige Einsatzstoffe bereits nach wenigen Jahren des Anlagenbetriebs so stark verschlissen waren, dass sie ausgetauscht werden mussten, entschied man sich anstelle der Schneckenkonstruktion eine Flüssigfütterungsanlage zu installieren (Abbildung 18).

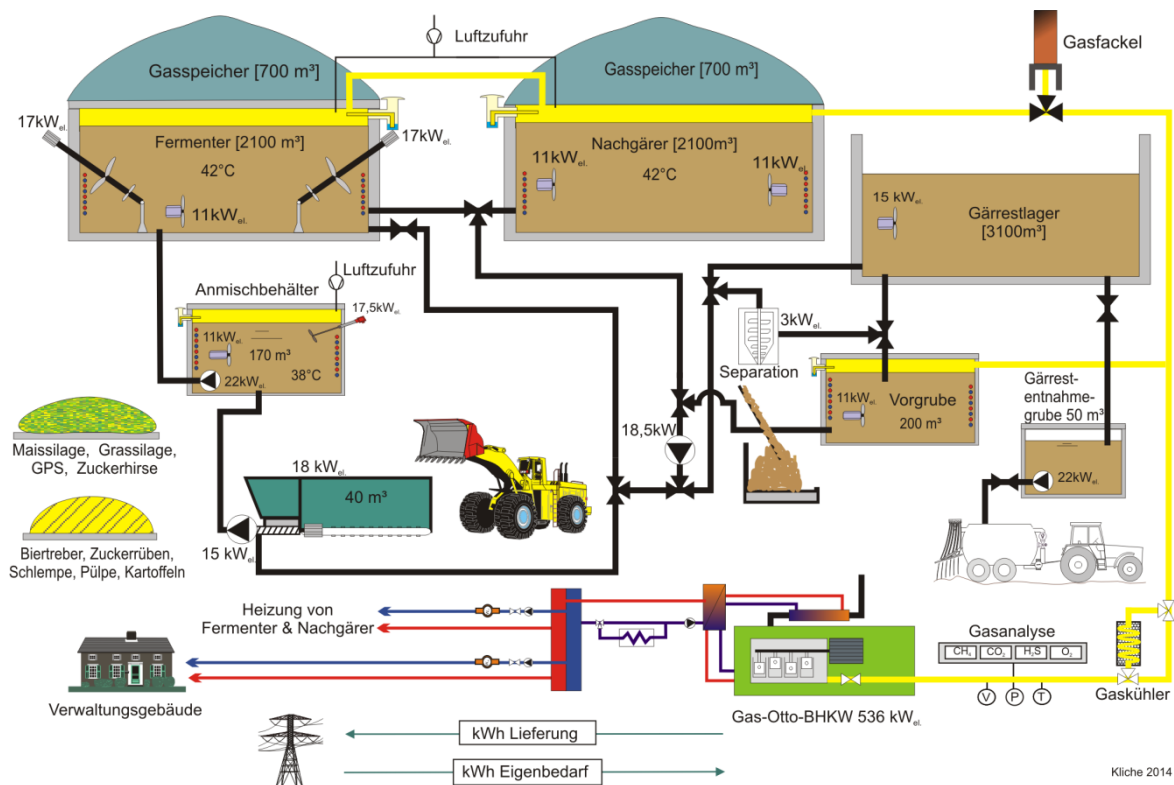


Abbildung 18: Fließbild der Pilotanlage #24

Die festen Einsatzstoffe werden nun aus einem 40 m³ fassenden Abschiebecontainer durch fünf stehende Frässhnecken in eine Trogschnecke dosiert. Diese trägt die Feststoffe dann in den Rachen einer Flüssigfütterungspumpe ein. Dort vermischt eine an den Rotor einer großdimensionierten Exzentrerschneckenpumpe angeflanschte Mischschnecke die eindosierte Feststoffe mit Rezirkulat, das mithilfe der zentralen Pumpstation aus dem Fermenter hinzudosiert wird. Der so erzeugte Substratbrei wird mithilfe der Flüssigfütterungspumpe in den Anmischbehälter gefördert. Flüssige Einsatzstoffe und Sickersaft aus der Fahrtiloanlage werden in einer Vorgrube (Maße: 8 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 200 m³) gesammelt und über die zentrale Pumpstation ebenfalls in den Anmischbehälter dosiert. Eine Kombination aus schnell laufendem Tauchmotorrührwerk und Stabmixer homogenisiert das Substratgemisch. Dabei entweichendes Schwachgas wird an das gasführende System abgegeben.

Mit Installation der Flüssigfütterung verlor der Anmischbehälter weitestgehend seine Funktion. Er hat nun die Hauptaufgabe, das zugeführte Substrat weiter aufzuheizen und Sedimente absetzen zu lassen, so dass keine Schmutzpartikel in die anderen Gärbehälter gelangen.

Dem Anmischbehälter folgt ein stehender Fermenter (Maße: 22 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 2100 m³), der mit einem Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagervolumen: ca. 700 m³) ausgestattet ist. Eine Tauchschneidpumpe pumpt in zeitlichen Abständen Substratgemisch aus der Anmischgrube in den Hauptfermenter. Der sowohl an der Wand wie auch am Boden wärmegeämmte Fermenter wird durch eine Wandheizung auf einer Gärtemperatur von 42 °C gehalten. Durchrührt wird der Behälter mithilfe zweier langsam drehender Langachsührwerke und eines schnell drehenden Tauchmotorührwerks.

Über die zentrale Pumpstation der Anlage wird mit einer Exzentrerschneckenpumpe Gär-
gemisch aus dem Fermenter in den gleichgroßen, nachgeschalteten Nachgärer (Maße: 22 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 2100 m³) gefördert, der ebenfalls mit Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagervolumen: ca. 700 m³) ausgestattet ist. Der an Wand und Boden wärmegeämmte Behälter wird mithilfe einer Wandheizung ebenfalls auf einer Prozess-
temperatur von 42 °C gehalten. Zwei baugleiche Tauchmotorührwerke sorgen für eine ausreichende Durchmischung.

Der Gärrest kann über die zentrale Pumpstation entweder direkt oder über einen Press-
schneckenseparator in das offene Gärrestlager (Maße: 27 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 3100 m³) mit Tauchmotorührwerk gefördert werden. Der Pressschneckenseparator kommt in erster Linie über das Winterhalbjahr zum Einsatz, um Gärrestlagerraum einzusparen. Auch im Falle einer zunehmenden Viskosität des Gärrests im Gärrestlager wird ein Teil des Gärrests separiert.

Insgesamt verfügt die Biogasanlage über eine Gasspeicherkapazität von etwa 1400 m³. Gekühlt und entfeuchtet wird das erzeugte Gas mithilfe einer Gaskühlstrecke in Verbindung mit einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät. Ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 536 kW wandelt das erzeugte Gas in Strom und Wärme um. Die BHKW-Wärme wird zur Beheizung von Betriebsgebäuden und Gewächshäusern sowie zur Trocknung von Hackschnitzeln und Getreide verwendet.

3.6.9 Pilotanlage 25

Die in Mittelfranken nahe der Stadt Ansbach gelegene Biogasanlage wurde von der Firma LIPP geplant und zu einem Großteil auch errichtet. Sie ist in einen tierhaltenden Marktfruchtbetrieb integriert und speist seit dem Jahr 2006 Strom in das Netz ein. Die Biogasanlage wurde ursprünglich für die Vergärung von Getreideschrot konzipiert und ist dementsprechend mit einem Ligavator zur Flüssigsilierung von Getreidebrei ausgestattet. Mit dem Anstieg der Getreidepreise wurde die Stromerzeugung aus Getreide unrentabel, weshalb auf andere nachwachsende Rohstoffe umgestellt wurde. Der Ligavator (Lagervolumen: ca. 500 m³) steht daher momentan noch leer, soll aber künftig für die Silierung von Zuckerrübenbrei verwendet werden.

Anders als bei den übrigen neuen Pilotbetrieben ist Betrieb 25 räumlich nicht vollständig konzentriert. Wie im Lageplan zu erkennen (Abbildung 19), wurde die Biogasanlage an der Hofstelle errichtet, während der größte Teil der Fahrsilos und zwei Gärrestlager außerhalb der Ortschaft in etwa 500 m Entfernung vom Hof angelegt wurden.

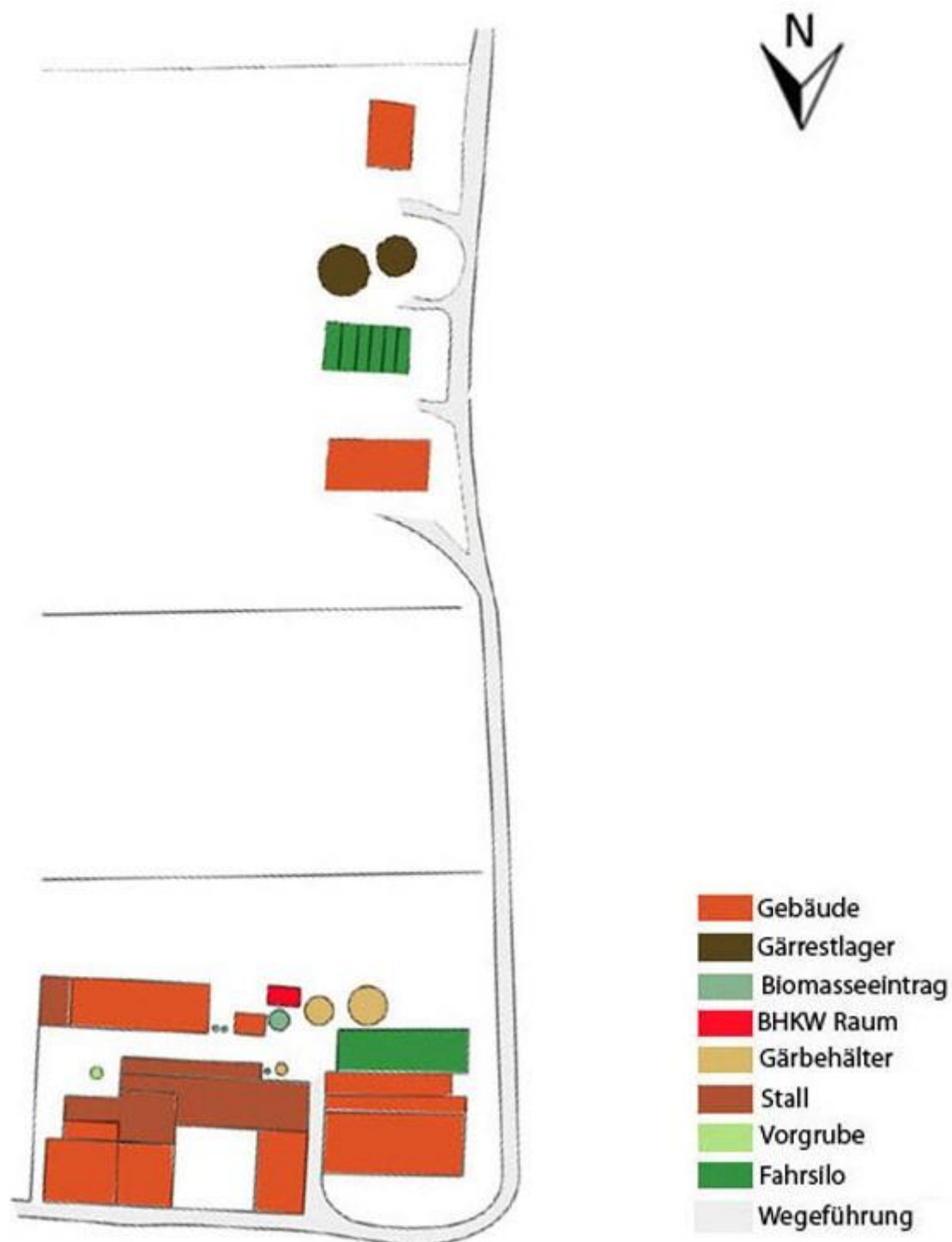


Abbildung 19: Lageplan des Pilotbetriebs #25

Typisch für Anlagen dieses Herstellers ist die dem Fermenter vorgeschaltete, beheizte Hydrolysegrube (Maße: 6 m x 4 m; Arbeitsvolumen: ca. 90 m³), die dem Zweck der Versäuerung der eingesetzten Substrate dient (Abbildung 20). Dieser Behälter ist mit Betondecke voll wärmegeämmt ausgeführt und wird mithilfe einer Kombination aus Wand- und Bodenheizung auf einer Prozesstemperatur von etwa 32 °C gehalten.

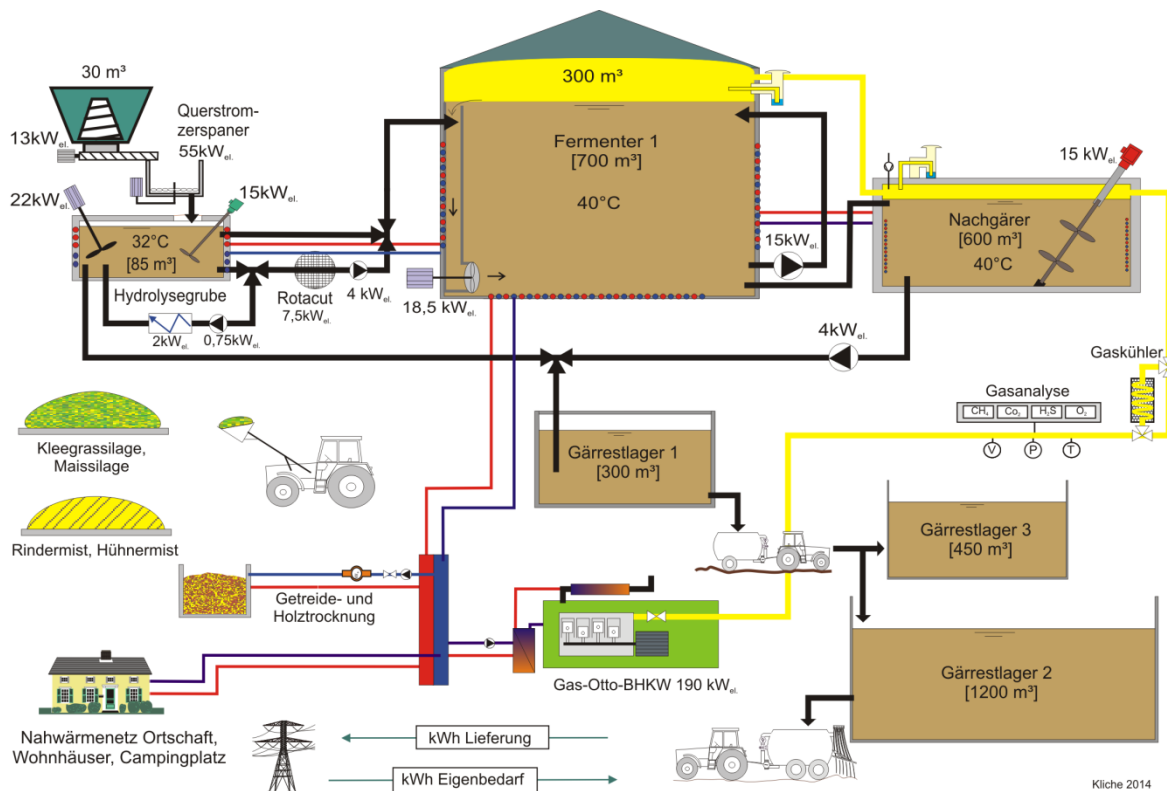


Abbildung 20: Fließbild der Pilotanlage #25

Ein 30 m³ fassender, runder Edelstahlbehälter mit Austragsflügel beschickt in regelmäßigen Abständen einen Querstromzerspanner, der mithilfe einer in einem Stahlbehälter rotierenden Stahlkette nach dem Prinzip eines Mörsers das Material zerfasert und damit die Größe der Substratpartikel deutlich verringert. Die in der Anlage eingesetzten und bisher in einer Miete gelagerten Zuckerrüben werden vor der Einbringung in den Feststoffvorlagebehälter mithilfe eines Rübenschnitzers grob zerkleinert. Der Querstromzerspanner gibt die aufbereiteten Feststoffe an eine Stopfschnecke weiter, die das Material in die Hydrolysegrube einträgt. Rindergülle wird aus der Vorgrube mithilfe einer Kreiselpumpe in die Hydrolysegrube gefördert. Eine Exzentrerschneckenpumpe dosiert zusätzlich aktives Gärmaterial aus dem Nachgärer hinzu. In dem Hydrolysebehälter werden die festen Einsatzstoffe dann mit der Rindergülle und dem Rezirkulat aus dem Nachgärer mithilfe zweier leistungsstarker Stabmixer vermengt. Es kommt zu einer Versauerung des Materials, wodurch der pH-Wert des Gemisches sinkt. Die Hydrolyse läuft in dem überfahrbaren Behälter weitgehend anaerob ab, wobei das entstehende Hydrolysegas nicht dem gasführenden System der Biogasanlage zugeführt wird, sondern über eine Öffnung in die Umgebung entweichen kann. Über eine Bypassleitung mit Exzentrerschneckenpumpe kann Hydrolysat entnommen, durch eine Ultraschall-desintegration weiter aufbereitet und anschließend wieder in die Hydrolysegrube zurück gefördert werden.

Eine weitere Exzentrerschneckenpumpe entnimmt Hydrolysat über einen saugseitig installiert Lochscheiben-Nasszerkleinerer aus der Hydrolysegrube und dosiert dieses in den Fermenter. Der nach dänischer Bauweise (Behälterhöhe = Behälterdurchmesser) gebaute, stehende Edelstahlfermenter (Maße: 10 m x 10 m; Arbeitsvolumen: ca. 700 m³) ist mit einem Edelstahldach versehen, unter welchem sich ein Gasspeichersack befindet (Lagervolumen: ca. 300 m³). Der voll wärmegeämmte Behälter wird mittels einer Kombination aus Wand- und Bodenheizung mit Kunststoffrohren auf einer Prozesstemperatur von durchschnittlich 40 °C gehalten. Durchrührt wird der Fermenter mithilfe einer Kombinati-

on aus einem Propellerrührwerk, welches am Boden des Behälters installiert ist, und einer Zirkulationspumpe mit Schneidmessern, die kontinuierlich Substrat unten aus dem Behälter entnimmt und auf die Oberfläche des Gärgemisches verteilt. Die Rührtechnik wurde in dieser Anlage sehr knapp dimensioniert, weil die Anlage ursprünglich für die Vergärung von Getreidebrei ausgelegt wurde. Daher kam es immer wieder zur Bildung einer Schwimmschicht im Fermenter. Zur Lösung des Problems wurden nachträglich der Querstromzerspaner sowie der Lochscheiben-Nasszerkleinerer installiert, um die Größe der Substratpartikel deutlich zu reduzieren und damit den Aufwand für das Durchmischen des Behälters zu senken.

Dem Fermenter ist ein kleinerer Nachgärer (Maße: 12 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 600 m³) nachgeschaltet. Der mit Betondecke ausgeführte und voll wärmegeämmte Behälter wird mithilfe einer Edelstahl-Wandheizung auf einer Gärtemperatur von ebenfalls etwa 40 °C gehalten. Über einen passiven Überlauf gelangt Gärgemisch aus dem Fermenter in den Nachgärer. Ein Stabmixer mit zwei Rührpropellern hält das Gärgemisch in Bewegung und sorgt so für eine ausreichende Durchmischung des Behälters.

Der Gärrest wird mithilfe der gleichen Exzentrerschneckenpumpe, mit der Rezirkulat vom Nachgärer in die Hydrolyse gepumpt wird, vom Nachgärer in das erste Gärrestlager (Maße: 10 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 300 m³) gefördert. Das erste Gärrestlager ist überfahrbar mit Betondecke, aber nicht gasdicht ausgeführt. Wenn das erste Gärrestlager voll ist, wird es mithilfe eines Zapfwellenrührwerks von einem Schlepper aufgerührt und der Gärrest mit einem Pumptankwagen zu zwei weiteren im Außenbereich gelegenen Gärrestlagern transportiert. Gärrestlager II (Maße: 20 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 1200 m³) und Gärrestlager III (Maße: 12 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 450 m³) sind nicht mit einer Betondecke versehen, sondern nach oben hin offen.

Das in der Anlage erzeugte Biogas wird in einem Gasregister im Boden gekühlt und weitgehend entfeuchtet. Ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 190 kW wandelt das Gas zu Strom und Wärme um. Die BHKW-Wärme wird außer für die Beheizung der Gärbehälter in einem großen Nahwärmenetz verwertet, an das Ferienhäuser, Wohnhäuser und ein Campingplatz angeschlossen sind. Um auch im Winter eine ausreichende Wärmemenge für das Nahwärmenetz zur Verfügung stellen zu können, ist zusätzlich ein Hackschnitzelheizkessel in das System integriert.

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

Für die Energiebereitstellung aus der gesamten Biogaskette wurde mit dem ‚THG-Rechner Biogas‘ (EFFENBERGER *et al.*, 2014) eine Bilanz der Treibhausgas (THG)-Emissionen und des kumulierten (fossilen) Energieverbrauchs (KEV) erstellt. 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, im Gegenzug erfolgte auch keine Gutschrift für die vermiedenen CO₂-Äq.-Emissionen während der konventionellen offenen Lagerung der tierischen Wirtschaftsdünger. 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 dienten und fossile Energieträger ersetzen. Um im ersten Schritt den horizontalen Anlagenvergleich zu erleichtern, wurden für die Eingangsparameter der Berechnung die in Tabelle 7 zusammengestellten einheitlichen Annahmen getroffen.

Tabelle 7: Einheitliche Annahmen für die Berechnung der THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas für die 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
Gärrestaustauschtechnik auf Acker-/Grünland	entsprechend der Praxis in D
Regelmäßige Anlagenbegehung?	Nein ⇒ + 0,3 % Leckagerate
Zündöl für BHKW (soweit zutreffend)	Rapsöl
Netzverlust nach Einspeisung	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

Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse wurde zweigeteilt. Im ersten Teil werden die Messergebnisse und Beobachtungen für jede Pilotanlage einzeln dargestellt und interpretiert. Im zweiten Teil werden alle hier vorgestellten Pilotanlagen anhand wichtiger Kenngrößen miteinander verglichen, um daraus Schlussfolgerungen für die Konzeptionierung, den Betrieb und die Optimierung von Biogasanlagen zu ziehen.

4.1 Einzelbetrachtung der Pilotanlagen

Die Einzelbetrachtung der Pilotanlagen beginnt jeweils mit der Auswahl der Einsatzstoffe, gefolgt von der Bewertung der Prozessbiologie und der Auswertung wesentlicher Leistungsparameter. 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 Tabelle 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 betrachtet, das größer als 2 sein sollte. Dieser Parameter hat jedoch eine eingeschränkte Aussagekraft.

Tabelle 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.

4.1.1 Pilotanlage 8

Dieser Betrieb gehörte bereits zur ersten Auswahl der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion und wurde von 2006 bis 2010 begleitet. Ende 2013 wurde das Monitoring auf diesem Betrieb wieder aufgenommen, da die Anlage messtechnisch gut ausgestattet ist und ein gut entwickeltes Wärmenutzungskonzept aufweist, das auch in Zukunft noch weiter ausgebaut werden soll. Es handelt sich hier um eine typische „NAWARO-Biogasanlage“ (Abbildung 21). Die Zusammenarbeit mit den sehr erfahrenen Betreibern gestaltete sich stets problemlos.

4.1.1.1 Einsatzstoffe

Maissilage hatte in Anlage 8 praktisch durchgängig einen Masseanteil an der gesamten eingetragenen Frischmasse von 70 % oder mehr (Abbildung 22). Um den TS-Gehalt in den Gärbehältern zu limitieren, wurde diesen in unregelmäßigen Abständen Wasser zugeführt (in 2014 insgesamt ca. 460 m³). Corn-Cob-Mix (CCM) wurde nur in den Monaten November und Dezember eingesetzt und konnte nur einmal beprobt werden. Die eingesetzten geringen Mengen an Bullengülle wurden von der Hofstelle zur Biogasanlage transportiert und unmittelbar in die Vorgrube eingebracht. Da die Gülle in der Vorgrube mit Sickersäften und Wasser vermengt wurde, war es nicht möglich repräsentative Proben für eine Laboranalyse zu entnehmen, so dass Literaturwerte verwendet werden mussten.

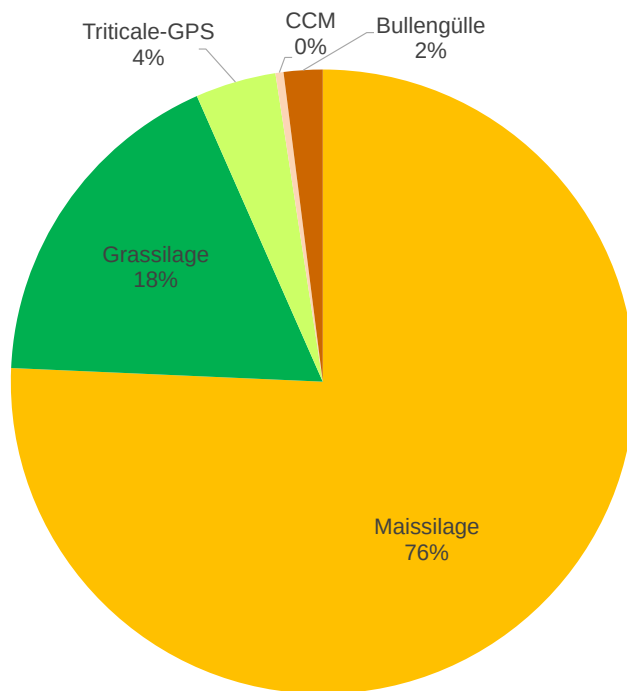


Abbildung 21: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #8 im Jahresmittel 2014

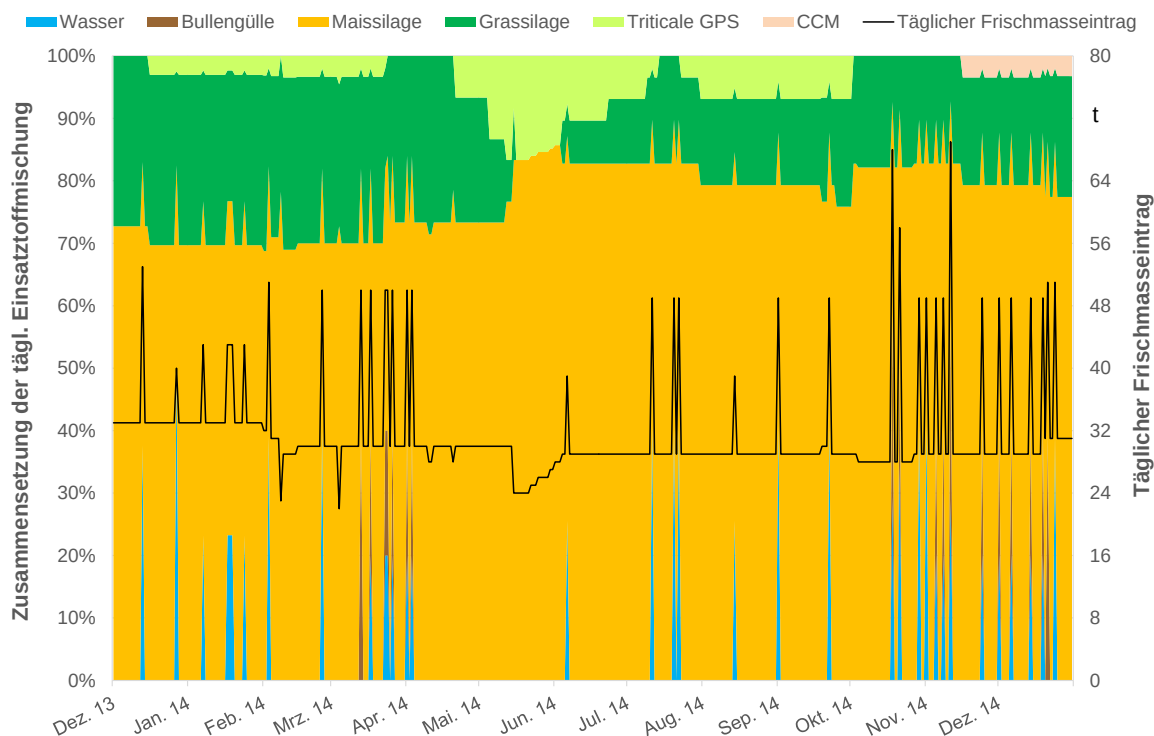


Abbildung 22: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #8 (tägliche Auflösung)

4.1.1.2 Prozessparameter

Die Gärbiologie der Pilotanlage 8 erwies sich als sehr stabil, was die durchwegs niedrigen Fettsäurewerte in den Proben aus den Gärbehältern verdeutlichen. Die Gesamtessigsäureäquivalente in Proben aus den Hauptgärbehältern lagen im gesamten Auswertungszeitraum mit wenigen Ausnahmen unter 200 mg L^{-1} . Propionsäure konnte lediglich in neun Proben aus den Hauptgärbehältern nachgewiesen werden, die Konzentration lag aber unter der verwendeten Bestimmungsgrenze von 50 mg L^{-1} . Auch der FOS/TAC lag mit Werten um 0,2 auf einem unkritischen Niveau (Abbildung 23). Die Essigsäureäquivalente im Nachgärbehälter waren erwartungsgemäß noch geringer, der FOS/TAC-Wert lag ebenso meist bei 0,2 oder darunter (Abbildung 24). Im Juli und September konnten keine Proben aus den Gärbehältern der Anlage gewonnen werden.

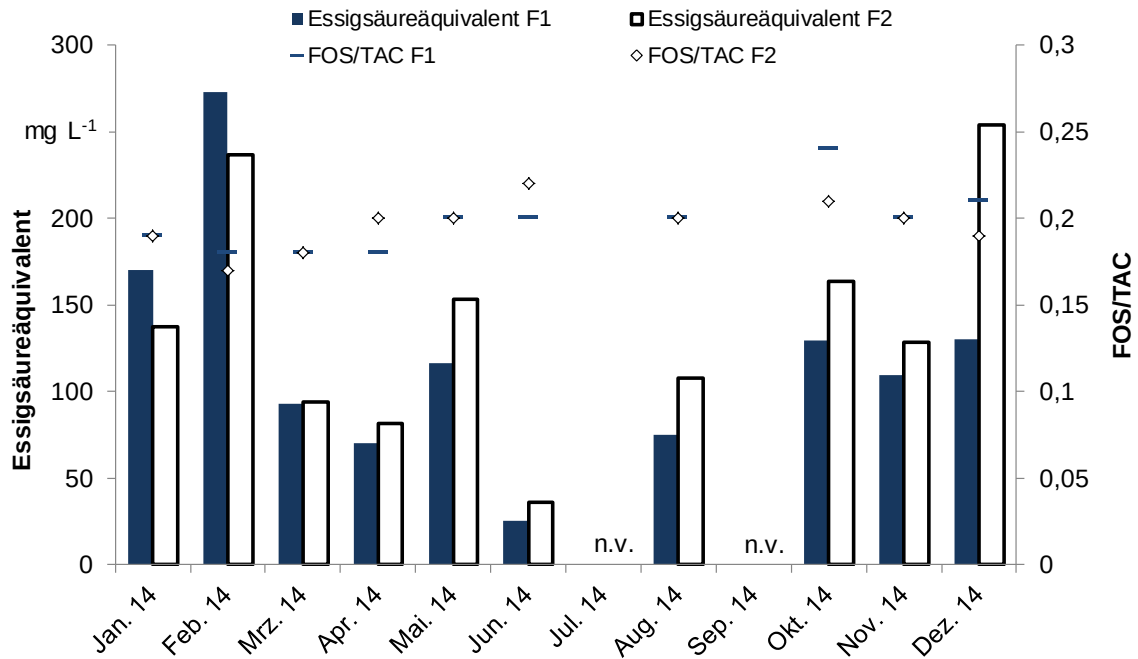


Abbildung 23: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 1 und Fermenter 2 von Pilotanlage #8

Während die Prozessindikatoren eine geringe Belastung der Gärbiologie anzeigten, war das Niveau der oTS-Raumbelastung der Hauptfermenter mit ca. $5 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ im Jahresdurchschnitt keineswegs niedrig. Die geringe Variabilität der Einsatzstoffmischung, eine hohe Rezirkulationsrate und sicherlich auch die langjährigen Erfahrungswerte der Betreiber sind hier begünstigende Faktoren. Hinzu kommen die sehr geringen Schwankungen in der Prozesstemperatur (Abbildung 25). Der Anstieg der Gärtemperatur im Nachgärer 2 ab April beruht auf dem Anstieg der Außentemperatur während der Sommermonate. Damit erhöhte sich die Prozesstemperatur über den Sommer auf über 35 °C . Im Jahresmittel lag die Gärtemperatur von Nachgärer 2 bei $31,6 \text{ °C}$.

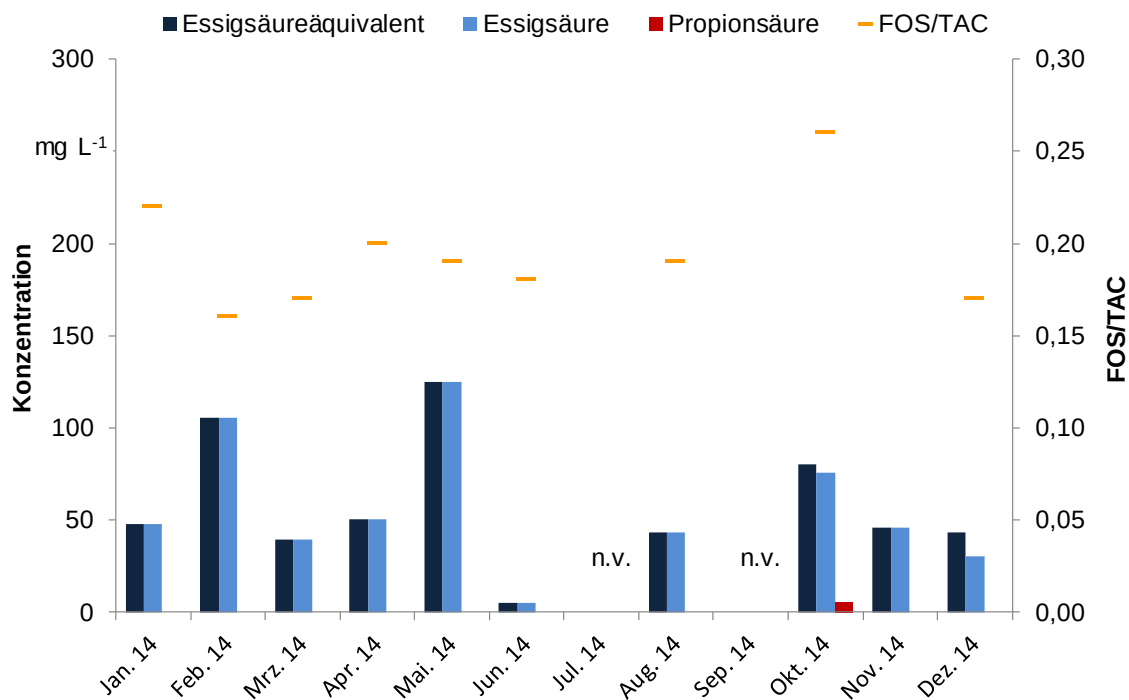


Abbildung 24: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Nachgärer 1 von Pilotanlage #8

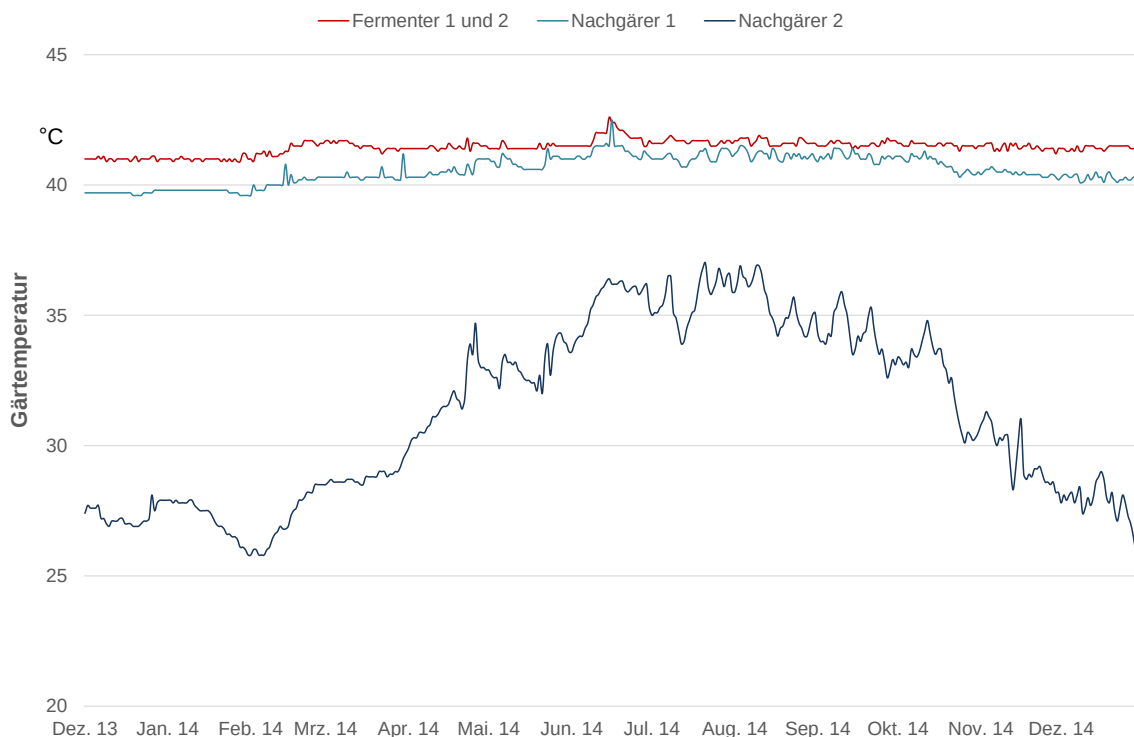


Abbildung 25: Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern und Nachgärern der Pilotanlage #8

4.1.1.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 8 verfügt über drei BHKW mit Gas-Otto-Motoren. Zu Beginn der Beobachtungsperiode waren zwei Motoren mit einer elektrischen Nennleistung von 250 kW und ein Motor mit $P_{el} = 190$ kW in Betrieb. Der 190 kW Motor wurde Mitte 2014 gegen einen weiteren Motor mit $P_{el} = 250$ kW getauscht, so dass sich die gesamte installierte elektrische Leistung auf 750 kW erhöhte. Die deutlich geringere BHKW-Leistung im Mai ist auf die Stillstandszeit aufgrund des Motortausches zurückzuführen. Während des Einfahrens des neuen Motors pendelte sich die gesamte elektrische Leistung auf einem Niveau von ca. 700 kW ein, bevor diese ab November in Richtung Volllast gesteigert wurde (Abbildung 26).

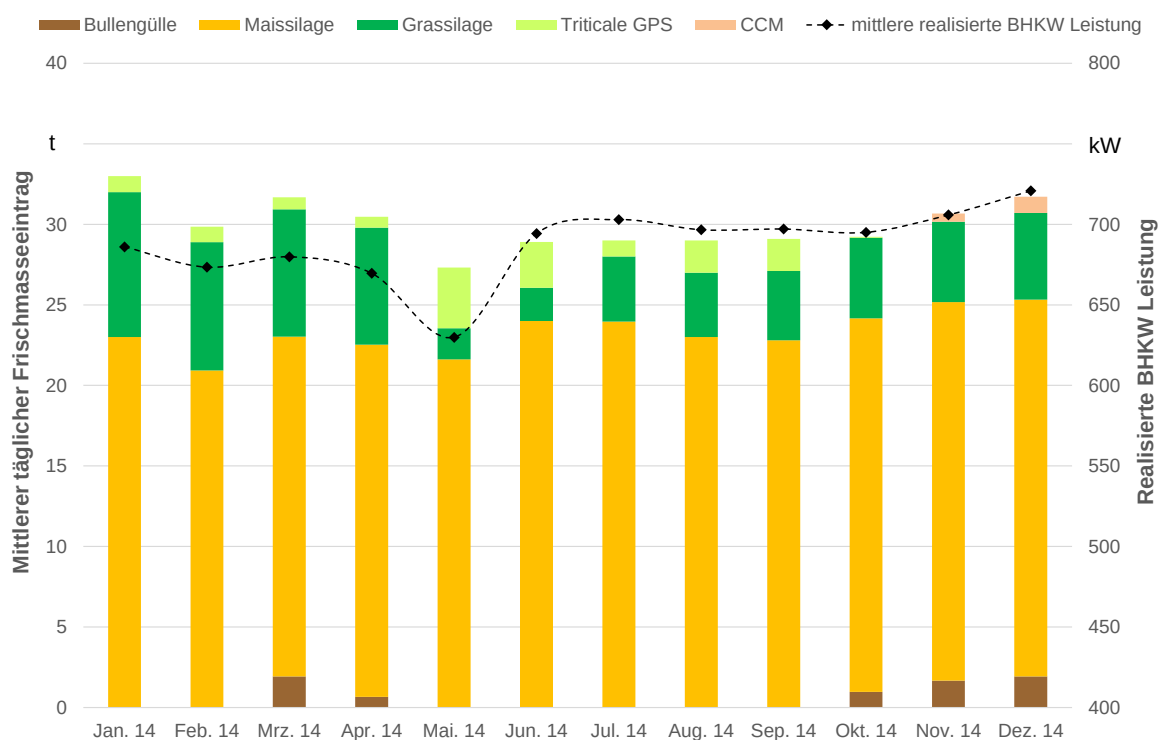


Abbildung 26: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #8

Die mittlere Laufzeit der BHKW im Jahr 2014 betrug 8651 Betriebsstunden, das entspricht im Mittel einer Verfügbarkeit von 98,8 % oder 23,7 Stunden Laufzeit pro Tag. Da erst gegen Mitte des Jahres eine Gasdurchflussmessung installiert wurde, konnte der elektrische Nutzungsgrad der BHKW nur über einen Zeitraum von fünf Monaten bestimmt werden. Im Mittel errechnete sich ein Wert von ca. 37 %. Die durchschnittliche elektrische Leistung der BHKW über das Jahr 2014 betrug 688 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurden die BHKW (2 x 250 kW und 1 x 190 kW) von Januar bis Mai bei einer mittleren elektrischen Gesamtleistung von 685 kW betrieben, das entspricht einer Arbeitsausnutzung von 99,2 %. Nach dem Tausch des zweiten Motors wurden die BHKW im Zeitraum von Juni bis Dezember bei einer mittleren elektrischen Gesamtleistung von 705 kW betrieben, was einer Arbeitsausnutzung von 93,9 % entspricht. Nachfolgend erfolgt die Einzelbetrachtung der Blockheizkraftwerke.

Im Jahr 2014 betrug die Laufzeit des BHKW 1 mit einer installierten elektrischen Leistung von 250 kW insgesamt 8670 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit von 99,0 %, einer mittleren elektrischen Leistung von 242 kW oder einer mittleren Laufzeit

von 23,8 Stunden pro Tag. Der elektrische Nutzungsgrad errechnete sich zu 37,2 %. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 244,3 kW betrieben, das entspricht einer mittleren Last von 97,7 %. Stillstandszeiten des BHKW 1 gab es im Februar während einer Komplettüberholung des Motors, im April wegen der Akkreditierung für die Flexprämie und im März und Dezember für Wartungsarbeiten (Abbildung 27). Von August bis November wurde die Leistung des BHKW 1 zugunsten des Hochfahrens von BHKW 2 zurückgenommen (vgl. Abbildung 28).

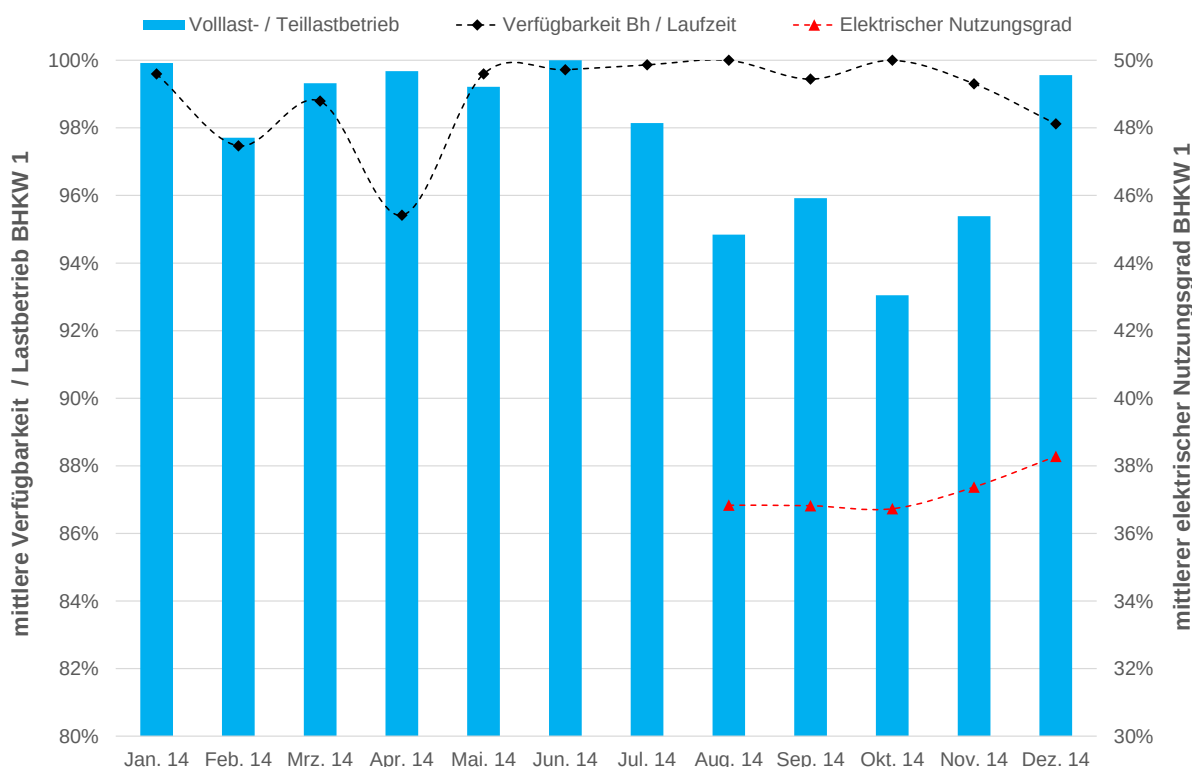


Abbildung 27: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 1 (250 kW) von Pilotanlage #8

BHKW 2 wurde im Mai 2014 nach etwa 80.500 Betriebsstunden gegen einen neuen Gas-Otto-Motor mit einer elektrischen Leistung von 250 kW getauscht (Abbildung 36). In der Summe für beide Motoren betrug die Laufzeit des BHKW 2 insgesamt 8571 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit des BHKW von 97,8 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,5 Stunden pro Tag. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des alten BHKW (Nennleistung = 190 kW) belief sich auf 177 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde es mit einer mittleren elektrischen Leistung von 186 kW betrieben, das entspricht einer mittleren Auslastung von 97,7 %.

Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des neuen BHKW 2 (Nennleistung = 250 kW) belief sich auf 224 kW, das entspricht einer Arbeitsausnutzung von 89,5 %. Der neue Motor wurde zum Einfahren zunächst nur mit 80 % Last betrieben, die Last wurde dann bis Dezember auf 100 % gesteigert. Im gesamten Zeitraum von Juni bis Dezember 2014 erzielte das neue BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 37,2 %.

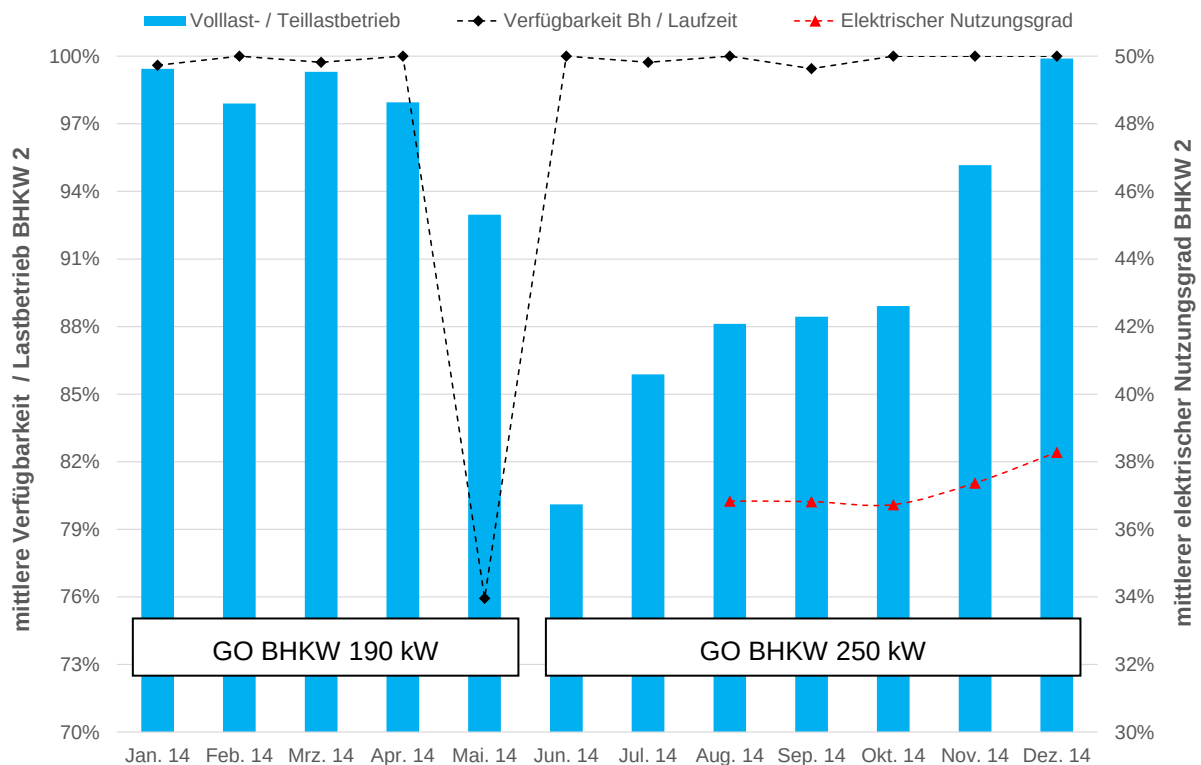


Abbildung 28: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 2 (190/250 kW) von Pilotanlage #8

BHKW 3 war im Beobachtungszeitraum insgesamt 8711 Stunden in Betrieb, das entspricht einer Verfügbarkeit von 99,4 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,9 Stunden pro Tag. Das BHKW erzielte im Mittel einen elektrischen Nutzungsgrad von 36,4 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW über die Standzeit eines Jahres errechnet sich zu 242 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 243 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 97,3 %. Stillstandszeiten ergaben sich im Juni durch Wartungs-/Reparaturarbeiten, im Dezember durch Wartungsarbeiten mit Reinigung der Wärmetauscher (Abbildung 29). Ab Juli wurde die Leistung des BHKW 3 zugunsten des Hochfahrens des neuen Motors (BHKW 2) reduziert.

Der Strombedarf der Pilotanlage 8 war in den Wintermonaten deutlich höher als in der warmen Jahreszeit (Abbildung 30). Gründe hierfür sind das Rühren des Gärrestlagers sowie der Volllastbetrieb der Heizkreispumpen der vier Gärbehälter. Während das Gärrestlager in den Sommermonaten weitgehend leer bleibt und dementsprechend auch selten gerührt werden muss, wird es über die Wintermonate gefüllt und entsprechend in regelmäßigen zeitlichen Abständen gerührt. Mit dem Beginn der Gärrestaubsbringung auf die Felder im März sank der Strombedarf für das Rühren des Gärrestlagers wieder.

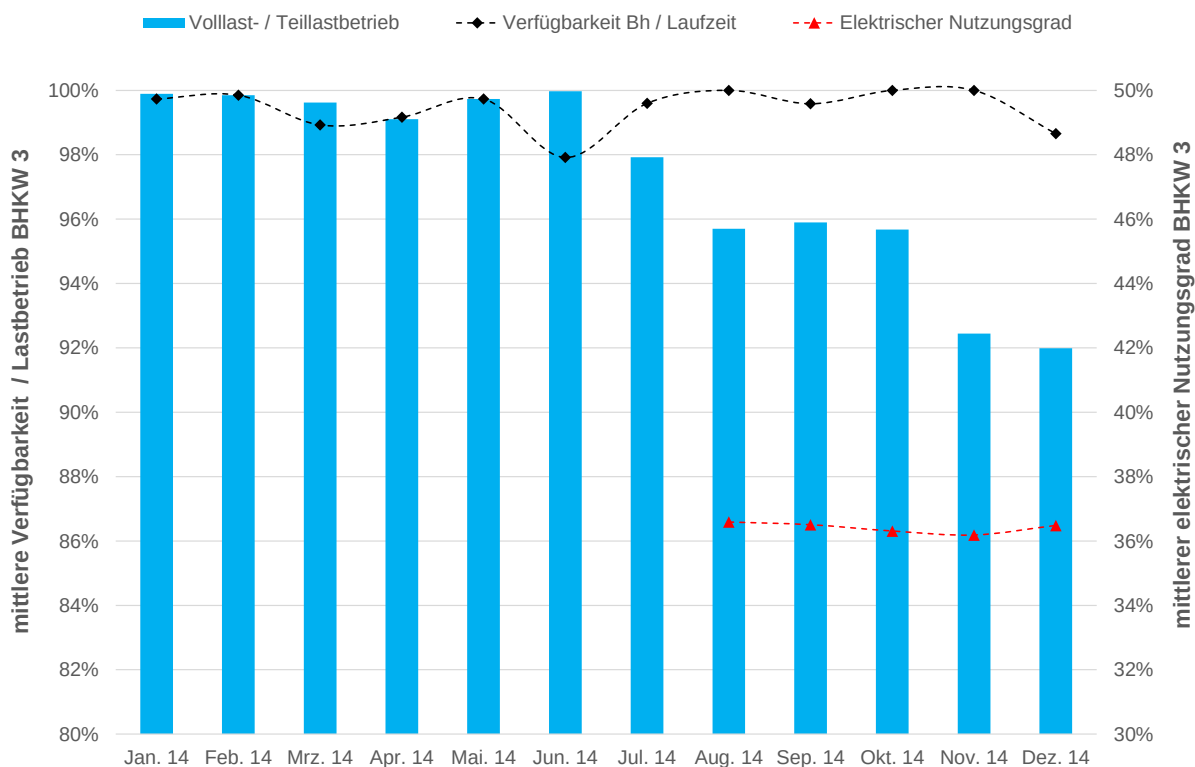


Abbildung 29: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 3 (250 kW) von Pilotanlage #8

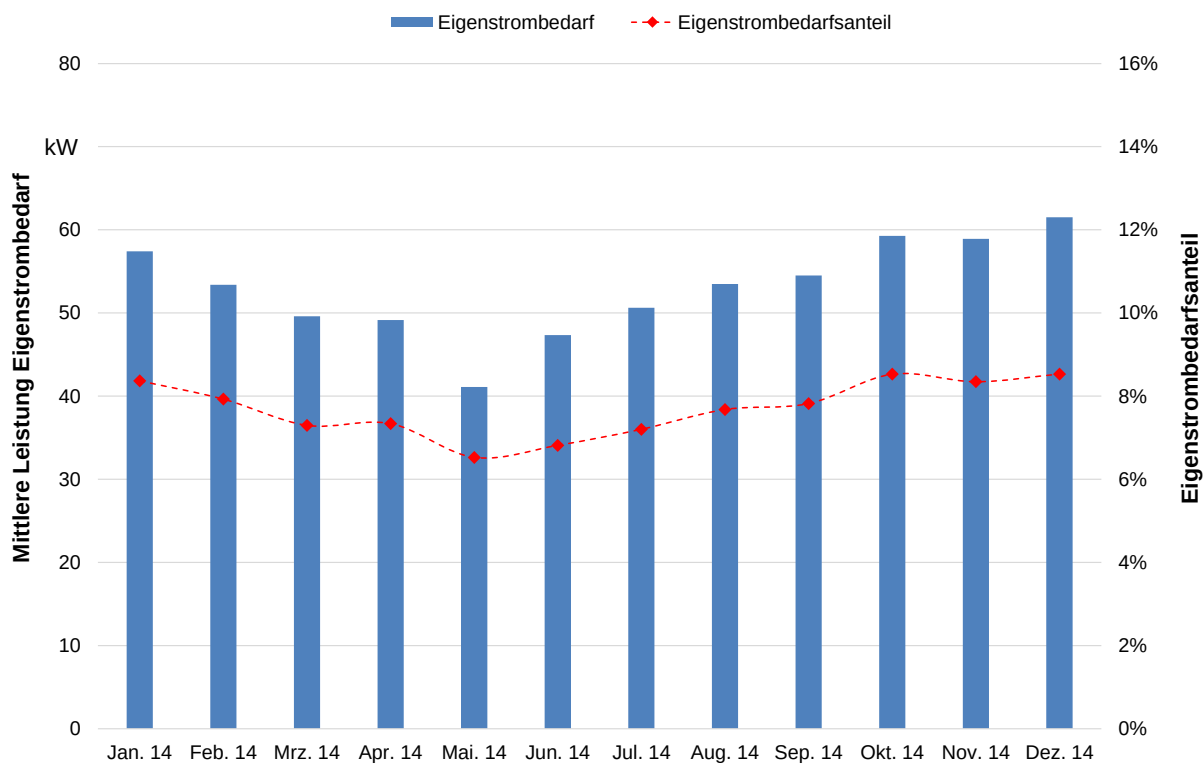


Abbildung 30: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #8

Pilotbetrieb 8 realisierte über das gesamte Jahr hinweg einen sehr hohen externen Absatz der BHKW-Wärme von insgesamt 81,2 %, das entspricht im Jahresdurchschnitt einer täglich genutzten Wärmemenge von 14.440 kWh. Größte Wärmeabnehmer im Winter stellen ein nahegelegenes Altenheim sowie ein Nahwärmenetz mit Anschluss mehrerer Wohnhäuser dar, während im Sommer sehr große Wärmemengen für die Trocknung von Holz eines nahegelegenen Holzvermarkters genutzt werden. Im Jahresmittel wurden 22 % der abgesetzten Wärmemenge für die Beheizung des Altenheims sowie der Mehrfamilienhäuser und 78 % für die Holztrocknung verwendet.

Die Wärmemengen für die Beheizung der Gärbehälter wurden entsprechend der monatlich eingetragenen Frischmasse sowie der Bauform der Gärbehälter und des realisierten Prozessstemperaturniveaus errechnet. Der dabei ermittelte Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 8 lag im Jahresdurchschnitt bei 14,7 %.

Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $86,9 \text{ kWh t}^{-1}$. Der relativ hohe Wert wird dadurch begründet, dass in regelmäßigen Abständen Wasser zur Verdünnung des Gärgemisches in die Fermenter eingetragen wurde (vgl. Abbildung 22), diese aber bei der Berechnung des spezifischen Eigenwärmebedarfs nicht berücksichtigt wurden.

4.1.2 Pilotanlage 10

Auch dieser Betrieb gehörte bereits zur ersten Auswahl der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion und wurde bereits im Zeitraum von 2006 bis 2010 begleitet. Ende 2013 wurde das Monitoring auf diesem Betrieb wieder aufgenommen, da die Anlage messtechnisch gut ausgestattet ist und ein gut entwickeltes Wärmenutzungskonzept aufweist. Es handelt sich hier um eine landwirtschaftliche Kofermentationsanlage auf einem Schweinemastbetrieb.

4.1.2.1 Einsatzstoffe

Auch in diesem Betrieb ist Maissilage der Haupteinsatzstoff, dominiert mengenmäßig allerdings deutlich weniger als in Betrieb 8 (Abbildung 31). Getreide - Ganzpflanzensilage und Grassilage wurden je nach saisonaler Verfügbarkeit meist alternativ eingesetzt. Zum Ausgleich von Gasproduktionsschwankungen oder Gasmangel besonders in den Wintermonaten wurden größere Mengen an energiereichem Getreideschrot und CCM eingesetzt. Insgesamt zeigte sich ein etwas unruhiger Verlauf der Einsatzstoffmischung und der Gesamteintragsmasse (Abbildung 32), welcher unter anderem auf Unregelmäßigkeiten in der Anlieferung von Gülle eines benachbarten Betriebes zurückzuführen ist.

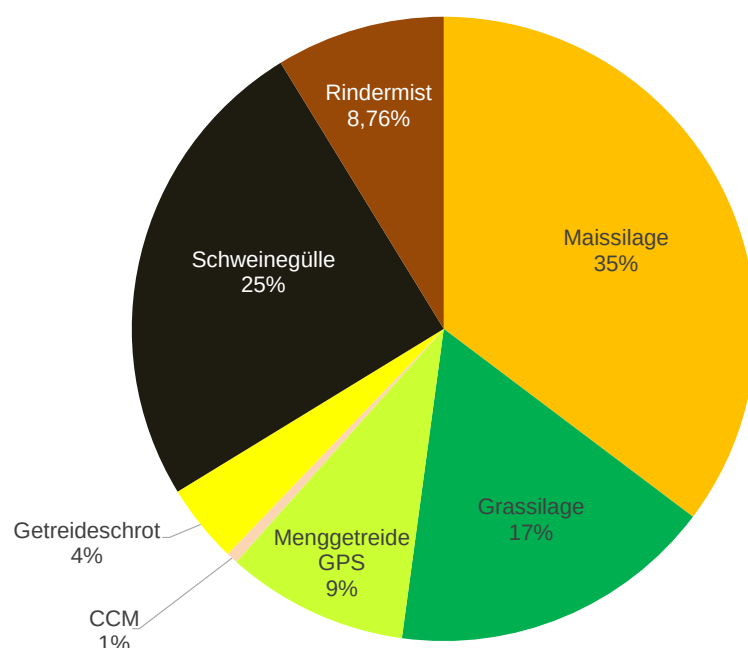


Abbildung 31: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #10 im Jahresmittel 2014

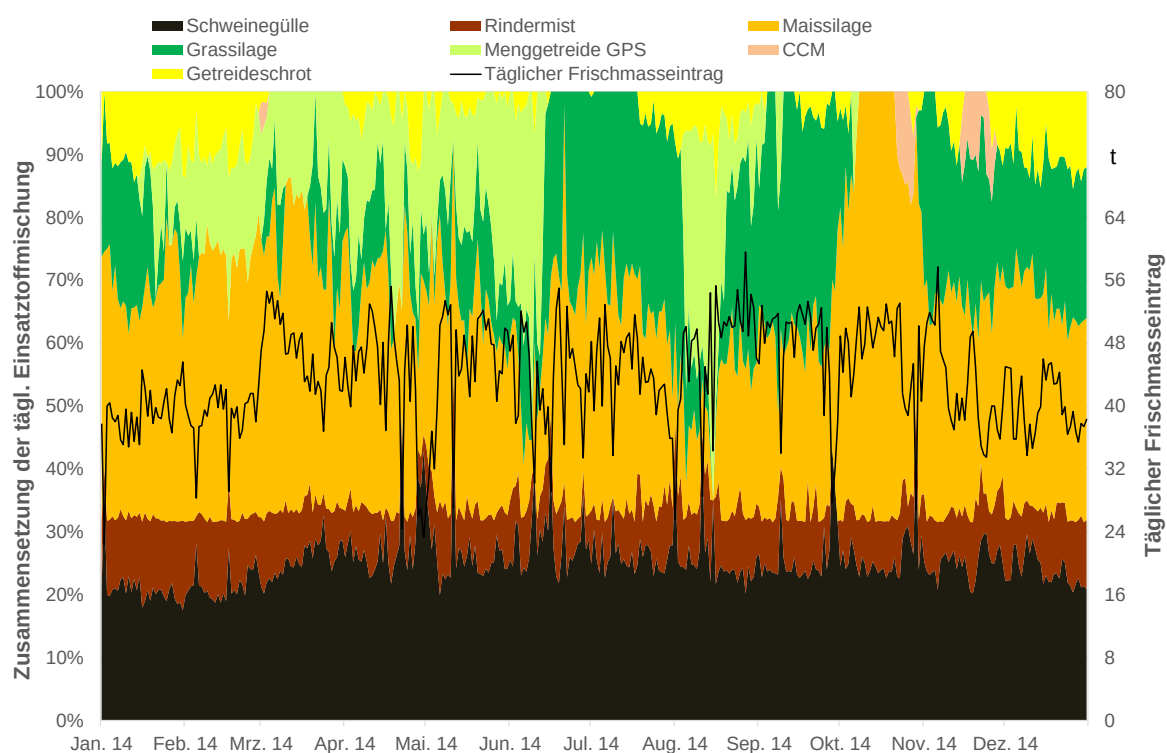


Abbildung 32: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #10 (tägliche Auflösung)

4.1.2.2 Prozessparameter

Niveau und Verlauf der hier betrachteten gängigen Prozessindikatoren waren in den beiden Hauptfermentern zwar deutlich unterschiedlich, wiesen aber auf keine Destabilisierung des Abbauprozesses hin. Die Konzentration flüchtiger Fettsäuren war mit einem Mittelwert von ca. 1600 mg L⁻¹ in Proben aus Fermenter 1 deutlich höher als der entsprechende Mittelwert von etwas über 500 mg L⁻¹ in Proben aus Fermenter 2. Auch der FOS/TAC lag in Fermenter 1 um etwa 0,1 höher (vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34).

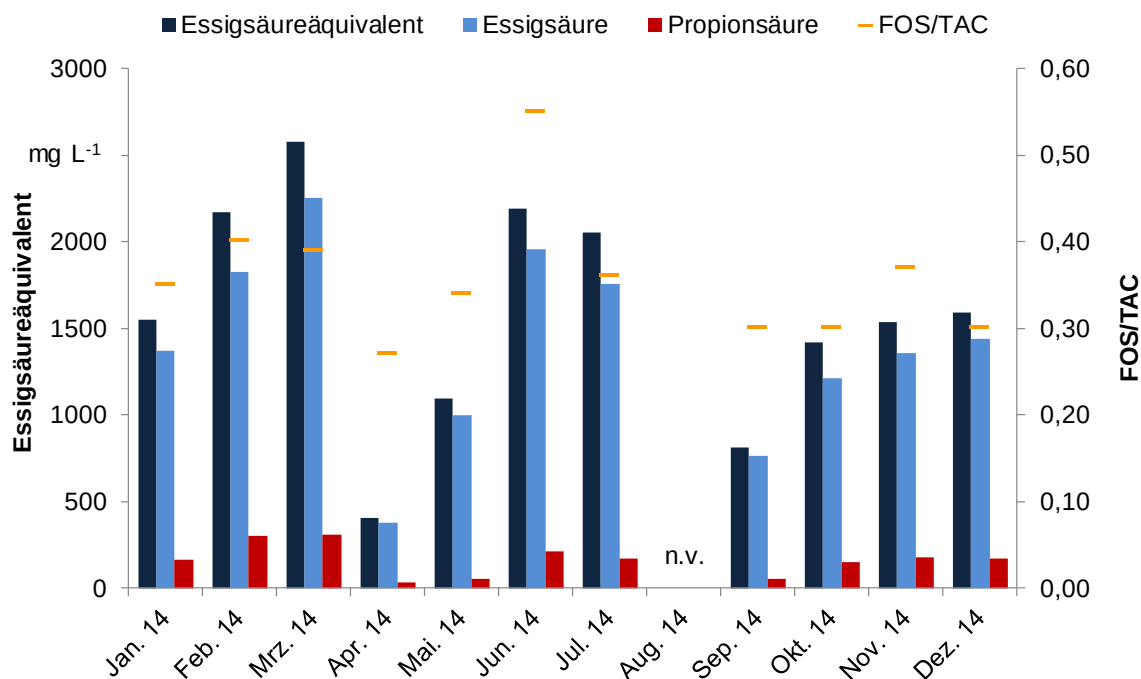


Abbildung 33: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 1 von Pilotanlage #10 (n.v. = keine Probe verfügbar)

Die oTS-Raumbelastung der ersten Stufe lag im Jahresmittel bei 4,5 kg (m³ d)⁻¹, die Gesamt-Raumbelastung des Fermentersystems bei 3,3 kg (m³ d)⁻¹. Die hydraulische Verweilzeit der ersten Stufe errechnete sich im Jahresmittel zu 51 Tagen, für das gesamte Fermentersystem (d. h. zuzüglich des Nachgärers) zu 71 Tagen. Dieser vergleichsweise geringe Wert relativiert sich angesichts der Tatsache, dass die Anlage über zwei je 2700 m³ fassende Gärrestlager mit Gaserfassung verfügt.

In Abbildung 35 sind die Monatsmittelwerte der in den Gärbehältern gemessenen Temperaturen dargestellt. Fermenter 1 wurde von Januar bis April auf thermophiles Niveau aufgeheizt, welches in etwa dem von Fermenter 2 entsprach. Während dieses Aufheizens stieg die Konzentration flüchtiger Fettsäuren in Proben aus Fermenter 1 vorübergehend an. Im Sommer konnte auch der Nachgärbehälter auf knapp 50 °C erwärmt werden, nachdem in diesem Behälter im Zuge einer Revision einige Heizkreise nachgerüstet wurden.

Der Temperaturmittelwert von Fermenter 1 lag bei 46,9 °C (39,5 bis 53 °C), der von Fermenter 2 bei 47,4 °C (33,5 bis 50,5 °C). Die Variabilität der Gärtemperaturen war damit vergleichsweise sehr groß, was die Schwankungen bei den Prozessindikatoren erklären könnte. Der Jahresmittelwert des Nachgärbehälters lag bei 44,4 °C mit einem Maximum von 52,5 °C im November.

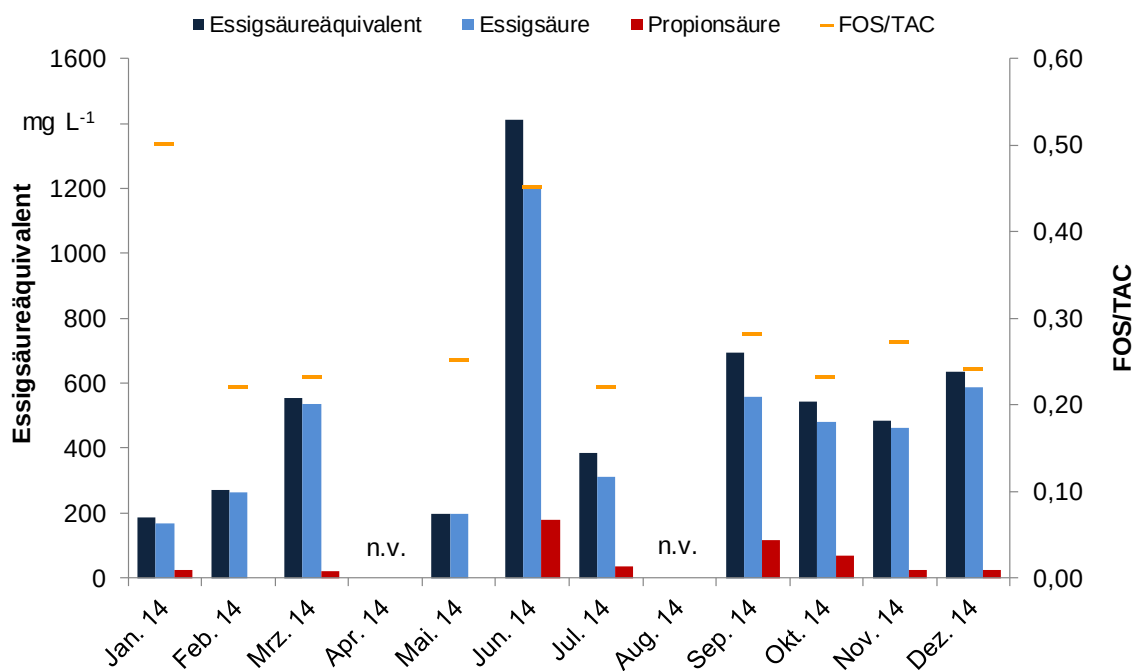


Abbildung 34: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus Fermenter 2 von Pilotanlage #10 (n.v. = keine Probe verfügbar)

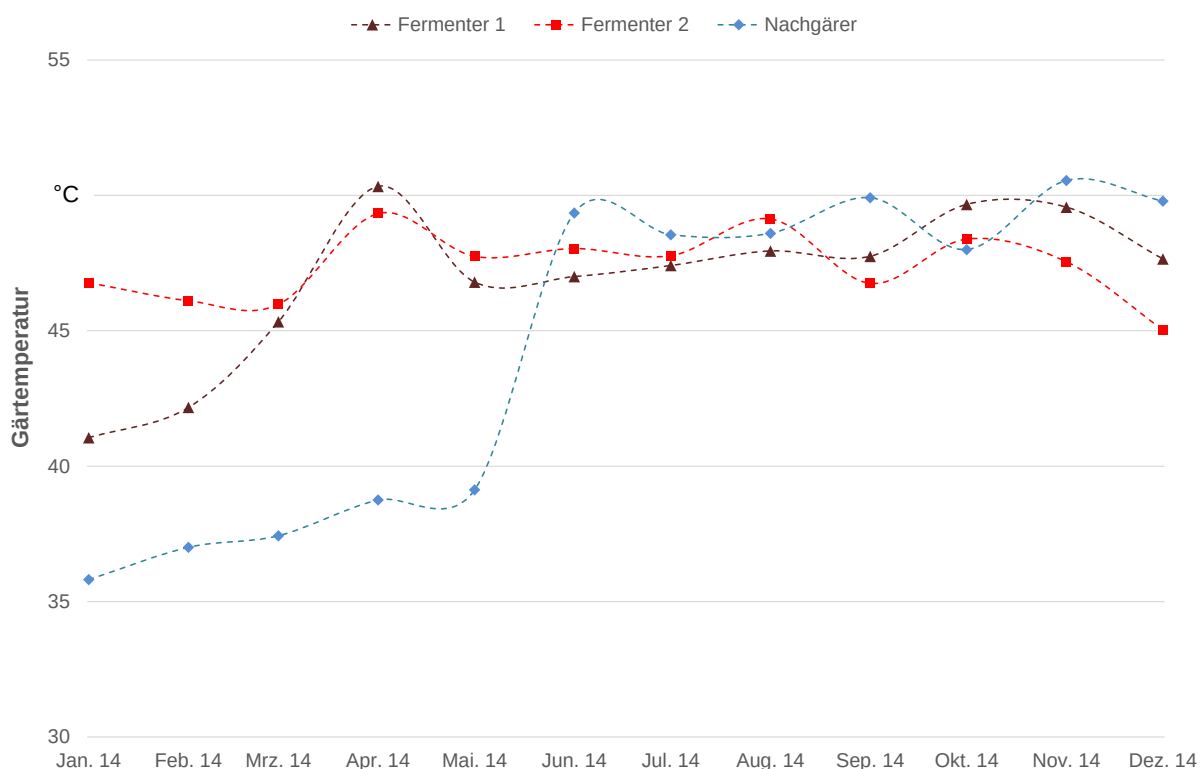


Abbildung 35: Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern 1 und 2 sowie im Nachgärbehälter der Pilotanlage #10

4.1.2.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 10 verfügte zu Beginn des Jahres 2014 über drei Blockheizkraftwerke, davon zwei Gas-Otto-Motoren mit einer elektrischen Nennleistung von 150 kW und 265 kW sowie ein Zündstrahl-Motor mit einer elektrischen Nennleistung von 240 kW. Im Juni 2014 wurde ein weiteres Zündstrahl-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 265 kW an der Anlage errichtet. Ziel der Installation eines weiteren BHKW war die Flexibilisierung der Anlage im Sinne der bedarfsgerechten Stromproduktion im Intervallbetrieb. Nachfolgend erfolgt die Einzelbetrachtung der Blockheizkraftwerke.

Das mit knapp 70.000 Betriebsstunden zu Beginn des Jahres 2014 älteste BHKW des Pilotbetriebs 10 war über das Jahr hinweg insgesamt 8313 Stunden in Betrieb. Dies entspricht einer Verfügbarkeit von 94,9 % oder einer mittleren Laufzeit von 22,8 Stunden pro Tag. Im gemessenen Zeitraum erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 32,3 %. Die mittlere realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf die 8760 Stunden des Jahres belief sich auf 194 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 204 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 85 %. Der mittlere Zündölanteil des erzeugten Stroms lag im Jahr 2014 bei 8,2 % auf einem relativ hohen Niveau. Demnach wurden im Mittel ca. 178 kW elektrische Leistung aus Biogas und 16 kW aus Zündöl bereit gestellt.

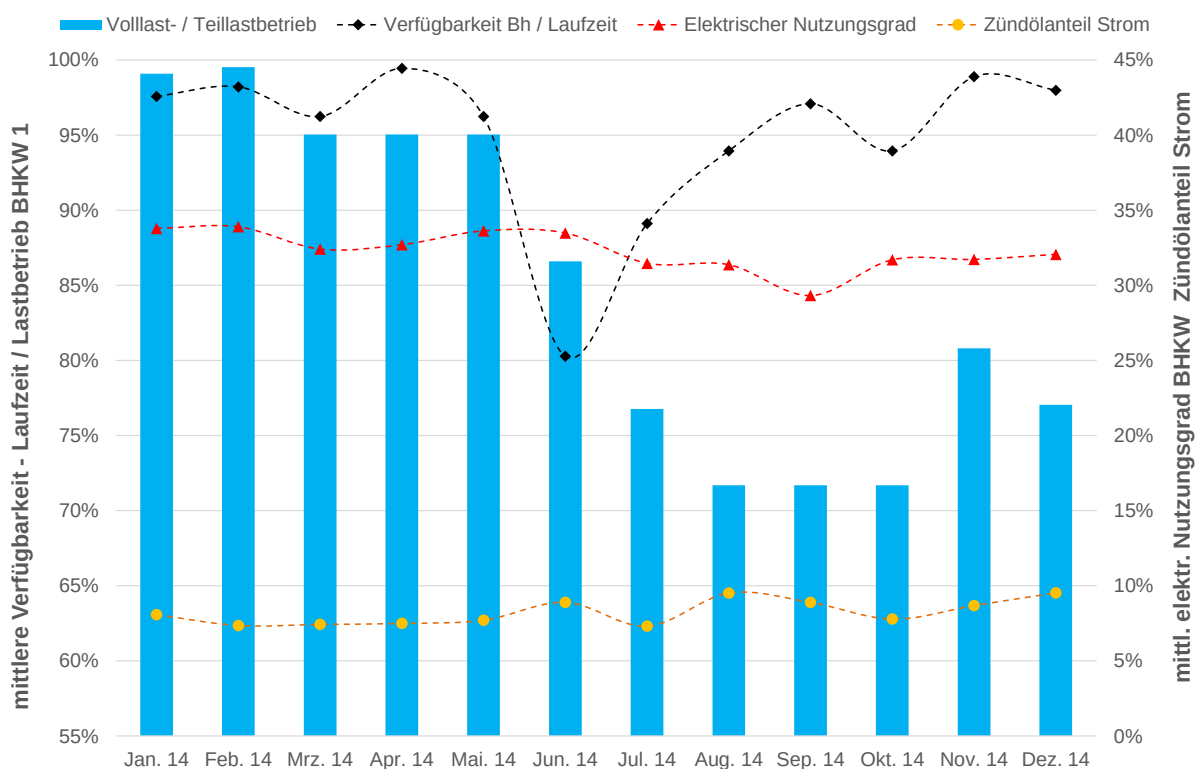


Abbildung 36: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 1 (240 kW) von Pilotanlage #10

Das BHKW 2 (Gas-Otto-Motor) wies zu Beginn der Beobachtungsperiode knapp 42.000 Betriebsstunden auf. Es war über das Jahr insgesamt 4029 Stunden in Betrieb, entsprechend einer Verfügbarkeit von 46 % und einer mittleren Laufzeit von 11 Stunden pro Tag. Der elektrische Nutzungsgrad des BHKW konnte nur in den ersten Monaten des Jahres

ermittelt werden, da das BHKW 2 ab August im Monatsmittel nur noch eine Stunde täglich in Betrieb war. Im gemessenen Zeitraum erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 32,2 %. Die durchschnittliche realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf die 8760 Stunden des Jahres belief sich auf 63 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 133 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 88,6 % der installierten Leistung. Ab Juni 2014 war dieses BHKW kaum mehr in Betrieb, da das Biogas vorrangig mit dem neu installierten „Flex-BHKW“ verwertet wurde

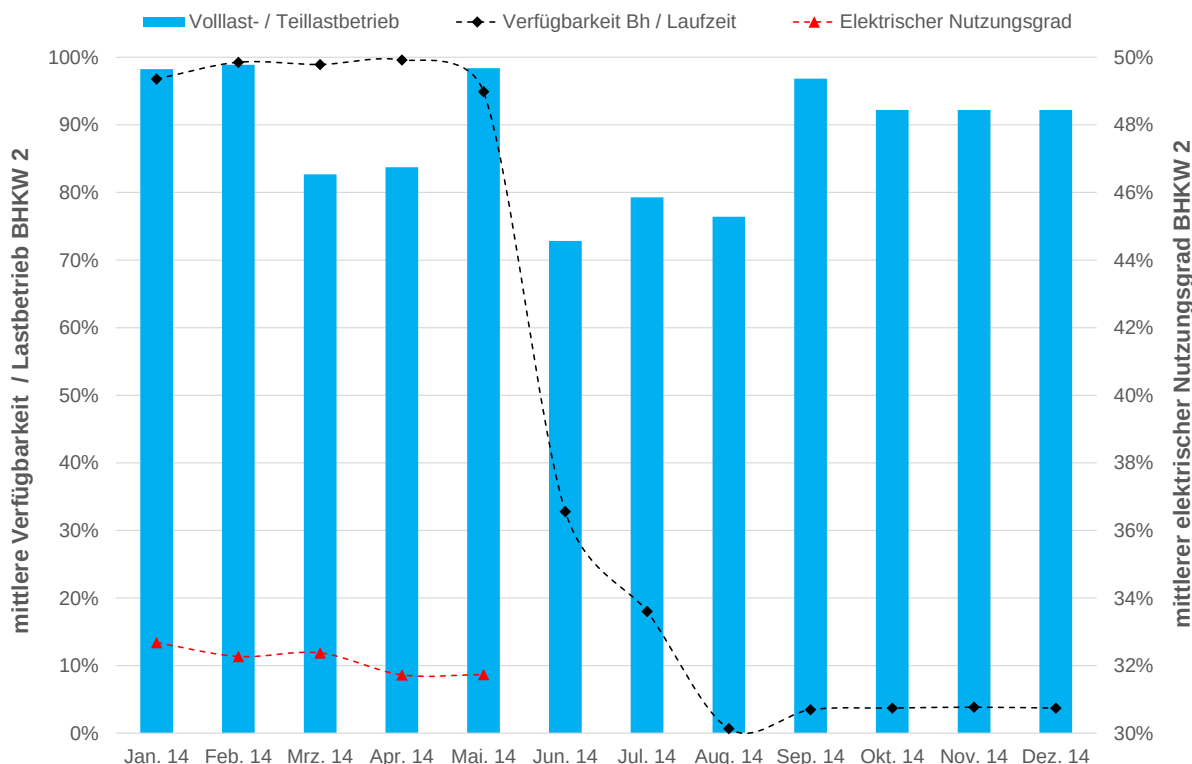


Abbildung 37: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 2 (150 kW) von Pilotanlage #10

Das dritte BHKW (Gas-Otto-Motor) befindet sich nicht am Standort der Anlage, sondern ist als Satelliten-BHKW in einer etwa 1000 m entfernten Klinik positioniert. Aufgrund des relativ konstanten hohen Wärmebedarfs der Klinik wird dieses BHKW auf einem gleichmäßig hohen Auslastungsniveau betrieben.

Die Laufzeit des BHKW 3 im Jahr 2014 betrug insgesamt 8428 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit des BHKW von 96,2 % und einer mittleren Laufzeit von 23,1 Stunden pro Tag. Im gemessenen Zeitraum erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 39,1 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf die 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 252 kW. Umgerechnet auf die Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 261,5 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 98,7 %.

BHKW 4 (Zündstrahl-Motor, $P_{el} = 265$ kW) wurde zur Flexibilisierung der Stromerzeugung in Abhängigkeit von der Nachfrage am Strommarkt im Mai am Standort der Anlage errichtet. Das vierte BHKW mit angestrebtem Intervallbetrieb wurde im Juni 2015 in Betrieb genommen.

Die Laufzeit des BHKW in den Monaten Juni bis Dezember 2014 betrug in der Summe 3798 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit von 73,9 % oder einer mittleren Laufzeit von 17,8 Stunden pro Tag. Das BHKW erzielte über diesen Zeitraum hinweg einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 42,5 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf die Monate Juni bis Dezember belief sich auf 181 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 244 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 92,2 % der installierten Leistung. Der mittlere Zündölanteil des erzeugten Stroms lag in diesem Zeitraum bei 4,5 %. Demnach wurden im Mittel ca. 173 kW elektrische Leistung aus Biogas und 8 kW aus Zündöl bereit gestellt.

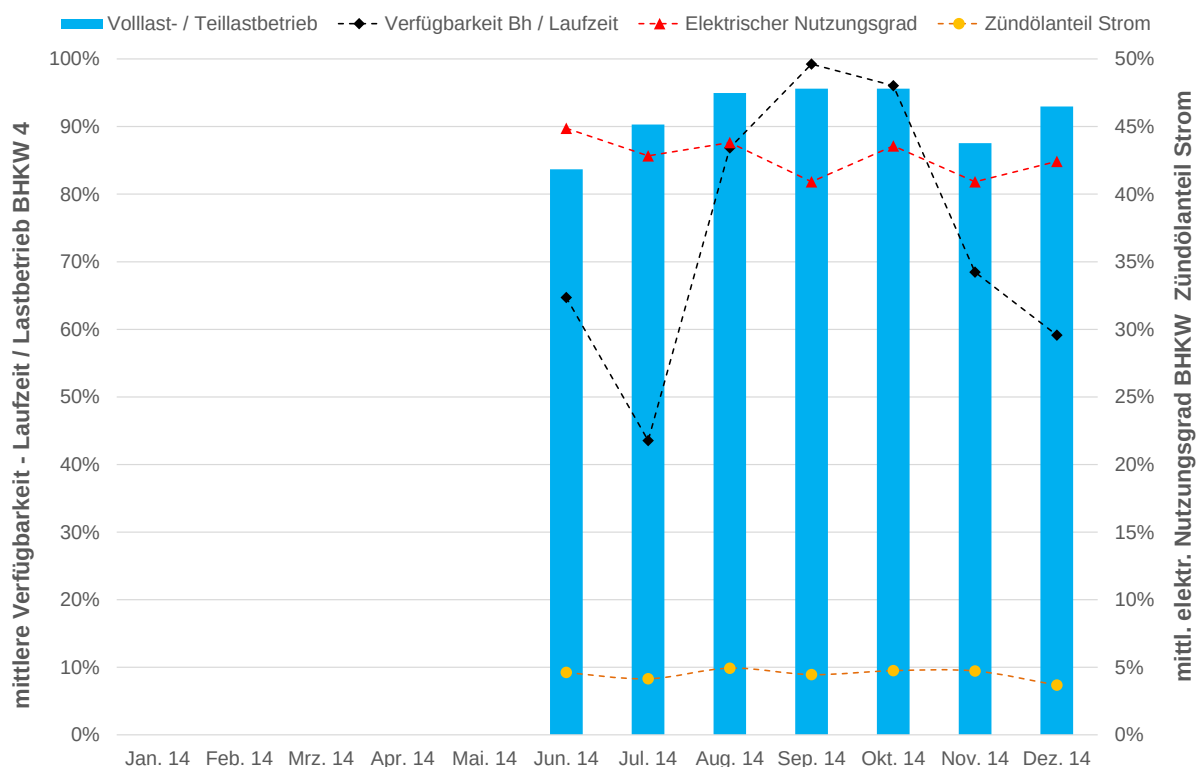


Abbildung 38: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für BHKW 4 (265 kW) von Pilotanlage #10

Im Folgenden sind die Monatsmittelwerte der realisierten elektrischen Leistung der vier Blockheizkraftwerke im Zusammenhang mit den in die Gärbehälter eingetragenen Einsatzstoffen im Beobachtungszeitraum dargestellt. Die Tiefpunkte im Verlauf der elektrischen Leistung resultierten aus der Revision des Nachgärbehälters (Juli) und der Entleerung der beiden Gärrestlager mit Gaserfassung zum Winter hin (Abbildung 39).

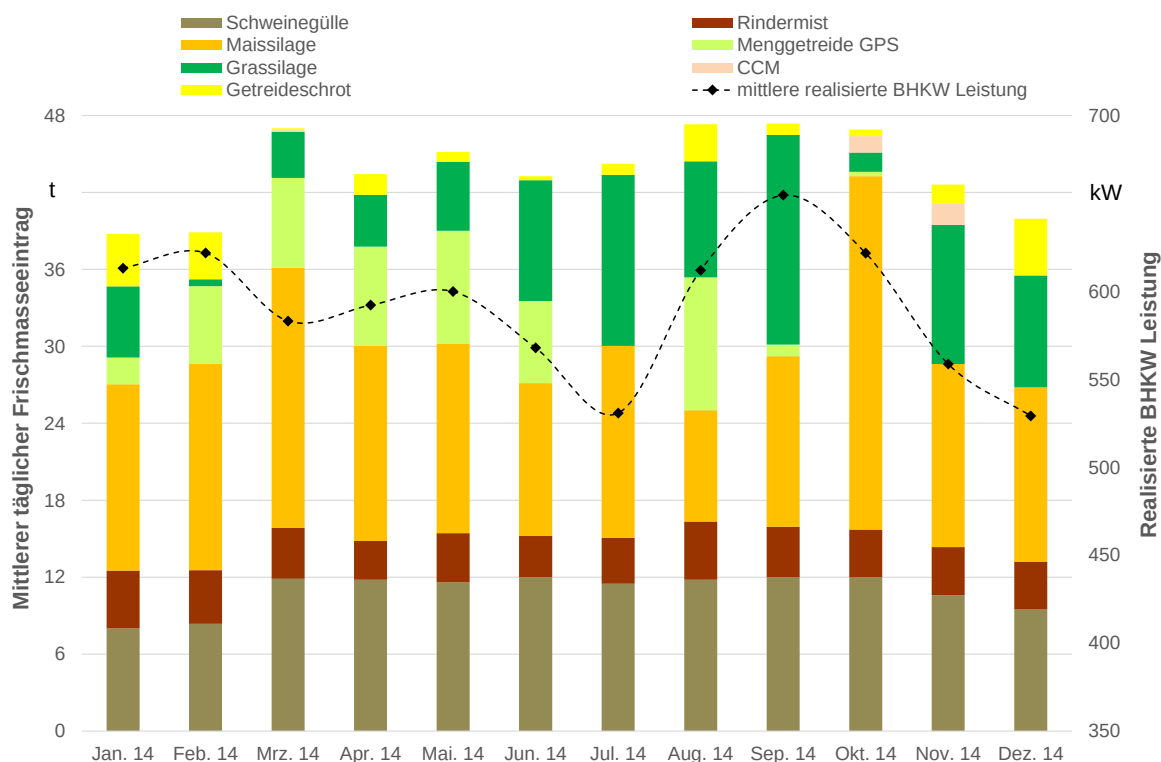


Abbildung 39: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #10

Pilotanlage 10 wies im Jahresmittel einen Eigenstrombedarfsanteil von 6,2 % der produzierten Strommenge auf, was einer mittleren Leistung von 37,9 kW entspricht. Gründe für den verhältnismäßig niedrigen Eigenstrombedarfsanteil stellen die relativ einfache Bauweise der Anlage im Hinblick auf die elektrischen Verbraucher (siehe Tabelle 13 im Anhang) sowie der Schweinegülleanteil von knapp 25 % am Einsatzstoffmix dar, der den TS-Gehalt in den Gärbehältern auf einem moderaten Niveau und dementsprechend den Kraftbedarf für das Durchmischen der Gärbehälter niedrig hält.

Pilotbetrieb 10 erzielte über das gesamte Jahr hinweg einen relativ hohen Absatz der BHKW-Wärme (Abbildung 40). Größter Wärmeabnehmer mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen war die Klinik. Deutlich am erhöhten Wärmeeintrag erkennbar ist der Effekt der im Mai nachgerüsteten Heizkreise im Nachgärer. Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 10 bei 15,8 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $53,8 \text{ kWh t}^{-1}$.

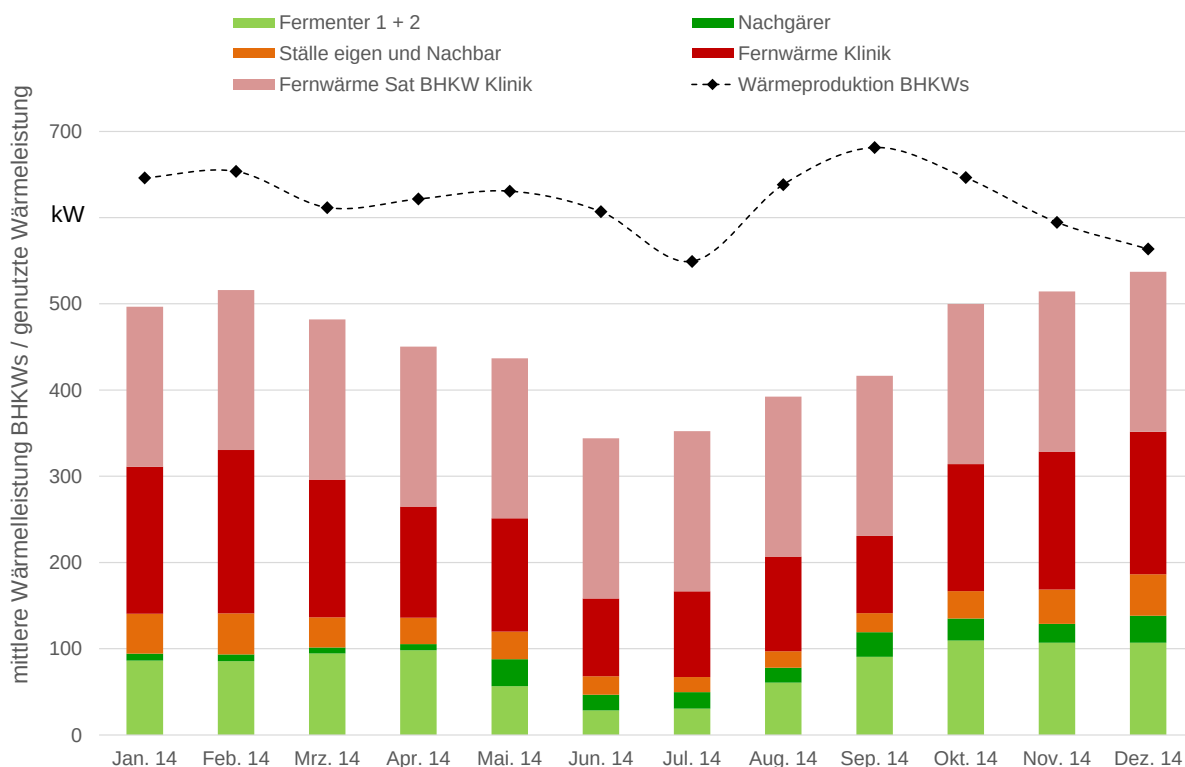


Abbildung 40: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #10

4.1.3 Pilotanlage 12

Pilotbetrieb 12 war zuvor von 2009 bis 2011 begleitet worden. Auch hier handelt es sich um eine NAWARO-Biogasanlage mit nur geringem Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger. Die Anlage verfügt über eine sehr gute messtechnische Ausstattung und ein umfassendes Prozessleitsystem.

4.1.3.1 Einsatzstoffe

Maissilage war hier der mit Abstand wichtigste Einsatzstoff, allerdings nicht mit gleichbleibendem Massenanteil im Jahresverlauf. Im Sommer musste der Anteil von Maissilage wegen der niedrigen Ernteerträge im Vorjahr bis auf 50 % reduziert werden. Im Gegenzug wurde der Anteil an Roggen-GPS aus der Ernte 2014 zeitweise auf über 50 % erhöht. Im Frühjahr und Winter wurden hingegen bis zu 95 % Maissilage gefüttert (Abbildung 42). Der Leistungsverlauf gestaltete sich relativ ruhig mit Ausnahme des Hochsommers, als es im Zusammenhang mit der Steigerung des GPS – Anteils zu einer Destabilisierung der Gärbiologie kam (siehe Abbildung 48 und Kap. 4.1.3.2).

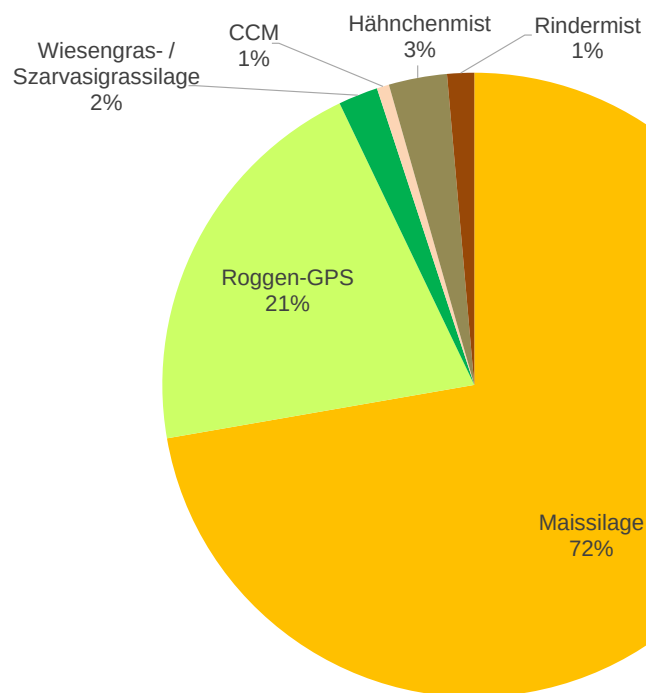


Abbildung 41: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #12 im Jahresmittel 2014

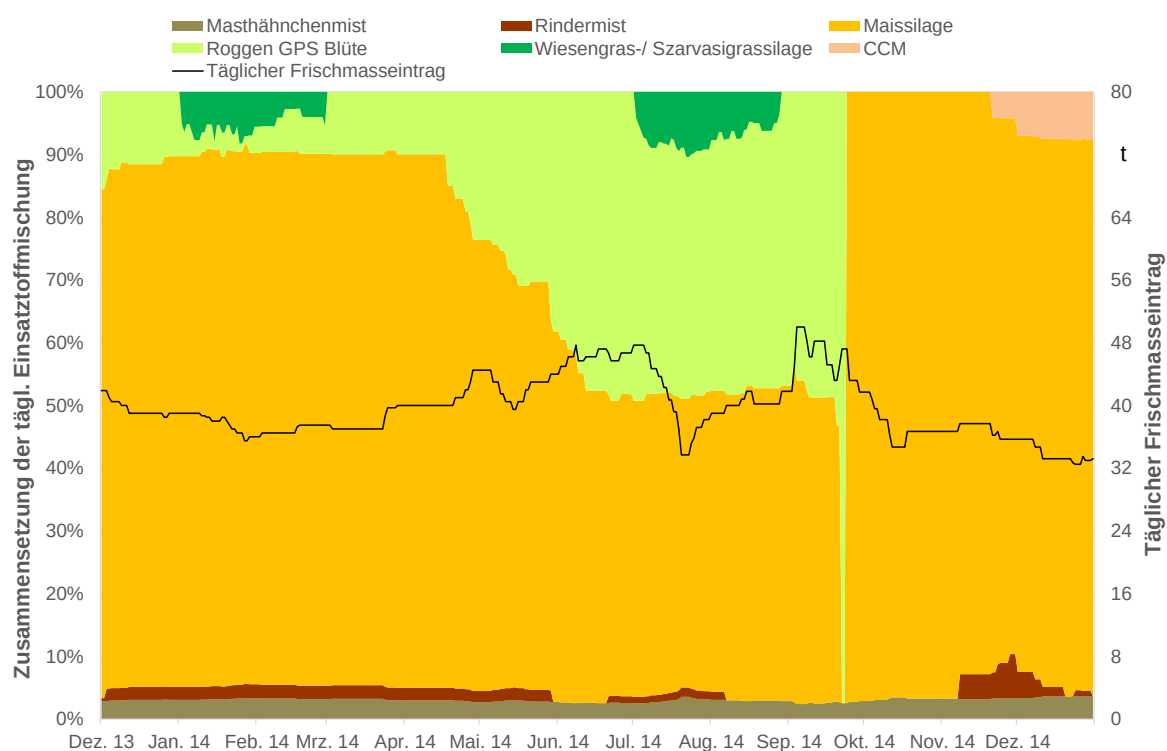


Abbildung 42: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #12 (tägliche Auflösung)

4.1.3.2 Prozessparameter

Pilotanlage 12 verfügt mit einem Nutzvolumen von $4 \times 1800 \text{ m}^3$ unter allen hier dargestellten Anlagen über den größten Gärraum. Die oTS-Raumbelastung war mit Mittelwerten von $3,4 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ für die erste Stufe und $1,7 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ für das gesamte Fermentersystem vergleichsweise gering. Dennoch kam es im Sommer 2014 zu einer Destabilisierung der Gärbiologie, die sich wie folgt allerdings gut erklären ließ.

Mit Erhöhung des Anteils an Roggen-GPS bis auf über 50 % bei gleichzeitig steigender Raumbelastung wurde die Gärbiologie durch die in Getreideganzpflanzensilage enthaltenen Schleimstoffe offenbar stark belastet. Beginnend im April stieg der FOS/TAC in Fermenterproben parallel zu den Essigsäureäquivalenten deutlich an (Abbildung 43 und Abbildung 44).

Kritisch wurde der Zustand im Juli, als die Propionsäurekonzentration in Proben aus beiden Fermentern knapp über 3000 mg L^{-1} erreichte. Daraufhin wurde eine angepasste Spurenelementmischung zugegeben. Die Tatsache, dass in den Fermenterproben vom August alle Prozessindikatoren wieder im völlig unkritischen Bereich lagen, lässt den Schluss zu, dass die Destabilisierung der Gärbiologie durch eine mangelhafte Spurenelementversorgung verursacht wurde.

Die stark erhöhten Säurewerte in beiden Fermentern führten im Juli 2014 auch zu einem drastischen Anstieg der Essigsäureäquivalente im Nachgärer 1 (Abbildung 45; keine Probenahme im Juni und Oktober 2014). In der Probe vom August waren dann allerdings kaum mehr flüchtige Fettsäuren zu bestimmen.

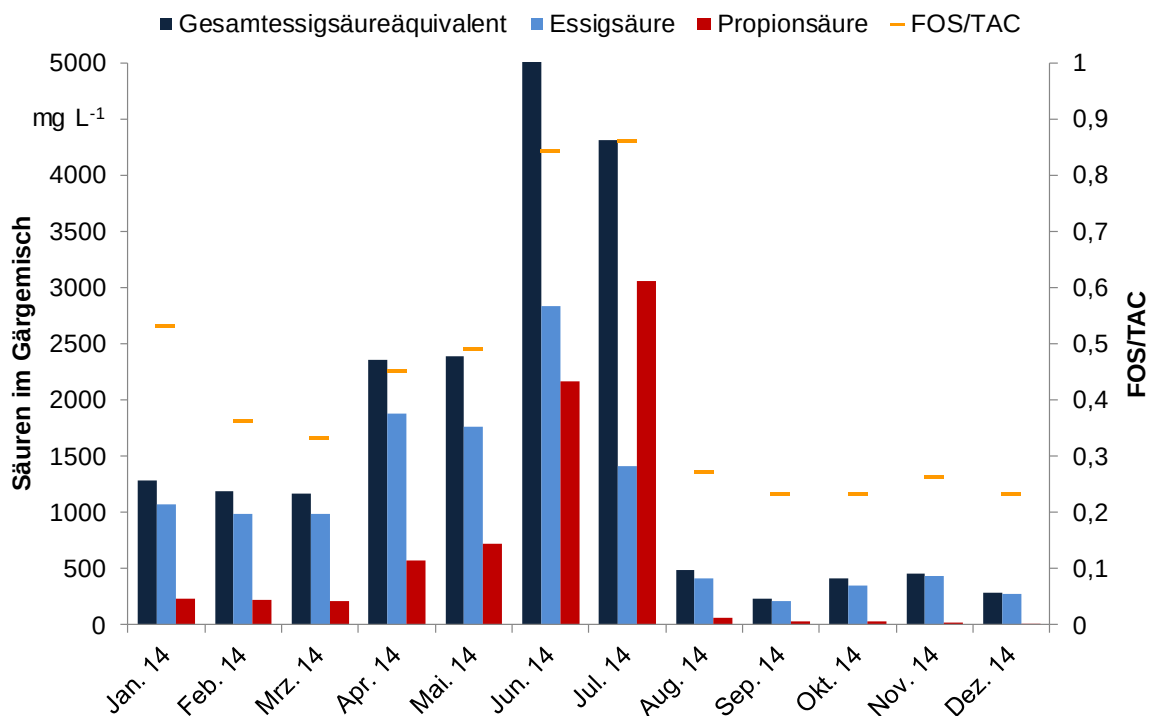


Abbildung 43: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter 1 von Pilotanlage #12

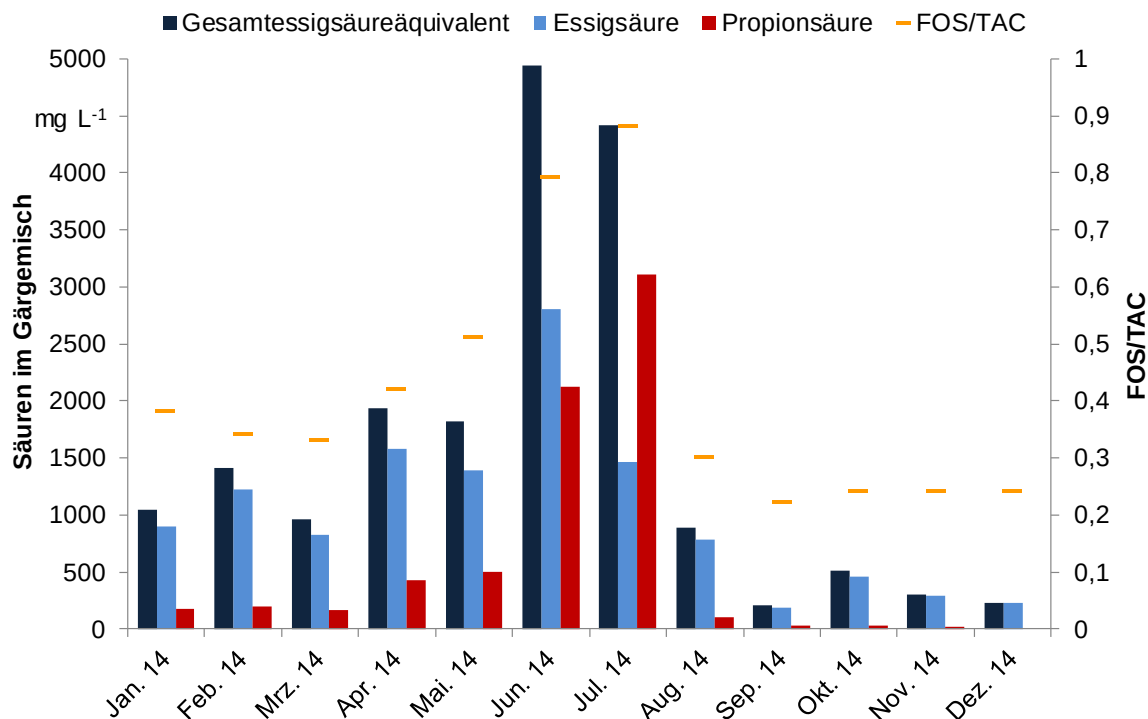


Abbildung 44: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter 2 von Pilotanlage #12

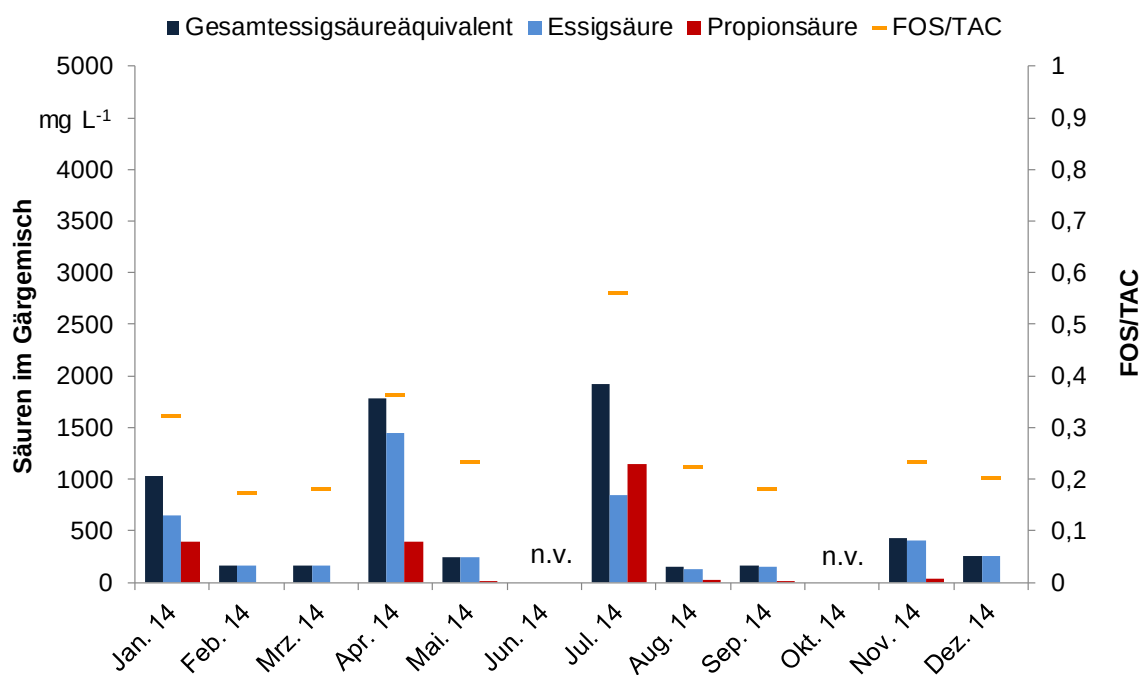


Abbildung 45: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter 1 von Pilotanlage #12

Die sich ab April entwickelnde Destabilisierung des Abbauprozesses schlug sich auch in den TS-Gehalten im Gärgemisch nieder. Von Mai bis Juli stieg der TS Gehalt von 10,7 %/10,4 % (F1/F2) auf 13,6 %/12,9 % an (Abbildung 46). Sowohl die zentrale Förderpumpe, als auch die Rührwerke stießen bei diesen TS-Gehalten an ihre Grenzen. Die

mit der Getreide-GPS eingetragenen Schleimstoffe erhöhten zusätzlich die Viskosität der Gärsuspension. Hiermit war die zentrale Drehkolbenpumpe überlastet, so dass vorübergehend auch keine Rezirkulation von Gärgemisch aus dem Nachgärbehälter 2 mehr erfolgen konnte. Dies dürfte den Gärprozess zusätzlich beeinträchtigt haben. Nachdem die Gärbio-logie im August wie beschrieben rasch stabilisiert werden konnte, sank bis November der TS-Gehalt in beiden Fermentern wieder auf ca. 9,5 % und es stellte sich wieder der Regelbetrieb ein.

Die in den beiden Hauptgärbehältern gemessenen Temperaturen unterschieden sich so minimal, dass in Abbildung 47 lediglich der Mittelwert aus beiden Messwerten abgebildet wurde. Deutlich erkennbar sind die Zeiten im Frühjahr und Spätherbst, als aus den Nachgärbehältern große Mengen an Gärrest zur Ausbringung entnommen wurden. Die Temperaturfühler fielen hierdurch vorübergehend trocken. Ein Gärrestlager ist auf der Anlage bisher nicht vorhanden.

Der Jahresmittelwert der Temperatur in Fermenter 1 und 2 lag bei 46,2 °C und wies eine vorbildlich geringe Schwankungsbreite von ± 1 °C auf. Die Gärtemperatur im Nachgärbe-hälter 1 lag im Mittel bei 40 °C und erreichte maximal 46,1 °C. In Nachgärer 2 wurde eine mittlere Temperatur von 33,4 °C gemessen.

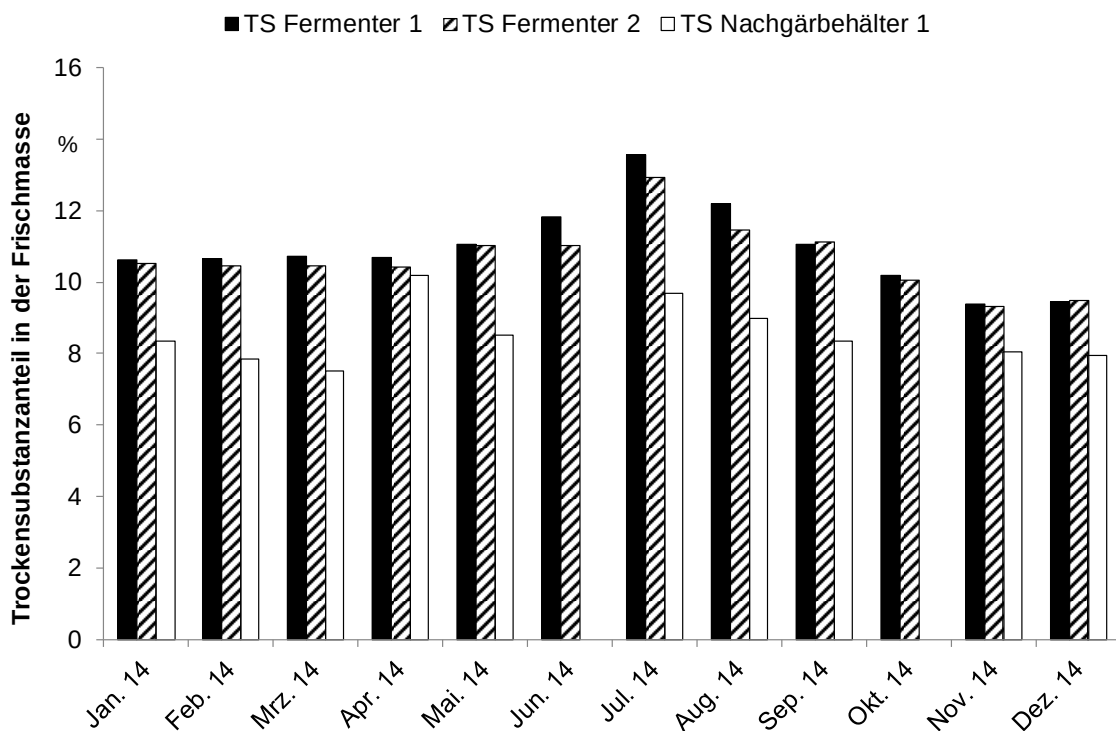


Abbildung 46: Trockensubstanzgehalte in den Hauptgärbehältern sowie im Nachgärbehälter 1 von Pilotanlage #12

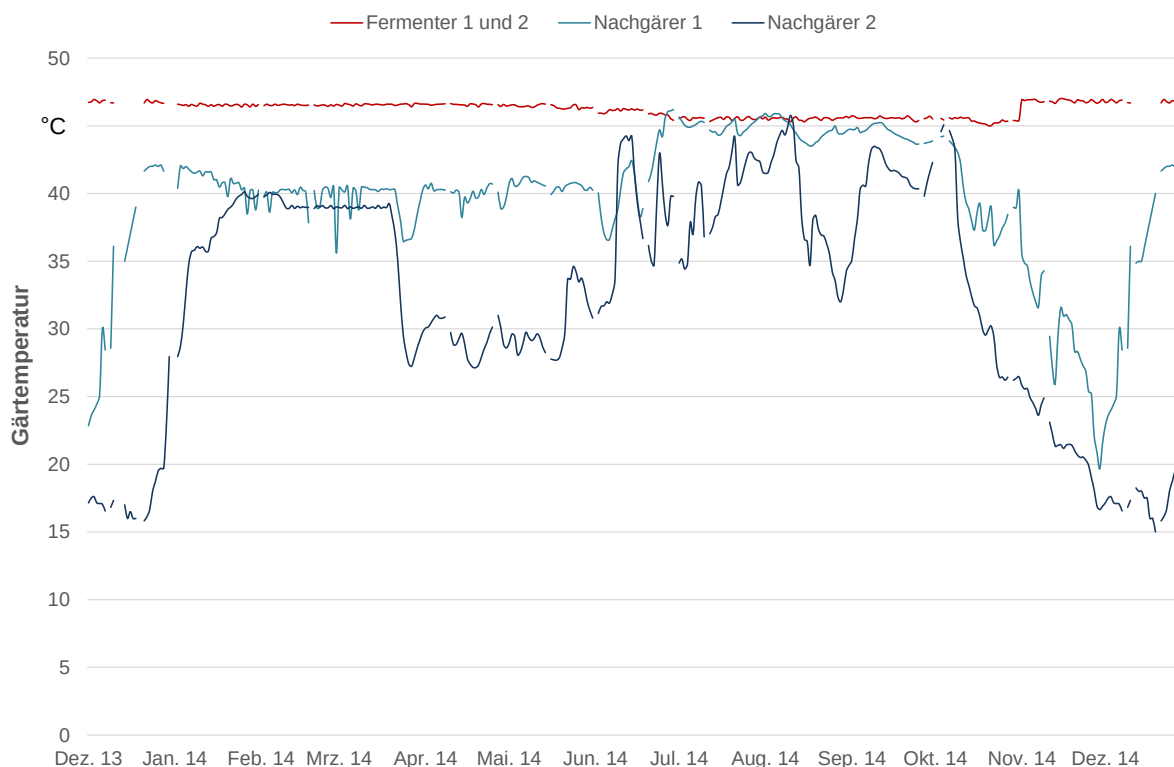


Abbildung 47: Verlauf der Gärtemperatur in den Fermentern 1 und 2 sowie in den Nachgärern 1 und 2 der Pilotanlage #12

4.1.3.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 12 verfügt über zwei Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von jeweils 400 kW zur Umwandlung des Biogases in Strom und Wärme. Die Laufzeit des BHKW 1 (Baujahr 2007) im Jahr 2014 betrug 8668 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit von 99 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,7 Stunden pro Tag. Über das Jahr hinweg erzielte das BHKW 1 einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 34,6 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 340 kW. Umgerechnet auf die tatsächlichen Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 344 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 86 % der Nennleistung.

BHKW 2 (Baujahr 2011) lief 8718 Betriebsstunden im Jahr 2014, was einer Verfügbarkeit von 99,5 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,9 Stunden pro Tag entspricht. Über das Jahr hinweg erreichte das BHKW 2 einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 36,9 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 348 kW. Umgerechnet auf die tatsächlichen Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 350 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 88 %. Der Unterschied im elektrischen Nutzungsgrad der sonst baugleichen Gas-Otto-Motoren kann im Wesentlichen auf den Altersunterschied zurückgeführt werden. Im nachfolgenden Diagramm Abbildung 48 ist der vorübergehende Leistungsrückgang aufgrund der oben diskutierten gärbioologischen Probleme erkennbar.

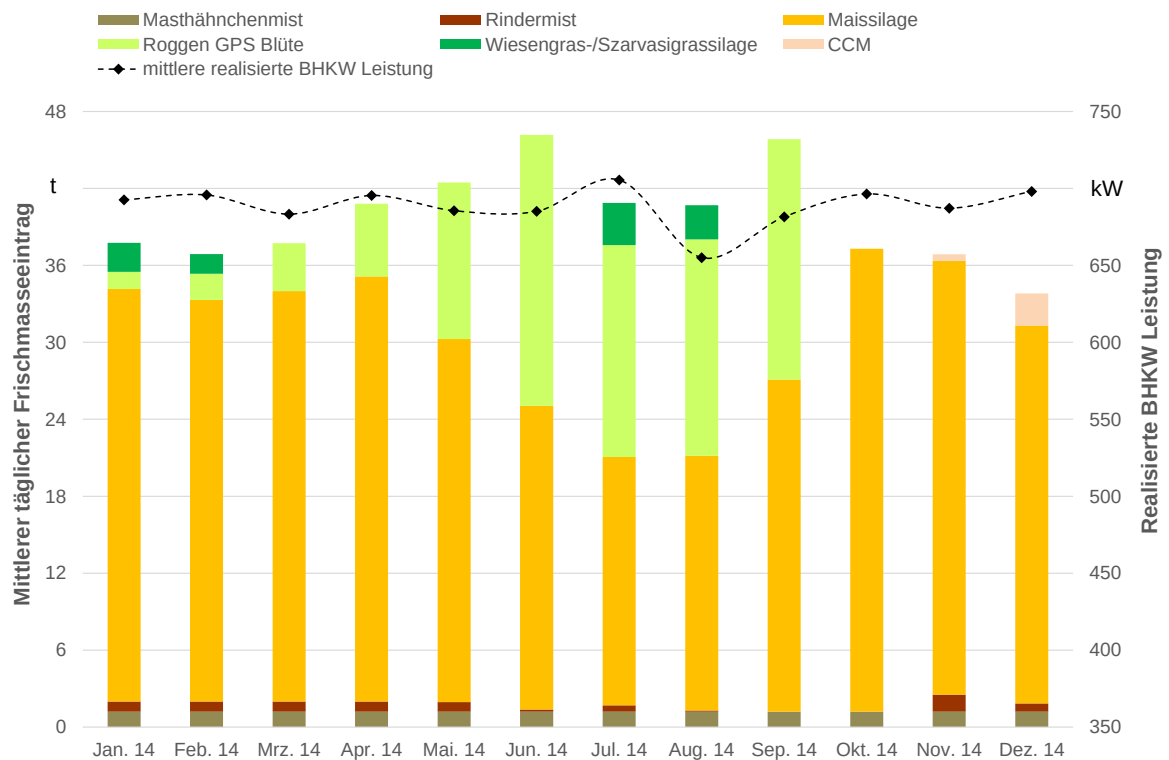


Abbildung 48: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #12

Abbildung 48 veranschaulicht auch die Auswirkung der Steigerung des Anteils an Roggen-GPS im Einsatzstoffmix in den Monaten Mai bis September auf über 50 %. Der daraus resultierende Anstieg des TS Gehalts in den Fermentern führte zu einem deutlich höheren Strombedarf für das Rühren der Gärbehälter und das Umpumpen zwischen den Fermentern und dem ersten Nachgärer (Abbildung 49).

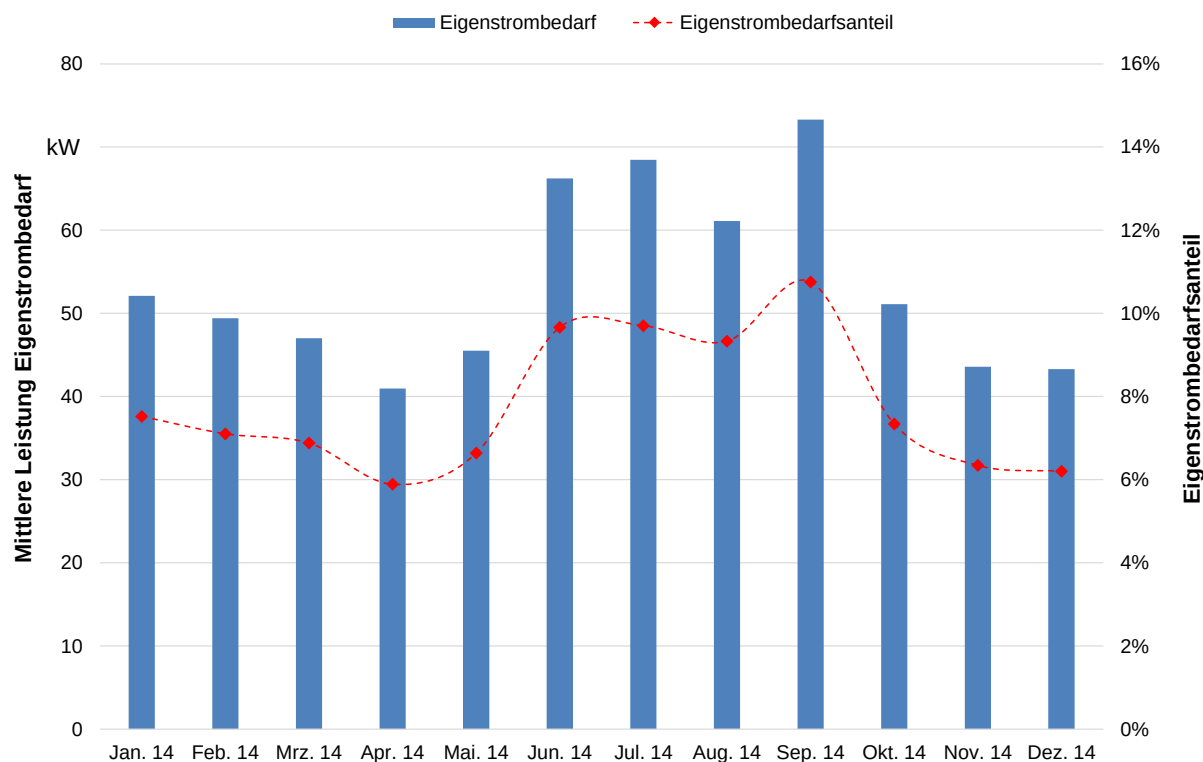


Abbildung 49: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #12

Um eine ausreichende Durchmischung zu gewährleisten, wurden zunächst die Rühr- und Pumpzeiten verlängert. Da die Förderleistung der Drehkolbenpumpe in der zentralen Pumpstation aufgrund der stark gestiegenen Viskosität des Gärgemischs bereits im Juni deutlich zurückgegangen war, wurden die Rotoren der Drehkolbenpumpe erneuert. Diese Maßnahme verbesserte die Pumpleistung der Drehkolbenpumpe aber nur geringfügig. Daher wurde im August eine Exzentrerschneckenpumpe für das Rezirkulieren nachgerüstet, die das hochviskose Gärgemisch deutlich besser fördern konnte. Da die Kombination von stehendem Paddelrührwerk und Stabmixer in den Fermentern den gewünschten Rühreffekt im Gärgemisch nicht mehr erzielte, wurden die erkennbar verschlissenen Rührflügel der Stabmixer in den Fermentern ausgetauscht. Mit dem Ende des Einsatzes von Roggen-GPS Ende September und der Erhöhung des Maissilageanteils in der Futterration auf über 70 % ging der Eigenstrombedarf wieder deutlich zurück (Abbildung 49).

Pilotbetrieb 12 konnte vor allem in den Herbst- und Wintermonaten einen großen Anteil der BHKW-Wärme an ein Nahwärmenetz mit 19 angeschlossenen Haushalten, zwei große Hähnchenmastställe und eine Hopfendarre absetzen. Zusätzlich wurde relativ konstant über das Jahr hinweg Scheitholz getrocknet und die Einbringhalle der Biogasanlage mit Werkstatt und Lager beheizt. Der Hochpunkt des Wärmeabsatzes tritt während der Hopfernteekampagne im September auf (Abbildung 50). Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 12 bei 4,7 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $21,1 \text{ kWh t}^{-1}$.

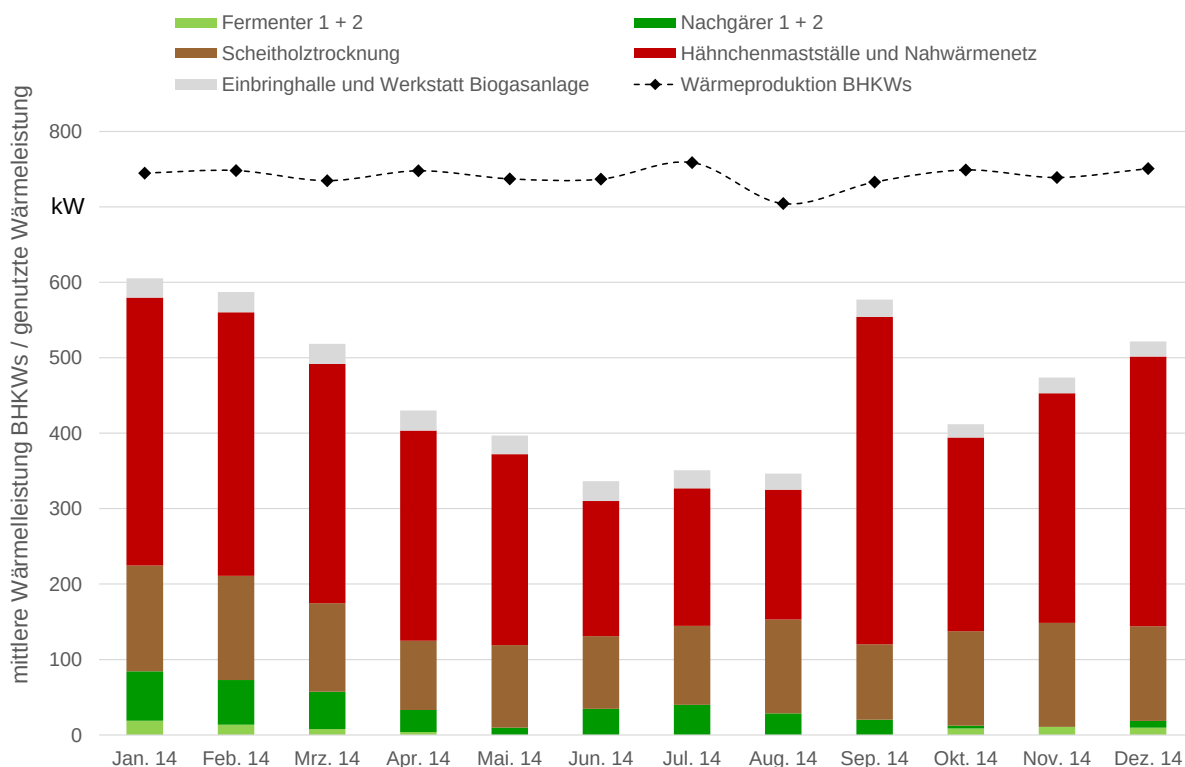


Abbildung 50: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #12

Bei dieser Anlage trat das Phänomen der Selbsterwärmung der Gärbehälter auf, welches auch in Abbildung 50 erkennbar wird. Die beiden Fermenter benötigten deutlich weniger Wärme als die Nachgärbehälter und mussten während der Sommermonate sogar mittels eines Klimagerätes gekühlt werden, um eine Prozessstörung durch rasche Selbsterwärmung zu vermeiden. Der geringe bzw. fehlende Wärmebedarf der Nachgärer in den Monaten April/Mai und Oktober bis Dezember ist auf die oben erwähnte Gärrestentnahme zurückzuführen.

4.1.4 Pilotanlage 15

Auch dieser Betrieb war von 2009 bis 2011 bereits begleitet worden. Die Anlage verfügt über eine komplette Ausstattung mit Messtechnik und Prozessleitsystem. In deutlichem Kontrast zu den drei vorausgegangenen Anlagen verfügte diese Biogasanlage bislang lediglich über einen Gärbehälter (die Erweiterung um einen Nachgärbehälter ist in Planung). Die beiden Gärrestlager sind zur Atmosphäre hin offen.

4.1.4.1 Einsatzstoffe

Einen weiteren Kontrast stellt die Auswahl der Einsatzstoffe dar: In Abbildung 51 überwiegen die Grüntöne, die für Grasbiomasse stehen – in diesem Fall Klee gras von ökologisch bewirtschafteten Flächen. Die verschiedenen Klee grasschnitte stellten mit 70 bis 80 % Massenanteil durchgängig den Haupteinsatzstoff dar. Insgesamt stellte sich der Verlauf des Frischmasseeintrags und der BHKW-Leistung eher unruhig dar (Abbildung 52).

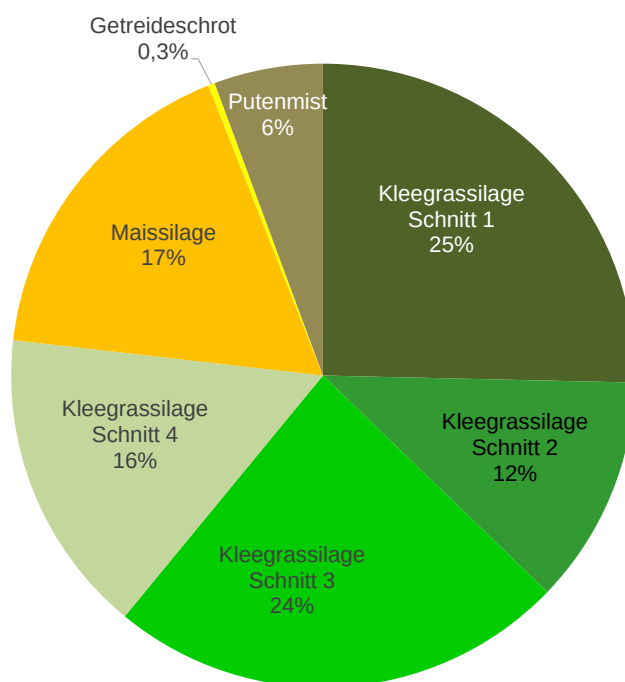


Abbildung 51: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #15 im Jahresmittel 2014

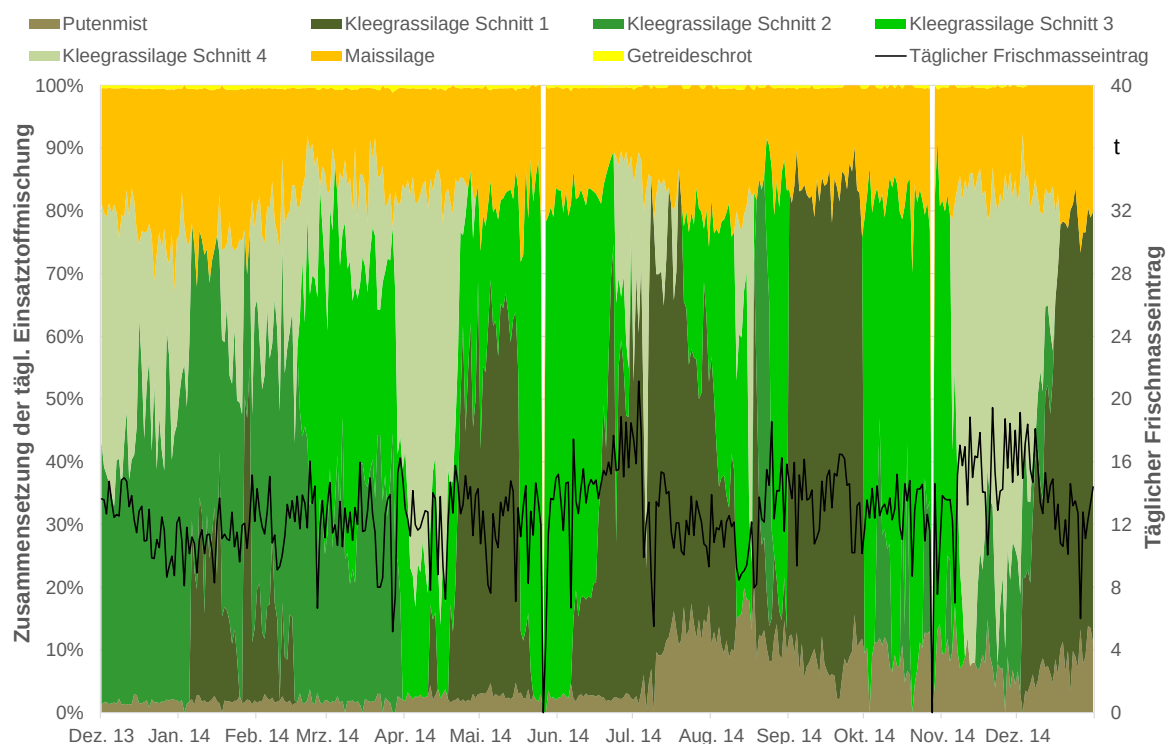


Abbildung 52: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #15 (tägliche Auflösung)

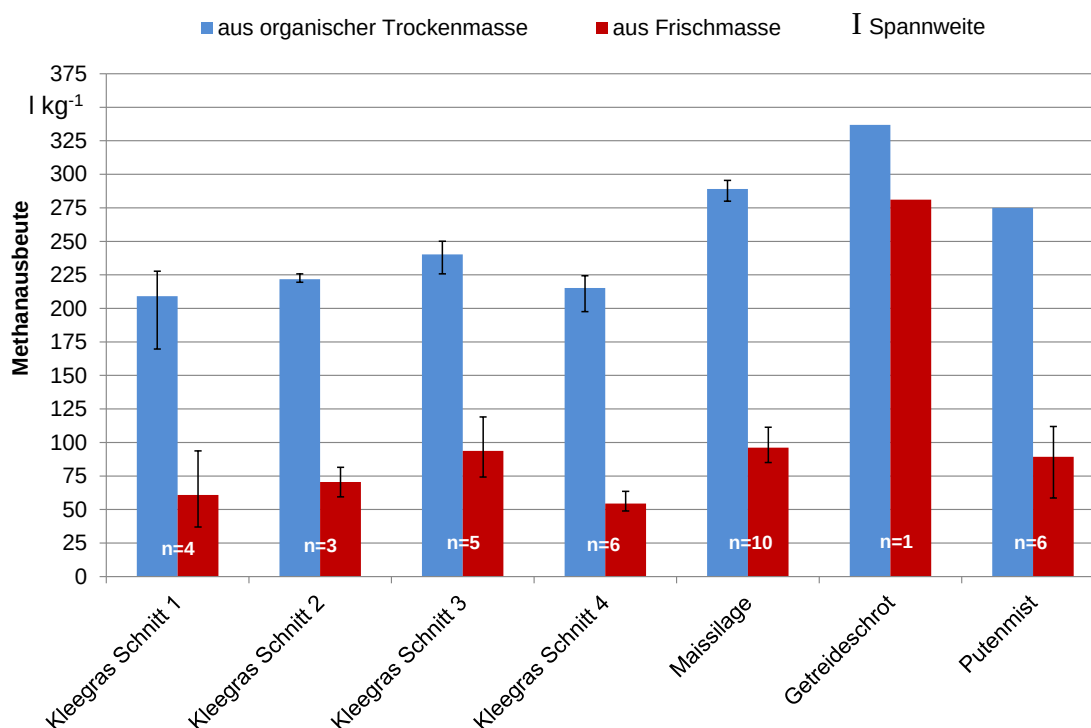


Abbildung 53: Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #15

4.1.4.2 Prozessparameter

Der Fermenter der Pilotanlage 15 ist speziell für eine hohe Raumbelastung und entsprechend hohe Trockensubstanzgehalte im Gärgemisch konzipiert. Allerdings zeigte sich die oTS-Raumbelastung im Jahresmittel mit einem Wert von $5,1 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ auf gleicher Höhe wie für Pilotanlage 8. Das Niveau der flüchtigen Fettsäuren hingegen lag in den ersten fünf Monaten des hier dargestellten Beobachtungszeitraums um mindestens eine Größenordnung höher als in den Hauptgärbehältern der letztgenannten Anlage.

Von Juni bis September 2014 war ein Anstieg der Propionsäure bis auf ca. 3000 mg L^{-1} zu verzeichnen. Die Essigsäurekonzentration nahm zwischenzeitlich sogar ab. Dies wurde auch in anderen Pilotanlagen mit überwiegender Einsatz von Grasbiomasse beobachtet (KISSEL *et al.*, 2015). Der FOS/TAC sprang von ca. 0,4 auf ca. 0,5 (Abbildung 54). Auch die BHKW-Leistung konnte deutlich gesteigert werden. Auslöser für diese „Belastungsreaktion“ der Gärbiologie dürfte die Steigerung der Raumbelastung im Juni/Juli 2014 in Verbindung mit der Änderung der Substratauswahl (mehr Klee grassilage aus dem ersten Schnitt) gewesen sein (Abbildung 55). Ein Rückgang der Prozessindikatoren auf das Ursprungsniveau stellte sich erst im Dezember 2014 wieder ein, nachdem die Raumbelastung vorübergehend deutlich reduziert worden war. Die Gärtemperatur im Fermenter war über den Beobachtungszeitraum mit einer Schwankungsbreite von ca. $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um den Mittelwert von $43,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sehr stabil.

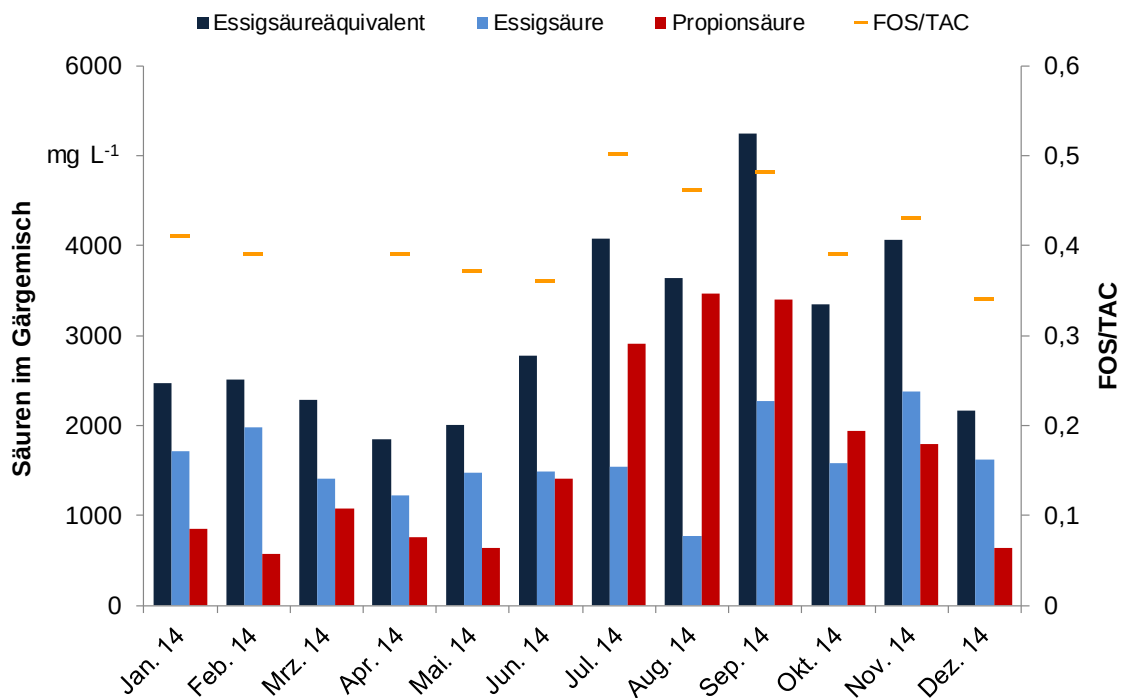


Abbildung 54: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Gärbehälter von Pilotanlage #15

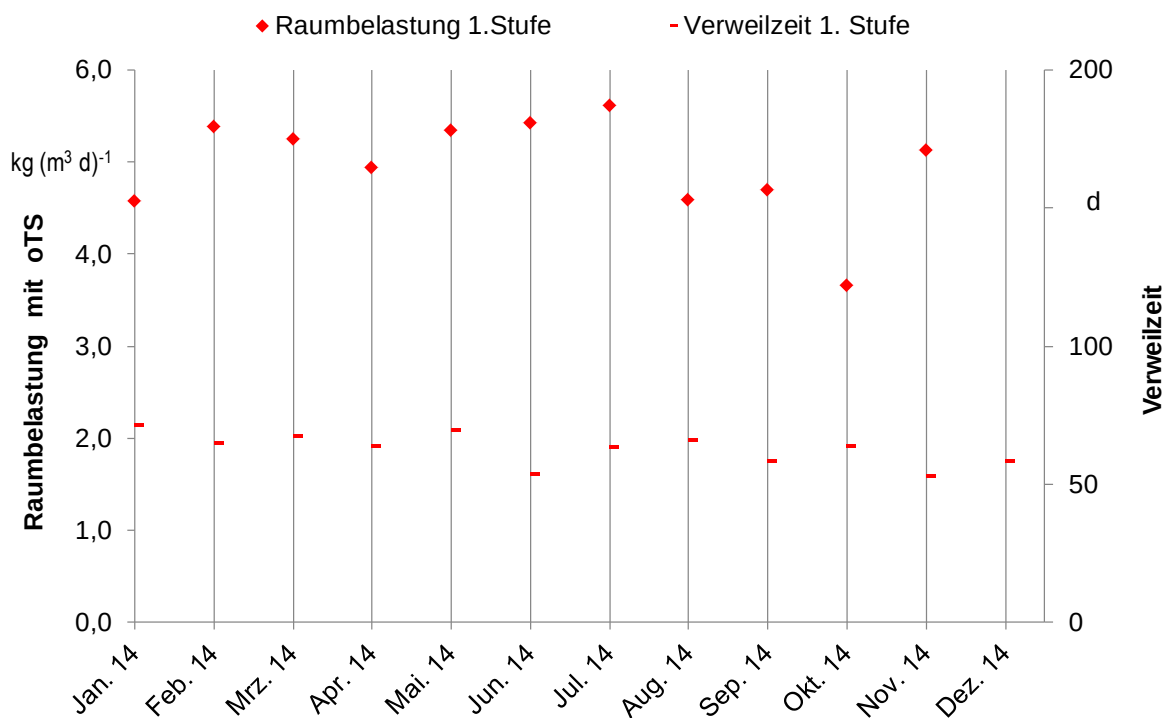


Abbildung 55: Monatsmittelwerte der Raumbelastung und der Verweilzeit für Pilotanlage #15

4.1.4.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 15 verfügt über ein einzelnes Zündstrahl-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 240 kW. Die Laufzeit des BHKW im Jahr 2014 betrug 8584 Betriebs-

stunden, das entspricht einer Verfügbarkeit von 98 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,5 Stunden pro Tag. Das BHKW stand im Wesentlichen nur während der turnusmäßigen Ölwechsel still.

Das BHKW erzielte über das Jahr hinweg einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 40,8 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 210 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 214 kW betrieben, was einer Auslastung von 85,7 % entspricht. Die Auslastung schwankte im Monatsmittel zwischen 83 und 96 % (Abbildung 56). Der mittlere Zündölanteil des erzeugten Stroms lag im Jahr 2014 bei 6,8 %. Demnach wurden im Mittel 196 kW elektrische Leistung aus Biogas und 14 kW aus Zündöl erzeugt.

Betrachtet man die Einsatzstoffmischung und den Leistungsverlauf auf Monatsbasis, wird die unterschiedliche Qualität der Kleegrasschnitte deutlich. Schnitt 4 wurde vergleichsweise nass einsiliert und wies daher eine deutlich geringere rechnerische Methanausbeute aus der Frischmasse auf, als die Schnitte 2 und 3 (Abbildung 53). Dies führte zu einer Verringerung der BHKW-Leistung in Monaten mit einem höheren Massenanteil von Schnitt 4 am Gesamt-Frischmasseeintrag (Abbildung 57).

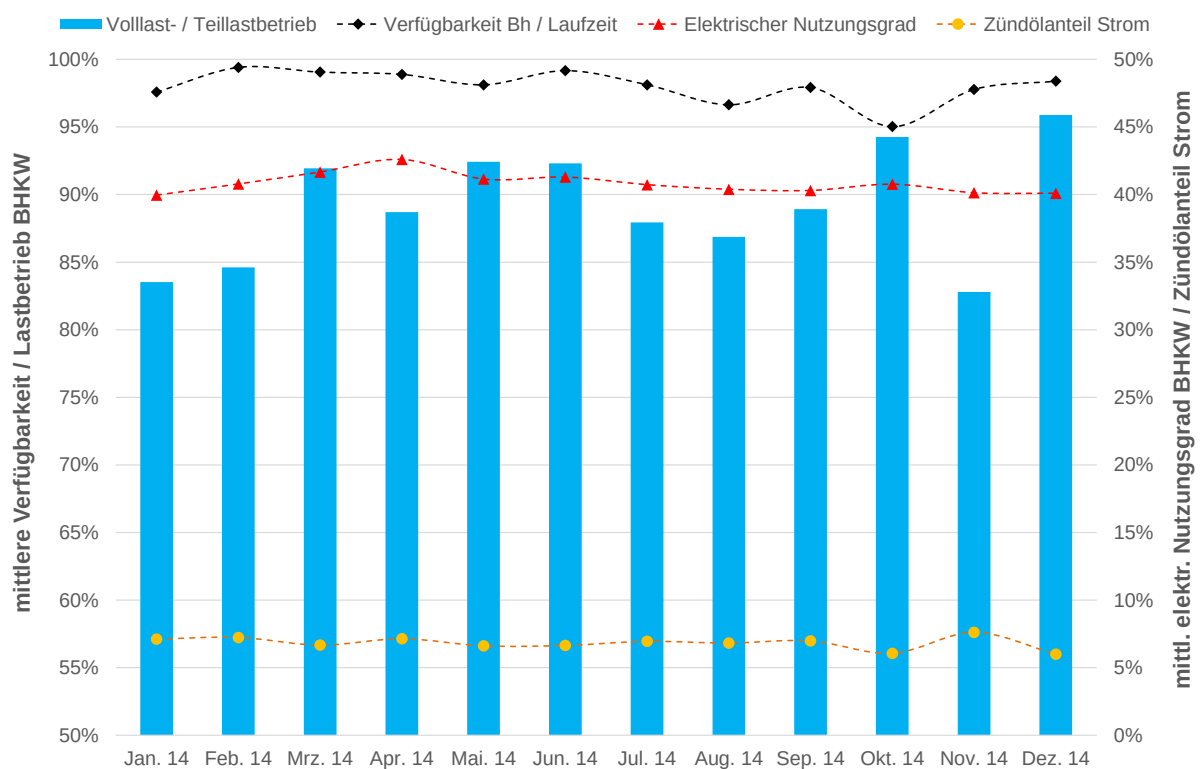


Abbildung 56: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW von Pilotanlage #15

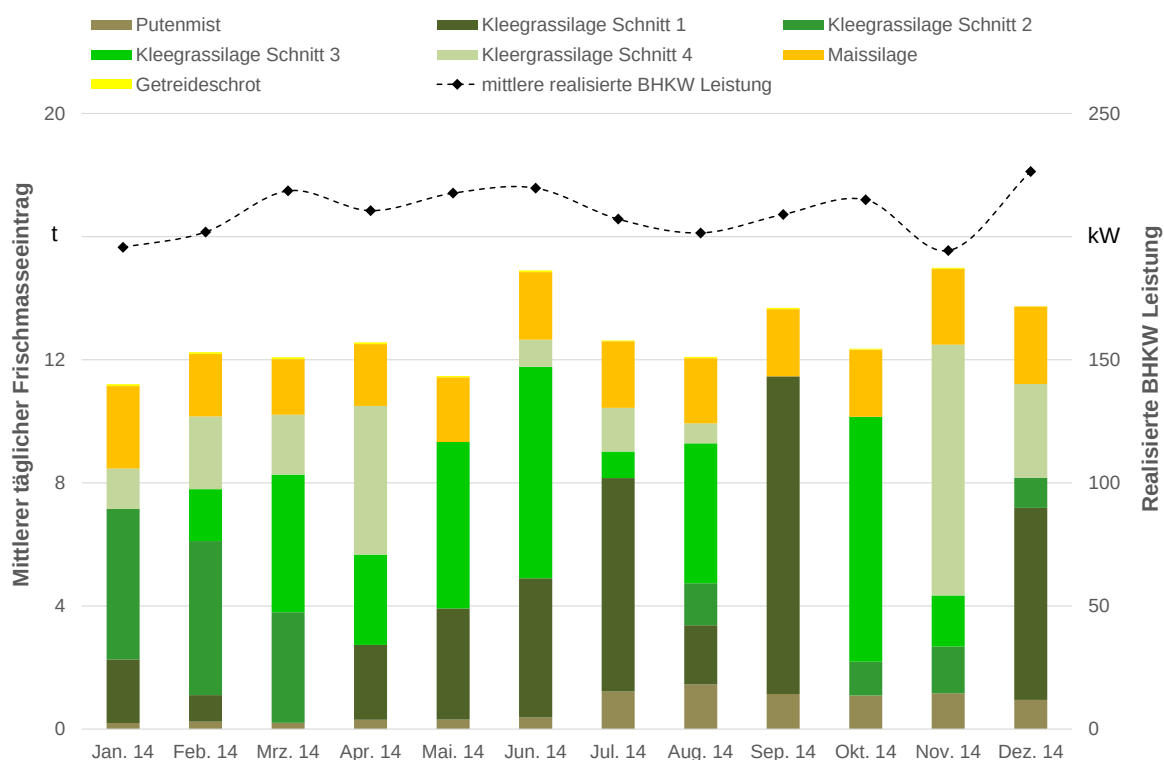


Abbildung 57: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #15

Pilotanlage 15 wies aufgrund des hohen Massenanteils an Ladewagen-Kleegrassilage von 77 % am Einsatzstoffmix einen sehr hohen anteiligen Strombedarf von 15 bis 18 % auf (Abbildung 58). Im Jahresmittel waren die Rührwerke die größten Stromverbraucher (Abbildung 59). Auch der Eintrag der langfasrigen Kleegrassilage und die Aufbereitung des Gärsubstrats mittels eines Lochscheibennasszerkleinerers verursachten einen hohen Kraftbedarf. Um den Eigenstrombedarf zu senken, wurden ab Mai die Laufzeiten der Zirkulationspumpe und des Lochscheibennasszerkleinerers deutlich verkürzt.

Der Anstieg des Stromverbrauchs der BHKW-Technik in den Sommermonaten ist auf den Betrieb des Notkühlers zurückzuführen, da nicht die gesamte BHKW-Wärme an das Nahwärmenetz abgegeben werden konnte. In dieser Zeit löste das BHKW vorübergehend die Rührwerke als größten Stromverbraucher ab.

Im Januar/Februar wurde der Gärrestseparator, welcher überlicherweise kontinuierlich betrieben wurde, grundlegend überholt und verbrauchte entsprechend kaum Strom. Im August/September stieg der Strombedarf der Verbrauchergruppe Separator/Gärrestpumpe/Sickersaftpumpe/Steuerung deutlich an, da der gesamte Inhalt von Gärrestlager 1 in Gärrestlager 2 umpumpt wurde. Im Oktober mussten dann große Volumina an Niederschlagswasser und Sickersaft aus dem relativ nassen vierten Kleegrasschnitt abgepumpt werden. Die monatlichen Schwankungen im Stromverbrauch der Rührtechnik waren auf die wiederkehrende Bildung von Substratstöcken im Fermenter zurückzuführen, die dann mit erhöhtem Rühraufwand wieder aufgelöst werden mussten.

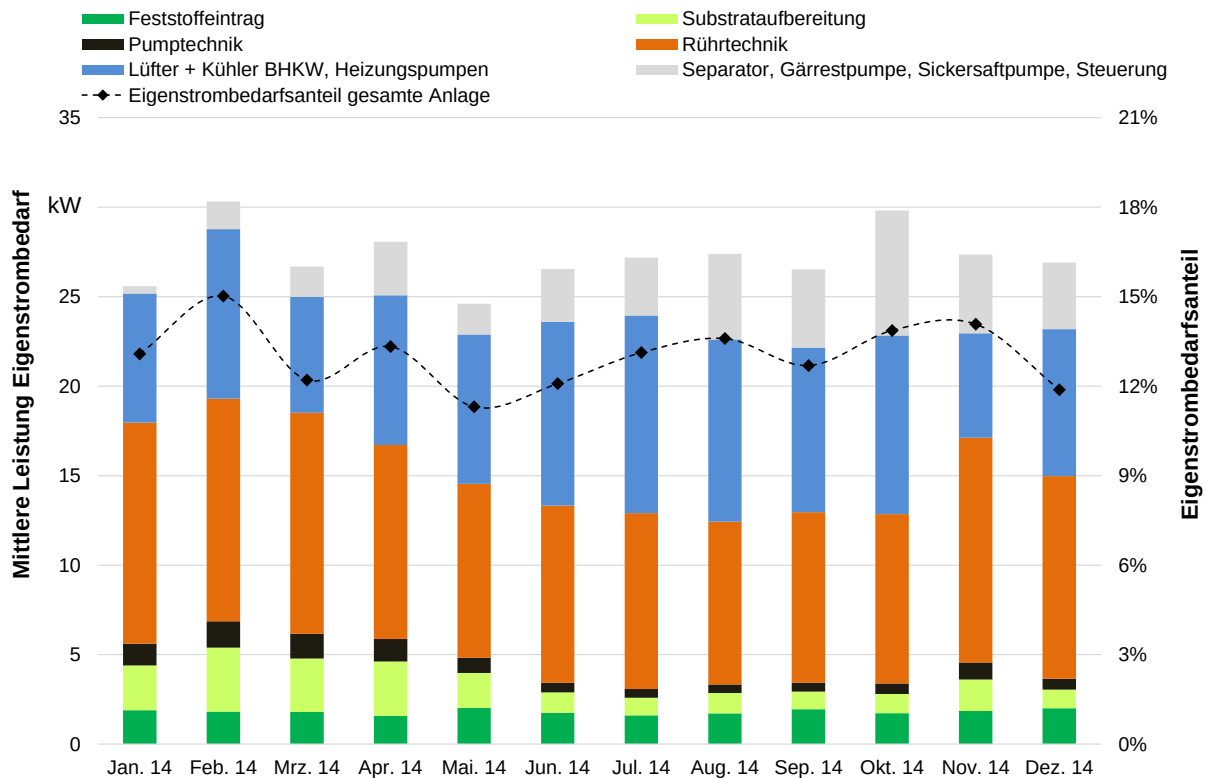


Abbildung 58: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #15

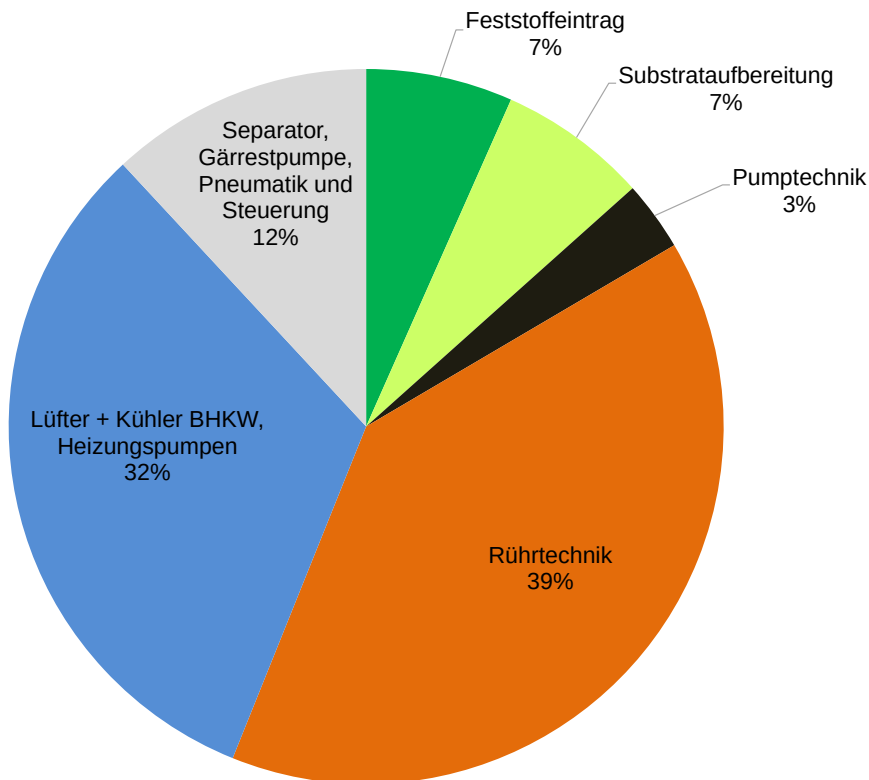


Abbildung 59: Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #15 im Jahresmittel 2014

Mit Abstand größter Abnehmer für die BHKW-Wärme ist das Nahwärmenetz, an das mehrere große Gebäude der Stiftung angeschlossen sind, welcher die Biogasanlage gehört (Abbildung 60). Auch bei dieser Anlage trat im Sommer das Phänomen der Selbsterwärmung des Fermenters auf, wenn auch nicht so ausgeprägt wie bei PB 12. Eine Kühlung des Gärbehälters war in diesem Fall nicht erforderlich.

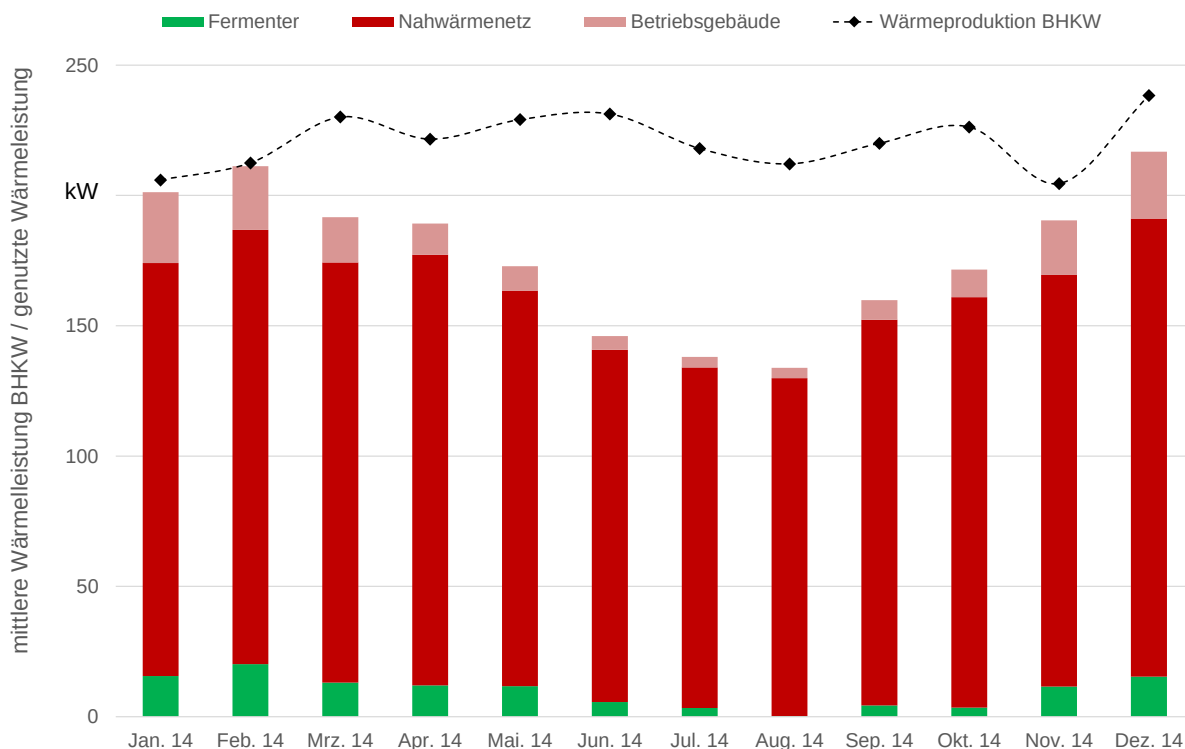


Abbildung 60: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #15

Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 15 bei 4,4 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $12,8 \text{ kWh t}^{-1}$.

4.1.5 Pilotanlage 16

Dieser ökologisch wirtschaftende Betrieb wurde im Jahr 2010 in das Netzwerk der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion aufgenommen. Die Anlage verfügt als Besonderheit über einen liegenden Hauptgärbehälter („Propfenstromfermenter“) sowie eine hervorragende Ausstattung mit Messtechnik und Prozessleitsystem.

4.1.5.1 Einsatzstoffe

Haupteinsatzstoff in Pilotanlage 16 war Mischsilage von Klee gras mit GPS (Abbildung 61). Hinzu kamen ein im Wesentlichen konstanter Frischmasseanteil von einem Drittel Rindermist sowie geringe Mengen an Getreideschrot und – im Winter/Frühjahr – Maissilage (Abbildung 62).

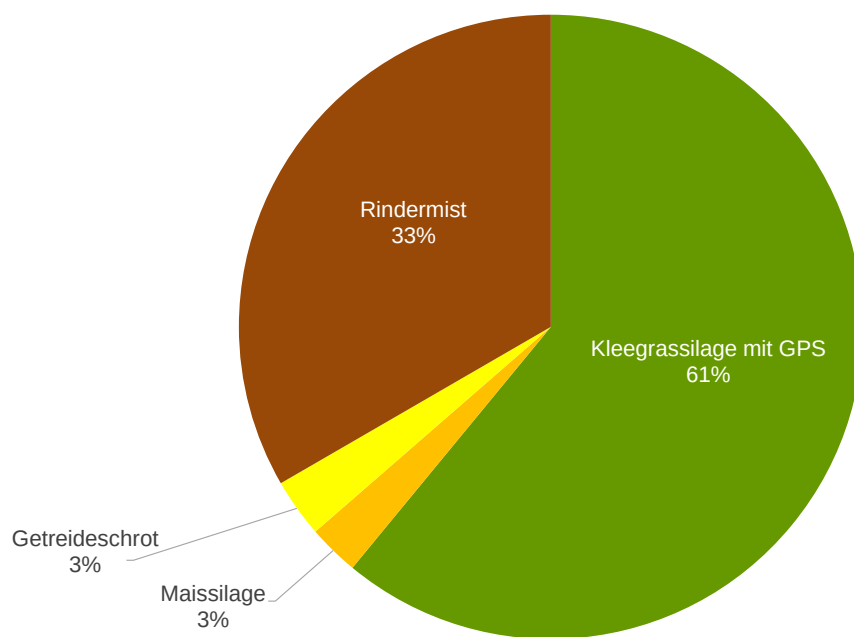


Abbildung 61: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #16 im Jahresmittel 2014

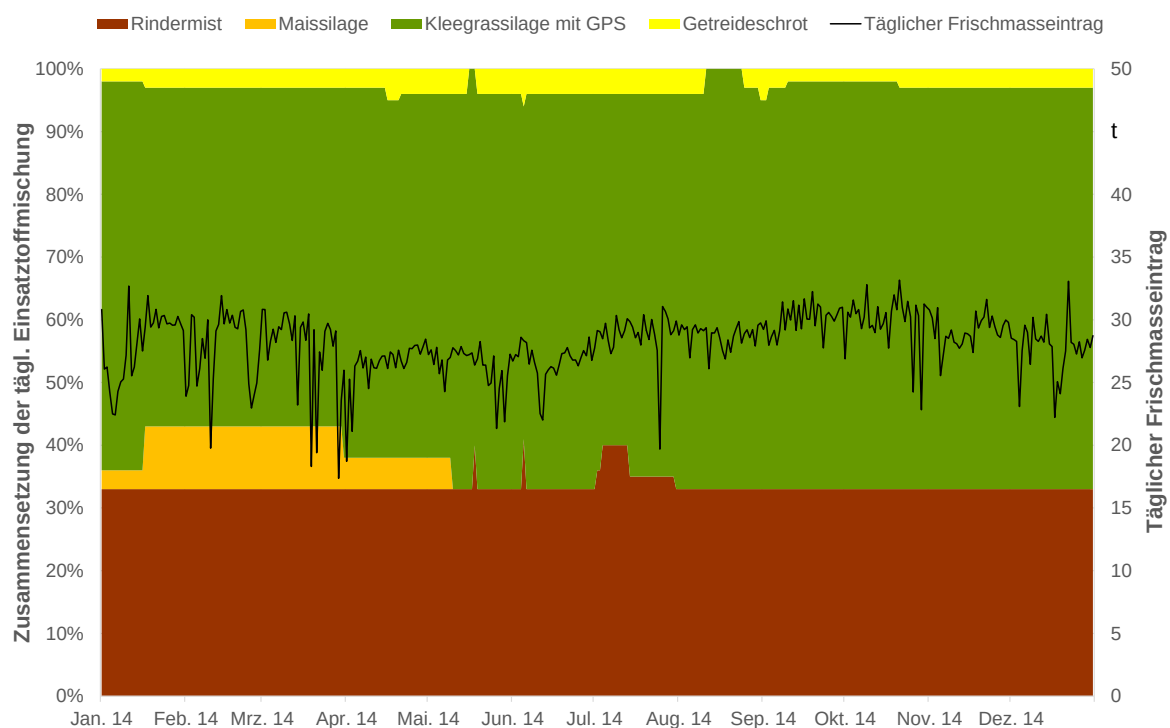


Abbildung 62: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage 16 (tägliche Auflösung)

4.1.5.2 Prozessparameter

Am liegenden Hauptfermenter der Pilotanlage 16 befinden sich drei Probenahmestellen, eine vorne am Eintrag, eine in der Mitte und eine im hinteren Bereich. Typischerweise war der pH-Wert in Proben aus dem vorderen Bereich des Pfpfenstromfermenters niedriger (im Jahresmittel pH = 7,5) und stieg nach hinten an (im Jahresmittel pH = 7,8). Die Konzentration der Gesamtfettsäuren war in Proben aus dem vorderen Bereich mit Werten zwischen 3700 mg L⁻¹ im April und 6950 mg L⁻¹ im März sehr hoch, im hinteren Bereich mit Werten zwischen 93 mg L⁻¹ im Mai und 486 mg L⁻¹ im Oktober sehr niedrig (Abbildung 63 und Abbildung 65). Ähnlich den Fettsäurewerten verhielt sich der FOS/TAC-Wert, der im Jahresmittel im vorderen Bereich bei ca. 0,75 und im hinteren Bereich bei ca. 0,26 lag.

Die deutliche Abnahme der Konzentration flüchtiger Fettsäuren und der FOS/TAC-Werte lassen die beabsichtigte Zonierung des Pfpfenstromreaktors erkennen und deuten auf einen stabilen Abbauprozess hin. Der deutlich ansteigende Trend der Prozessindikatoren in den lediglich drei verfügbaren Proben aus dem mittleren Bereich des Hauptgärbehälters aus den Monaten Februar, März und April (Abbildung 64) könnte auf den erhöhten Eintrag von Oberflächenabfluss zurückzuführen sein, welcher auch eine vorübergehende Absenkung der Gärtemperatur um drei bis vier Grad bewirkte (vgl. Abbildung 67). In Proben aus dem hinteren Bereich des Fermenters war allerdings kaum ein Effekt erkennbar. Im Nachgärbehälter lagen sowohl die Essigsäureäquivalente mit einem Mittelwert von 146 mg L⁻¹, als auch der FOS/TAC-Wert mit 0,19 auf sehr niedrigem Niveau.

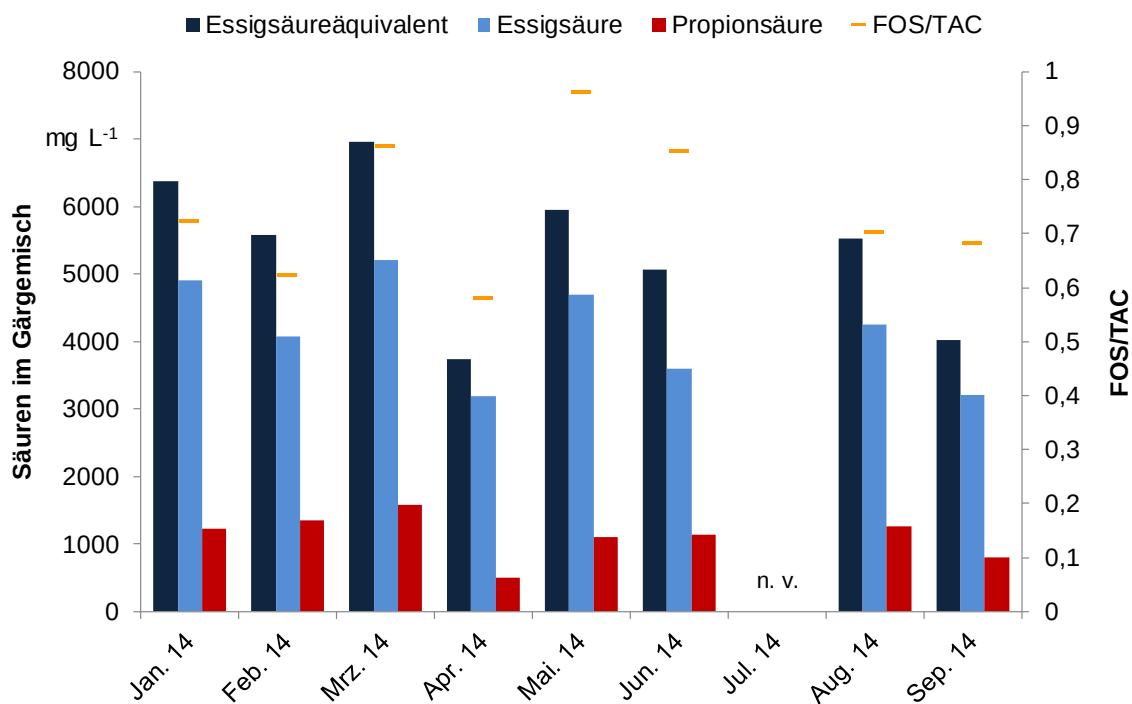


Abbildung 63: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem vorderen Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16

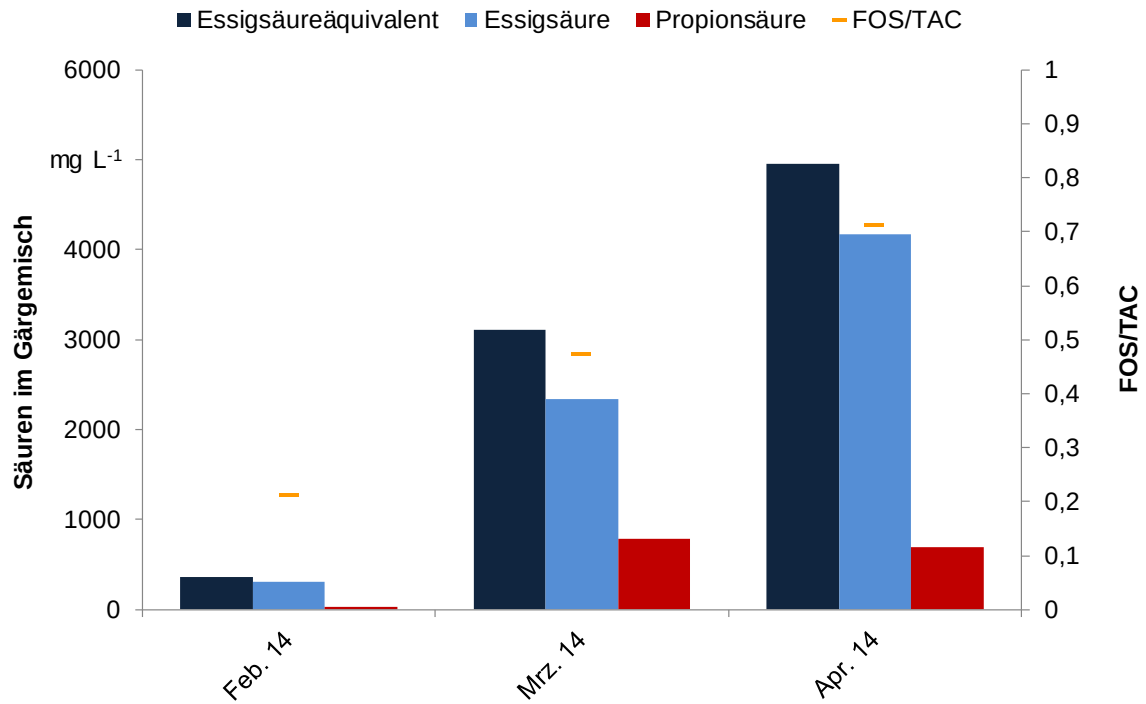


Abbildung 64: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem mittleren Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16

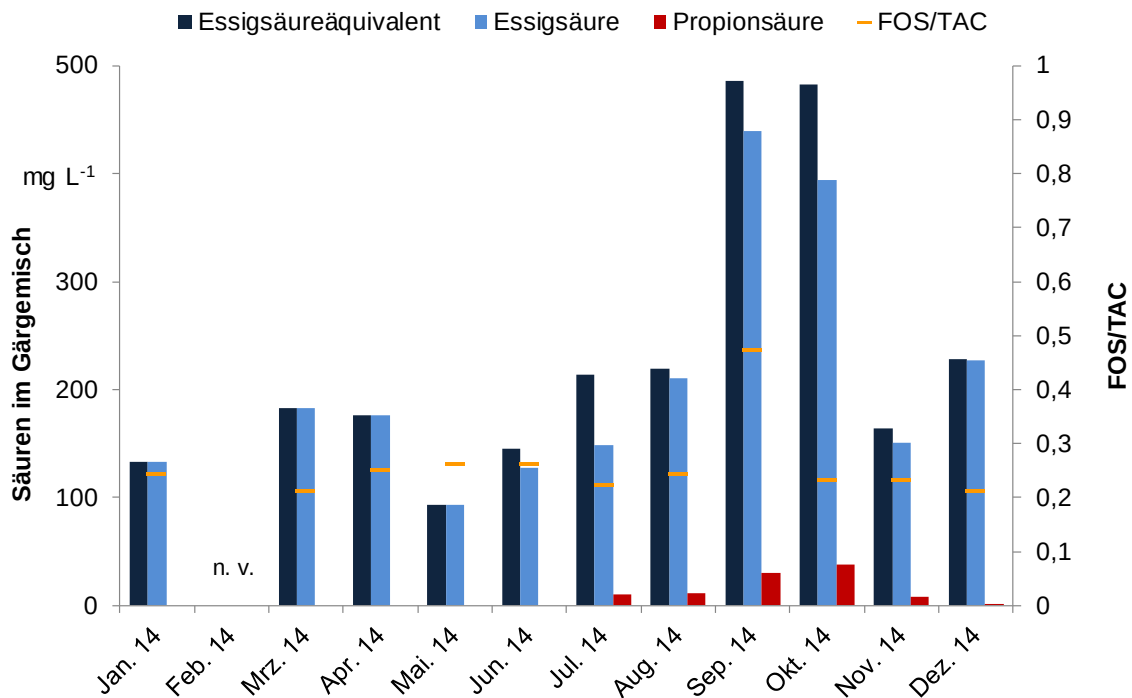


Abbildung 65: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem hinteren Bereich des Hauptgärbehälters von Pilotanlage #16

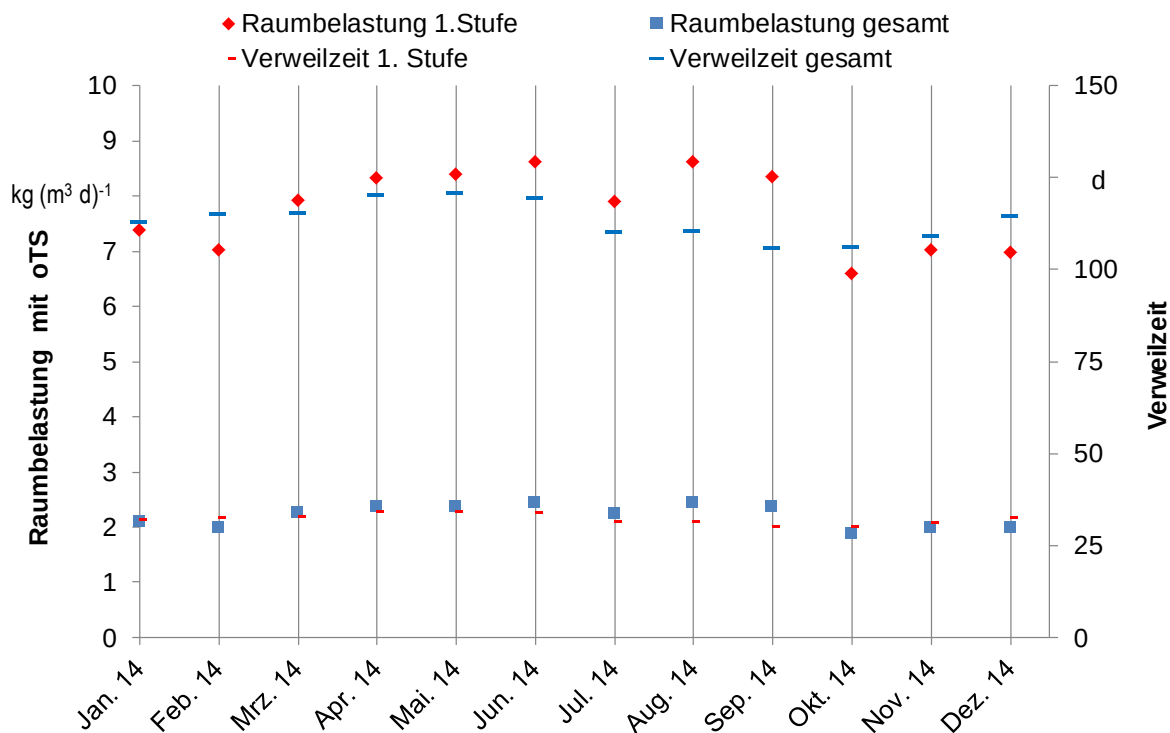


Abbildung 66: Monatsmittelwerte der Raumbelastung und der Verweilzeit für Pilotanlage #16

Die Fermentertemperatur lag im Jahresmittel bei 43,4 °C, mit einer maximalen Temperatur von 45,8 °C und einem Minimum von 39,8 °C. Für den Nachgärbehälter ergibt sich eine Jahresmitteltemperatur von 38,4 °C mit einem Maximum von 40,5 °C und einem Minimum von 34,4 °C. Die beiden Temperaturabfälle um drei bis vier Grad im April und November lassen sich nur durch den erhöhten Eintrag von Oberflächenwasser aus der Fahrsiloanlage erklären (Abbildung 67).

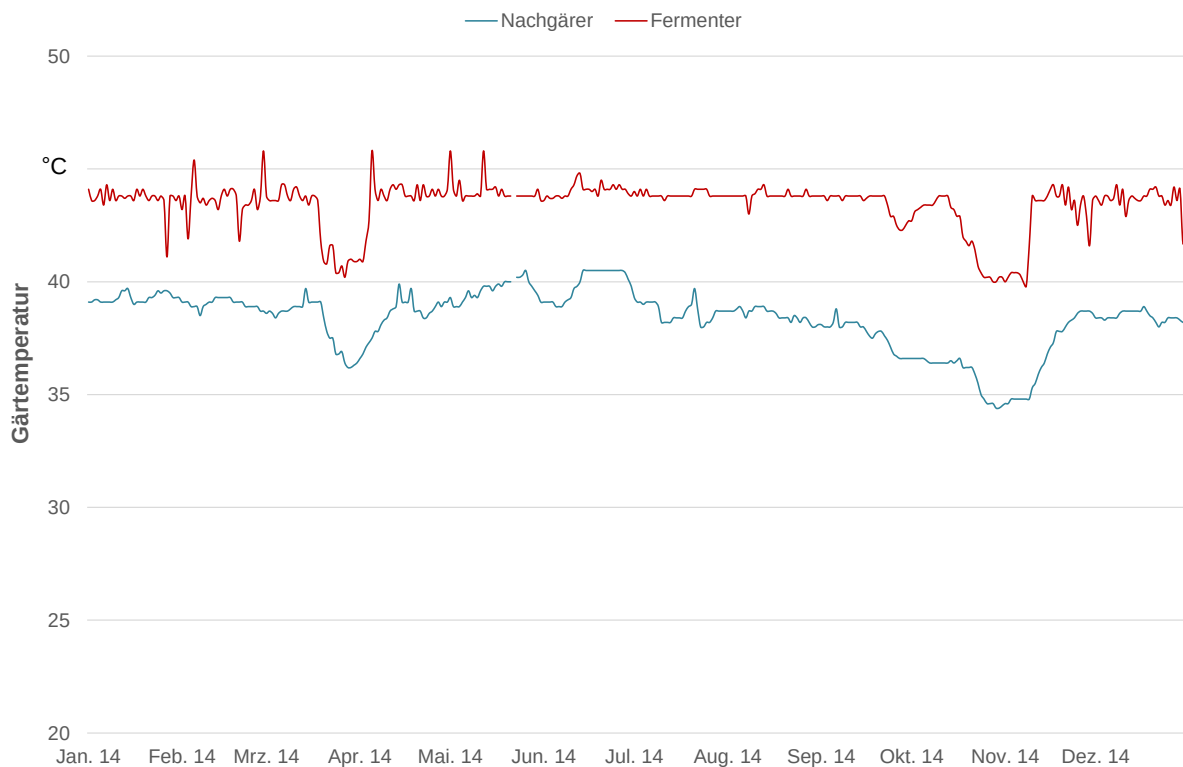


Abbildung 67: Verlauf der Gärtemperatur im Fermenter und im Nachgärer von Pilotanlage #16

4.1.5.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 16 verfügt über zwei Gas-Otto-Blockheizkraftwerke mit einer elektrischen Nennleistung von 250 kW und 190 kW. Die Laufzeit des BHKW 1 ($P_{el} = 250$ kW) im Jahr 2014 betrug 8694 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit von 99,2 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,8 Stunden pro Tag. Aufgrund eines Aufzeichnungsfehlers in der Gasmengenerfassung war die Auswertung des mittleren elektrischen Nutzungsgrades nur über einen Zeitraum von zwei Monaten möglich. Dieser errechnete sich zu 36,9 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 211 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 213 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 85 %.

BHKW 1 wurde mit dem Ziel einer möglichst hohen Verfügbarkeit bei etwa 85 bis 90 % Last betrieben. Lediglich im Dezember 2014 musste die Last wegen Gasmangels auf ca. 80 % reduziert werden (Abbildung 68). BHKW 2 ($P_{el} = 190$ kW) war im Jahr 2014 insgesamt 7313 Stunden in Betrieb, was einer Verfügbarkeit von 83,5 % oder einer mittleren Laufzeit von 20 Stunden pro Tag entspricht. Über das Jahr hinweg erreichte das BHKW 2 einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 34,4 %. Umgerechnet auf die Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 160 kW betrieben, das entspricht einer Last von 84,2 %.

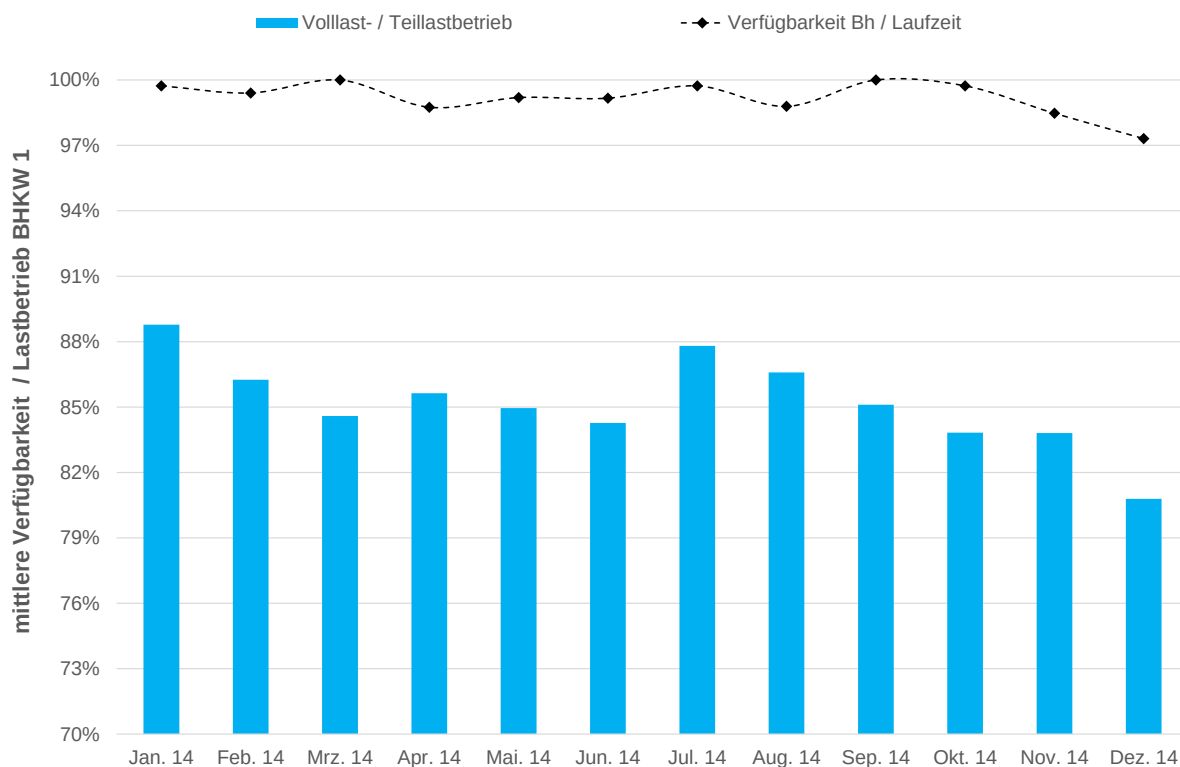


Abbildung 68: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW 1 (250 kW) von Pilotanlage #16

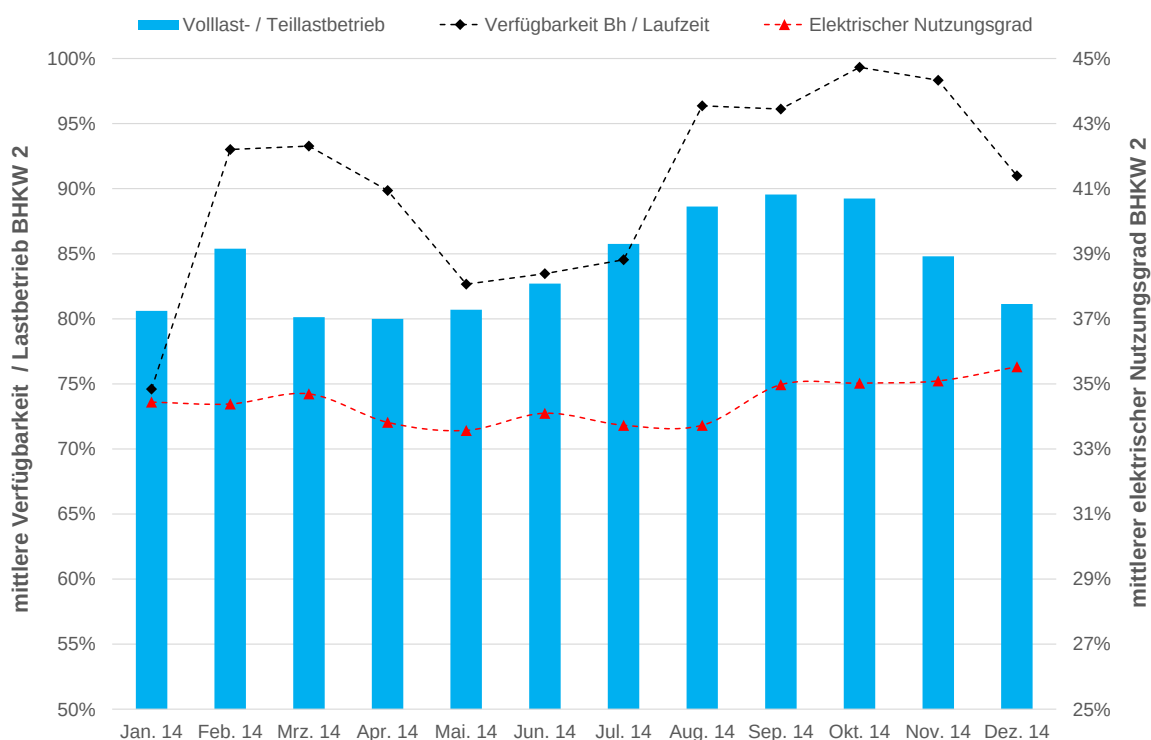


Abbildung 69: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW 2 (190 kW) von Pilotanlage #16

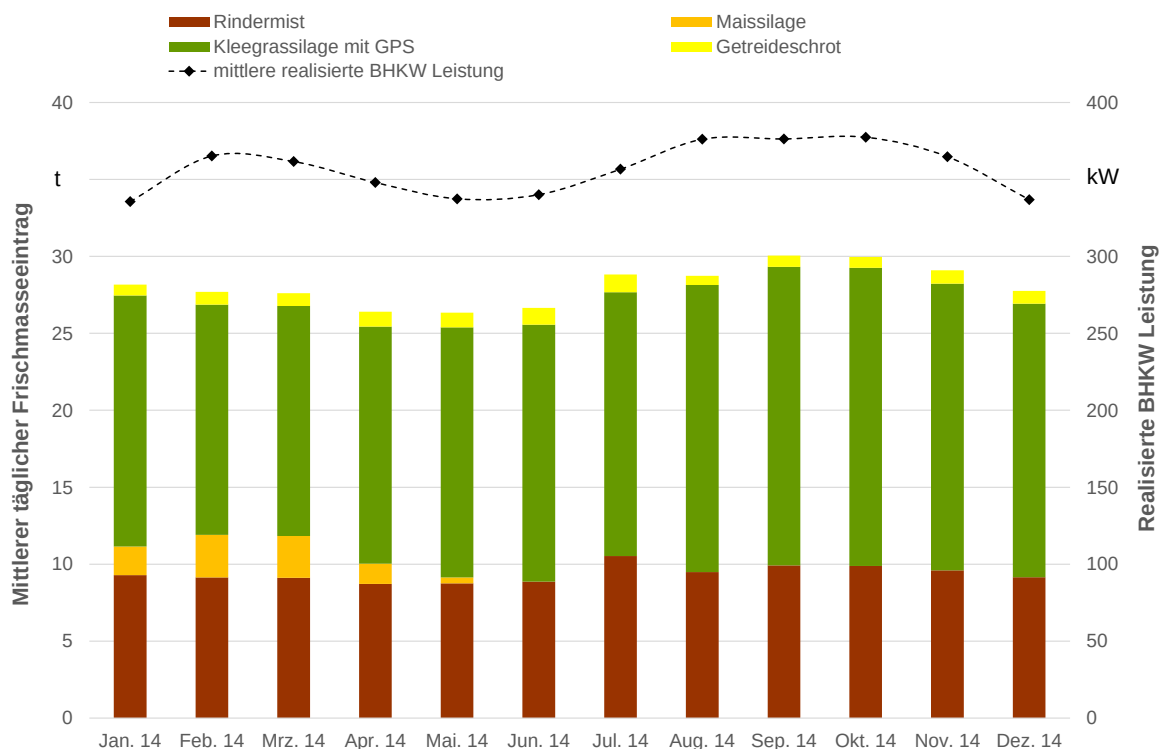


Abbildung 70: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #16

Aufgrund des hohen TS-Gehaltes in den Gärbehältern war der Strombedarf für das Rühren und Pumpen des hochviskosen Gärgemischs in Anlage #16 relativ hoch. Der gesamte anteilige Strombedarf der Anlage lag auch im Monatsmittel immer deutlich über 10 %, davon etwa 1/3 für die BHKW und 2/3 für die restlichen Anlagenkomponenten. Während BHKW 1 mit hoher Nennzeit betrieben wurde, wurde BHKW 2 abhängig von der Gasproduktion immer wieder abgeschaltet. Dementsprechend schwankte auch der Strombedarf für BHKW 2 von Monat zu Monat deutlich stärker als für BHKW 1 (Abbildung 71).

Hochpunkte im Jahresverlauf des Strombedarfs der Anlage sind auf das Ausbringen von Gärrest zurückzuführen. Der Gärrest hat für diesen ökologisch wirtschaftenden Pilotbetrieb #16 einen besonders hohen Stellenwert, da er den einzigen mobilen Dünger darstellt, um die angebauten Feldfrüchte bedarfsorientiert zu düngen. Zur Vermeidung einer Entmischung des Gärrests wurden die beiden Tauchmotorrührwerke im Gärrestlager während der Ausbringzeit auf Dauerbetrieb gestellt. In Verbindung mit dem Betrieb der leistungsstarken Kreislumpumpe in der Fassfüllstation stieg der Eigenstrombedarf der Anlage damit deutlich an. Der Großteil des Gärrests wurde in den Monaten April und Mai zur Düngung der Getreidebestände und nach der Getreideernte zur Förderung der Strohrotte sowie der Andüngung der Zwischenfrucht ausgebracht. Nach der Gärrestausbringung wurde das Gärrestlager eine Zeitlang nicht gerührt, da die niedrigen Füllstände im Behälter die Rührwerke nicht überdeckten. Der Anstieg des Strombedarfs in den Monaten November und Dezember kann auf den Vollastbetrieb der Heizungspumpen für die Fernwärme und die Beheizung der Gärbehälter zurückgeführt werden.

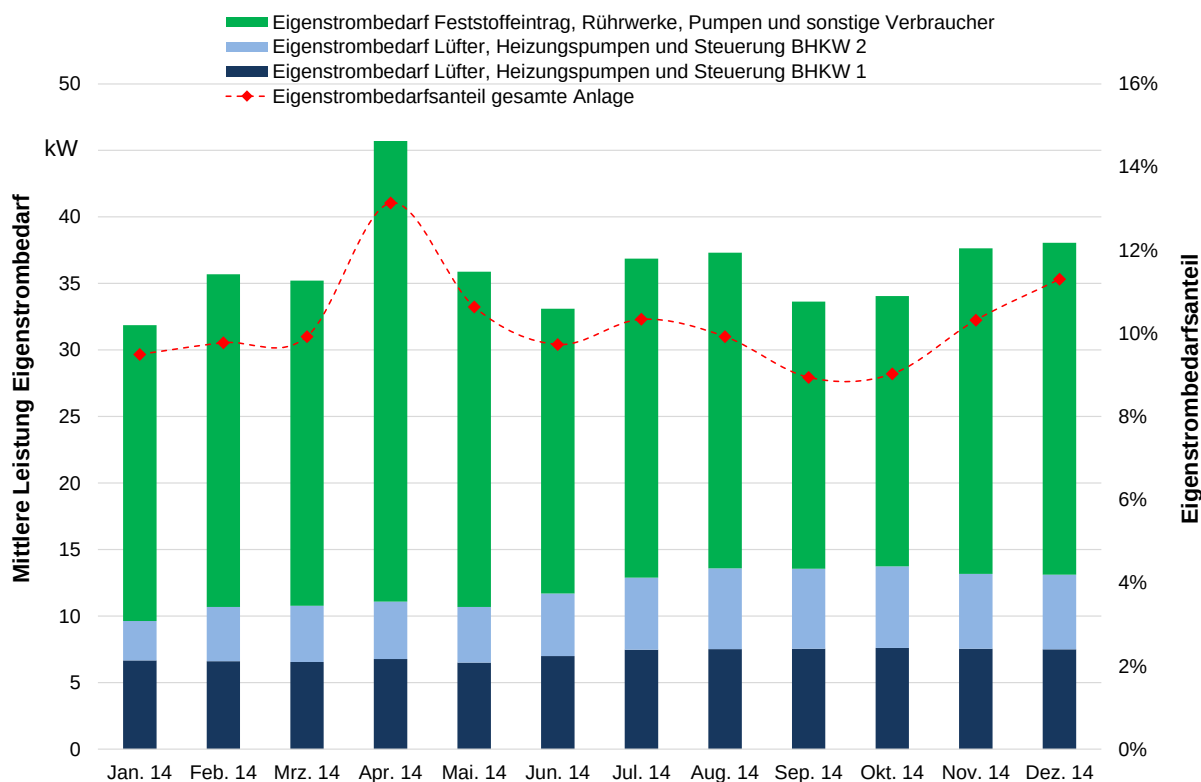


Abbildung 71: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #16

Den größten Wärmeabnehmer dieser Anlage stellt das etwa 1000 Meter Luftlinie entfernte Schloss dar, zu dessen Gut der landwirtschaftliche Betrieb gehört. Um dessen hohen Wärmebedarf im Winter zu decken, ist zusätzlich ein Holzhackschnitzelheizwerk an das Wärmenetz angeschlossen. Ein Teil der Differenz zwischen genutzter Wärmemenge und Wärmeleistung der BHKW ist auf Leitungsverluste zurückzuführen. Ein kleinerer Anteil der BHKW-Wärme wird an die Gebäude des landwirtschaftlichen Gutsbetriebs abgegeben (Abbildung 72).

Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 16 bei 9,1 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $27,3 \text{ kWh t}^{-1}$.

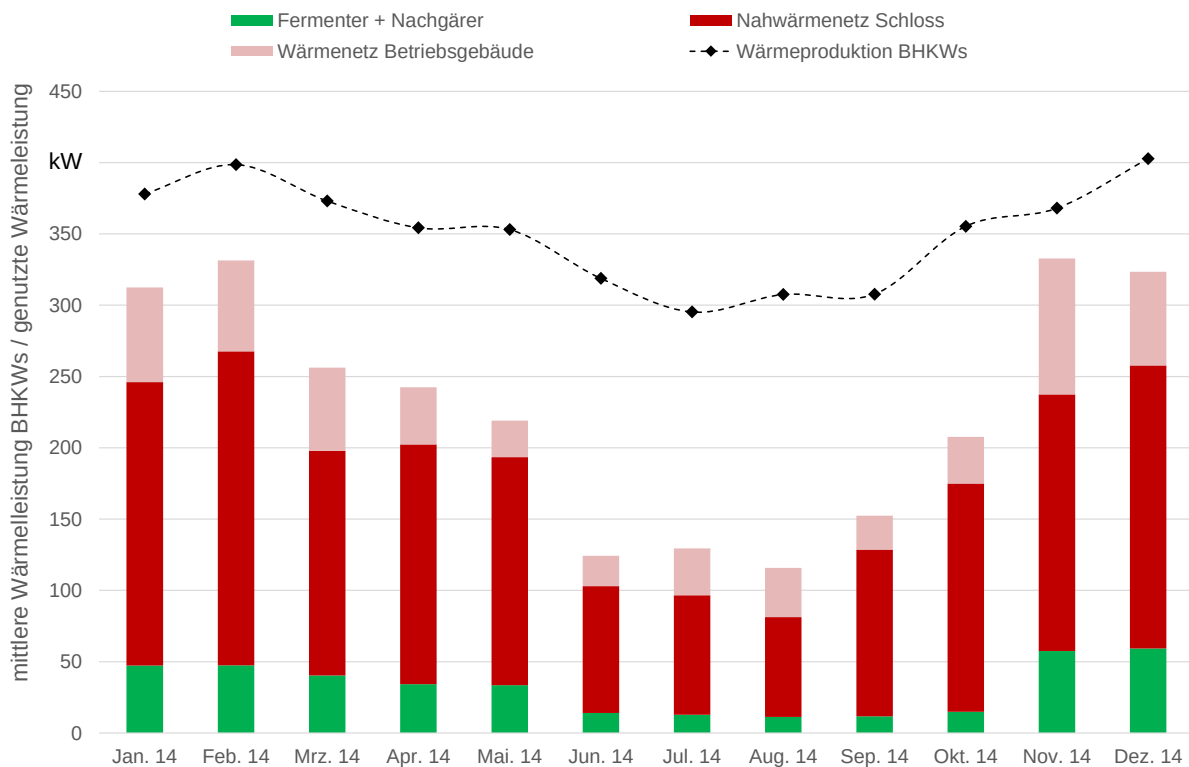


Abbildung 72: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb 16

4.1.6 Pilotanlage 22

Als technische Besonderheiten dieser neu in das Monitoring aufgenommenen Anlage sind die auf thermophilem Temperaturniveau betriebenen Hochfermenter mit hydraulischer Durchmischung und die fehlende Nachgärstufe hervorzuheben.

4.1.6.1 Einsatzstoffe

Dieser Milchvieh mit Nachzucht und Bullen haltende Betrieb hat eine Biogasanlage erworben, deren zwei Hochfermenter mit hydraulischer Durchmischung laut Hersteller speziell auf die Verwertung von Gülle ausgelegt sind. Diese machte knapp 80 % der Frischmasse der Einsatzstoffe aus. Hinzu kamen neben 3 % Rindermist 13 % Maissilage und weitere sechs pflanzliche Einsatzstoffe mit geringen Massenanteilen (Abbildung 61). Änderungen der Einsatzstoffmischung im Jahresverlauf beschränkten sich auf die letztgenannten Substrate. Im Winter 2014 wurden erstmals Zuckerrüben eingesetzt (Abbildung 74).

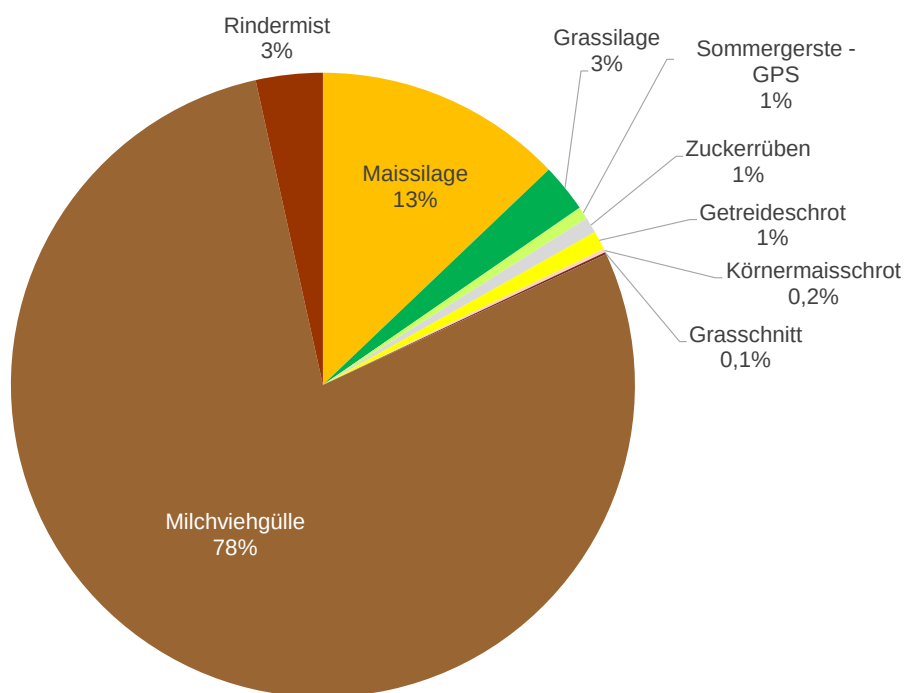


Abbildung 73: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #22 im Jahresmittel 2014

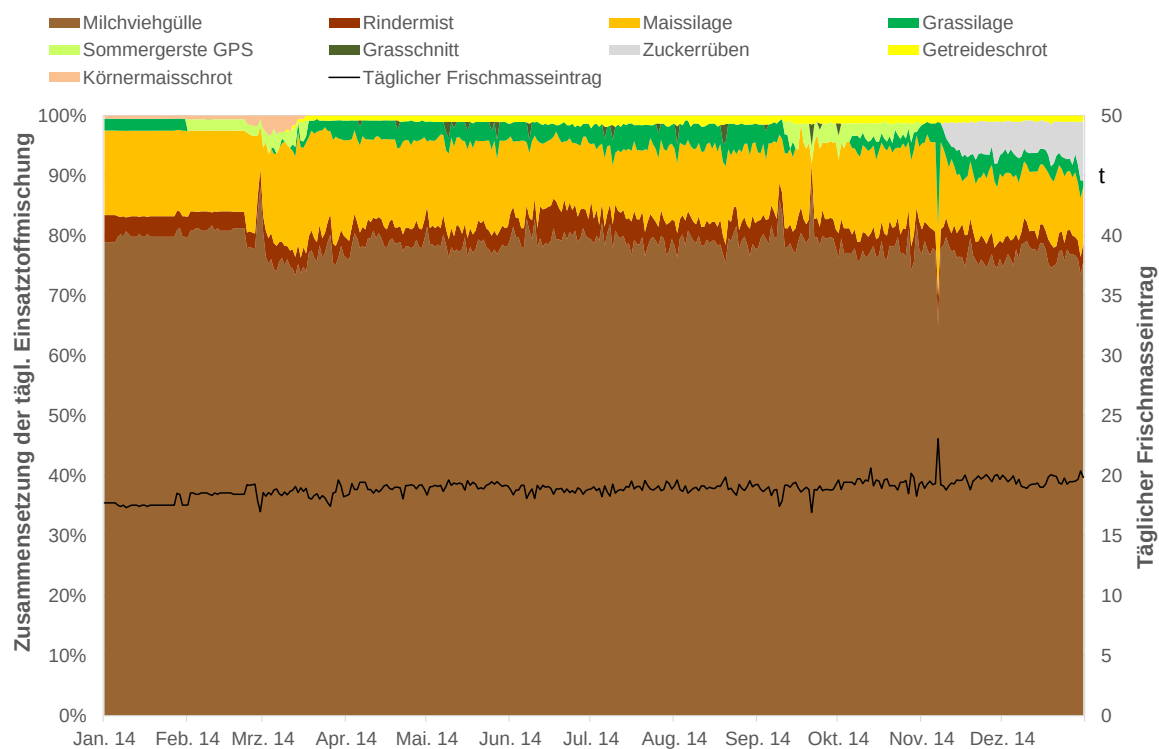


Abbildung 74: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #22 (tägliche Auflösung)

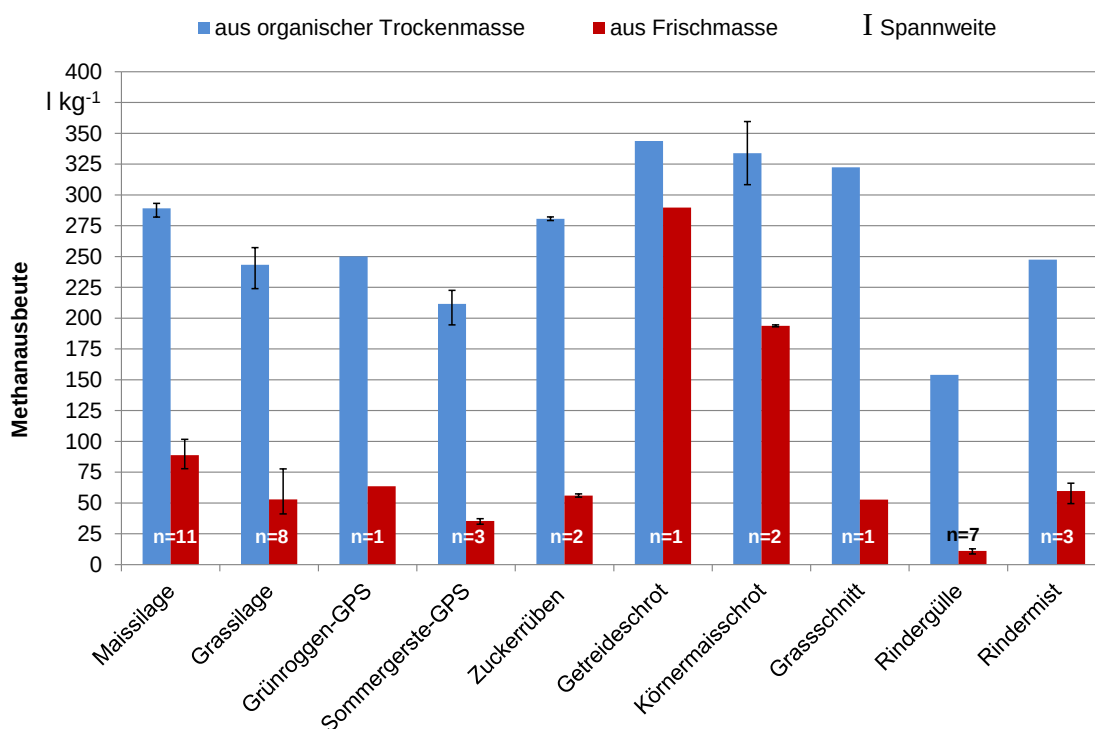


Abbildung 75: Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #22

4.1.6.2 Prozessparameter

Hinsichtlich der Werte der hier betrachteten gängigen Prozessindikatoren fallen deutliche Unterschiede in der Konzentration der flüchtigen Fettsäuren zwischen den beiden Hauptgärbehältern auf. Dieser Umstand ist ungewöhnlich, da beide Fermenter nach dem Beschiebungskonzept der Anlage mit einer organischen Raumbelastung von im Mittel $10,1 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ gleichermaßen beschickt wurden.

Wie in Abbildung 76 zu sehen, lagen die Gesamt-Essigsäureäquivalente in Proben aus Fermenter 1 im ersten Halbjahr trotz der hohen Raumbelastung unter 800 mg L^{-1} , bis Oktober stiegen diese dann bis auf knapp 2400 mg L^{-1} an. Der FOS/TAC-Wert nahm von einem Niveau von 0,3 bis auf ca. 0,6 zu. Die Konzentration der Propionsäure stieg zwar ebenfalls deutlich an, blieb jedoch auch in der Probe vom Oktober unter 1000 mg L^{-1} . Da ab November alle Werte stark zurückgingen, kam es zu keiner Destabilisierung der Gärbiologie. Es wird angenommen, dass der deutliche Anstieg der Fettsäuren zu einem Großteil auf den Einsatz eines anderen Spurenelementadditives in diesem Zeitraum zurückzuführen ist. Die Entwicklung der Prozessindikatoren im Fermenter 2 verhielt sich ähnlich, allerdings auf einem viel höheren Niveau. In Proben aus diesem Gärbehälter wurden von August bis Oktober die Richtwerte der hier betrachteten Prozessindikatoren deutlich überschritten (Abbildung 77). Zugleich wurde ein geringfügig höherer Druck in der Zirkulationspumpe für das hydraulische Durchmischen gemessen, als in Fermenter 1. Dies deutet auf eine schlechtere Abbauleistung der Gärbiologie in Fermenter 2 hin, deren Gründe auf Basis der verfügbaren Informationen jedoch nicht geklärt werden konnten.

Den Hauptgärbehältern wurde durchgängig ein Eisen-(II)-Präparat zur Entschwefelung sowie ein Spurenelementpräparat zugesetzt. Der deutliche Rückgang der Prozessindikatorwerte ab November fiel mit dem Beginn des Einsatzes von Zuckerrüben zusammen (Abbildung 74).

Die in Abbildung 78 dargestellten stichprobenartig ermittelten Fettsäuren des Gärgemisches im Gärrestlager zeigen, dass ein zum Teil relativ hoher Anteil der in den Fermentern gemessenen Fettsäuren aufgrund der kurzen Verweilzeit von wenigen Tagen noch nicht abgebaut wurde.

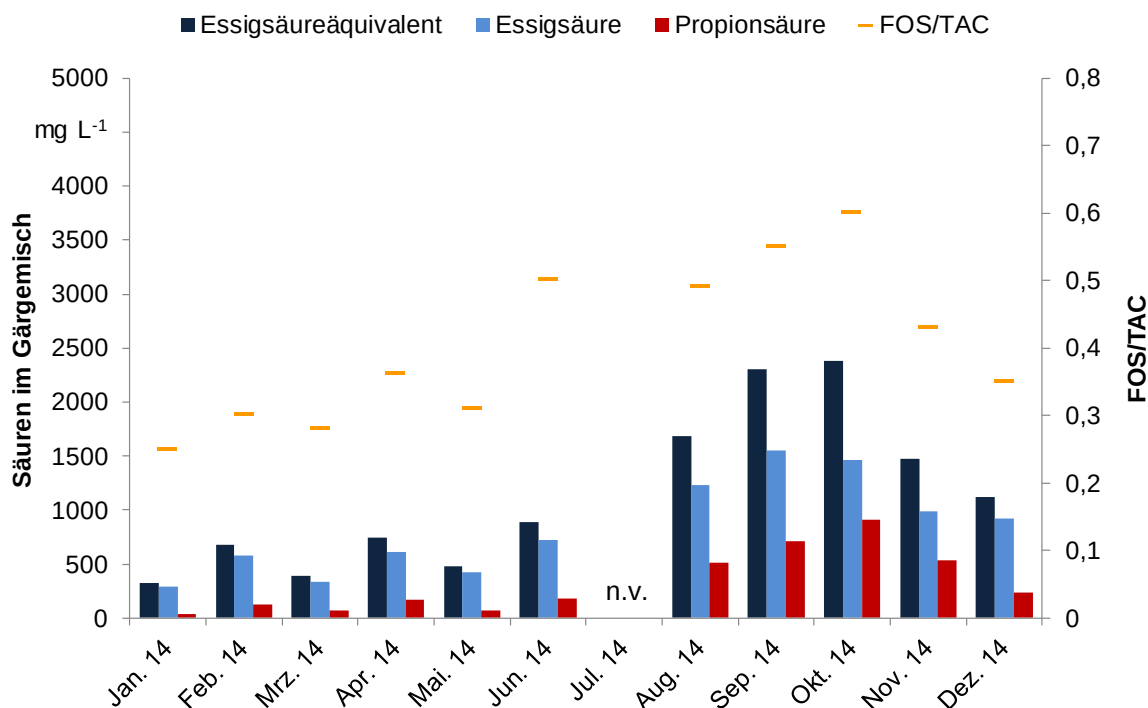


Abbildung 76: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter 1 von Pilotanlage #22

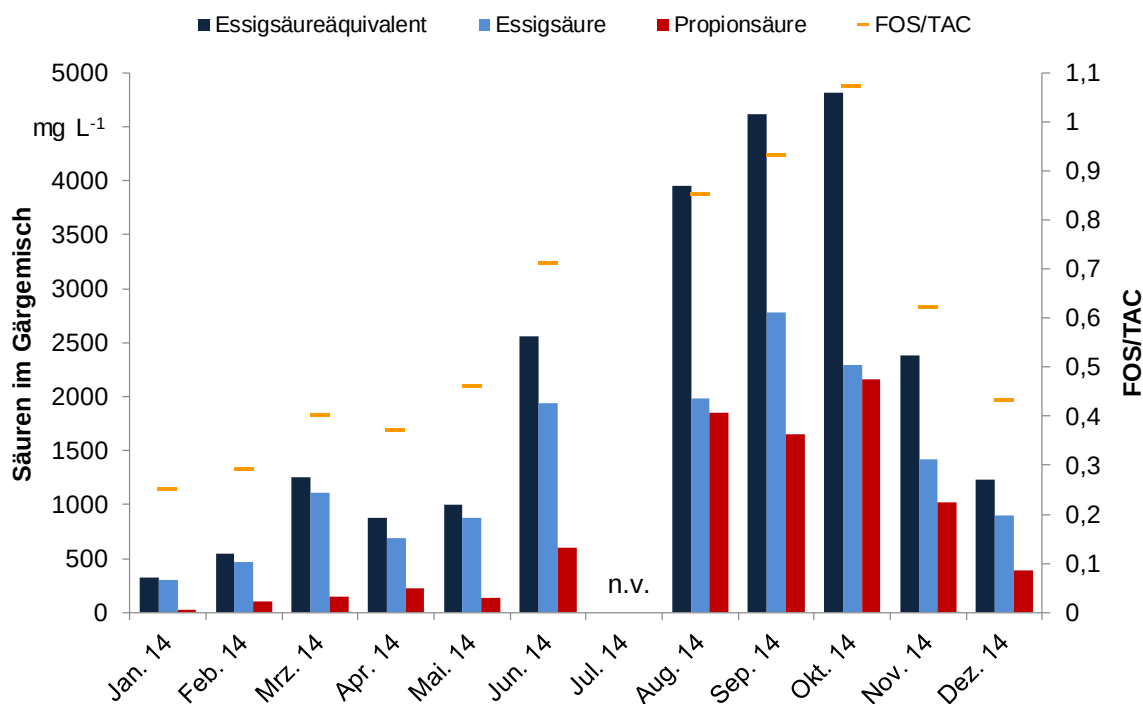


Abbildung 77: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter 2 von Pilotanlage #22

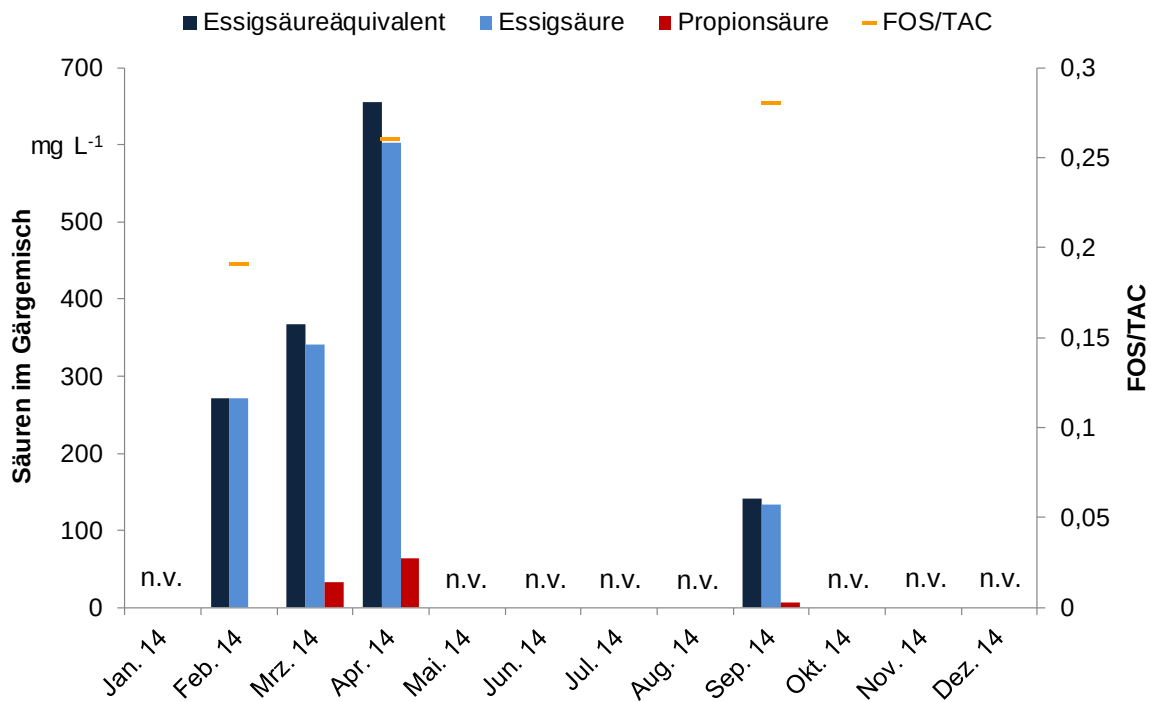


Abbildung 78: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Gärrestlager von Pilotanlage #22

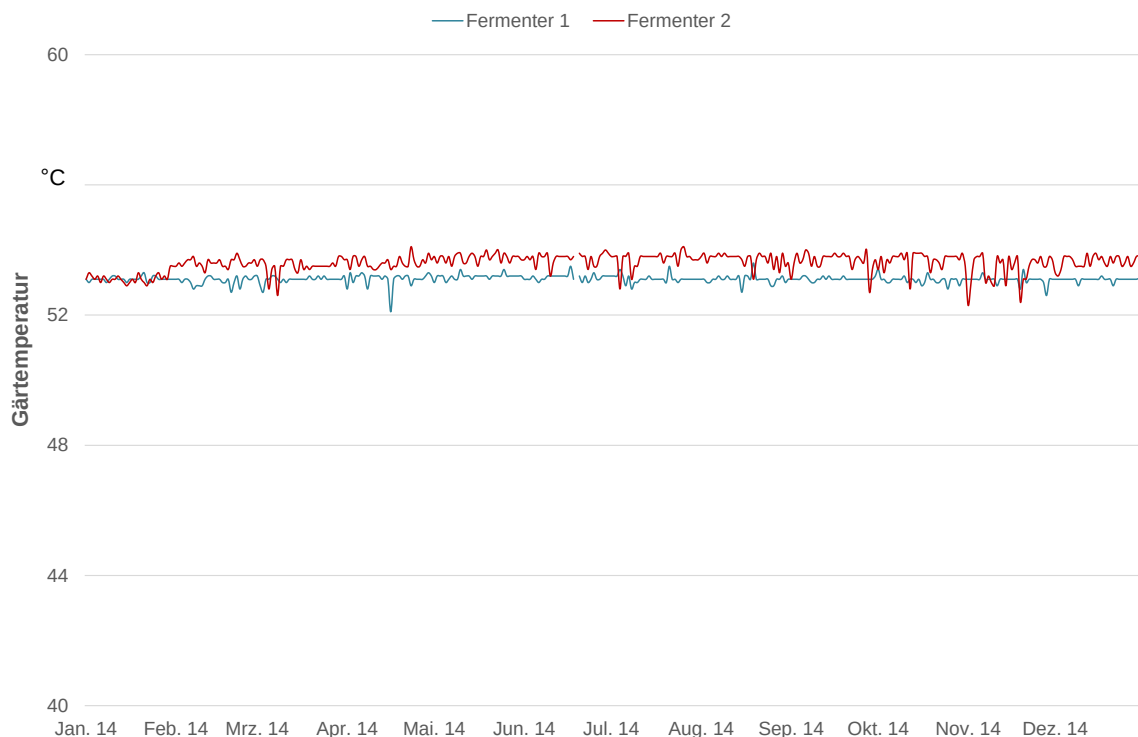


Abbildung 79: Verlauf der Gärtemperatur in den Hauptgärbehältern 1 und 2 der Pilotanlage #22

Die Temperaturen in beiden Hauptgärbehältern schwankten im Jahresverlauf nur sehr geringfügig, wobei der Mittelwert in Fermenter 2 etwa ein halbes Grad über dem von Fermenter 1 lag (Abbildung 79).

4.1.6.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 22 verfügt über ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 103 kW. Die Laufzeit des BHKW im Jahr 2014 betrug 8701 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit des BHKW von 99,3 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,8 Stunden pro Tag. Über das Jahr hinweg erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 37,2 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf insgesamt 8760 Stunden des Jahres belief sich auf 102 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von knapp 103 kW, d. h. praktisch immer auf Volllast betrieben (Abbildung 80).

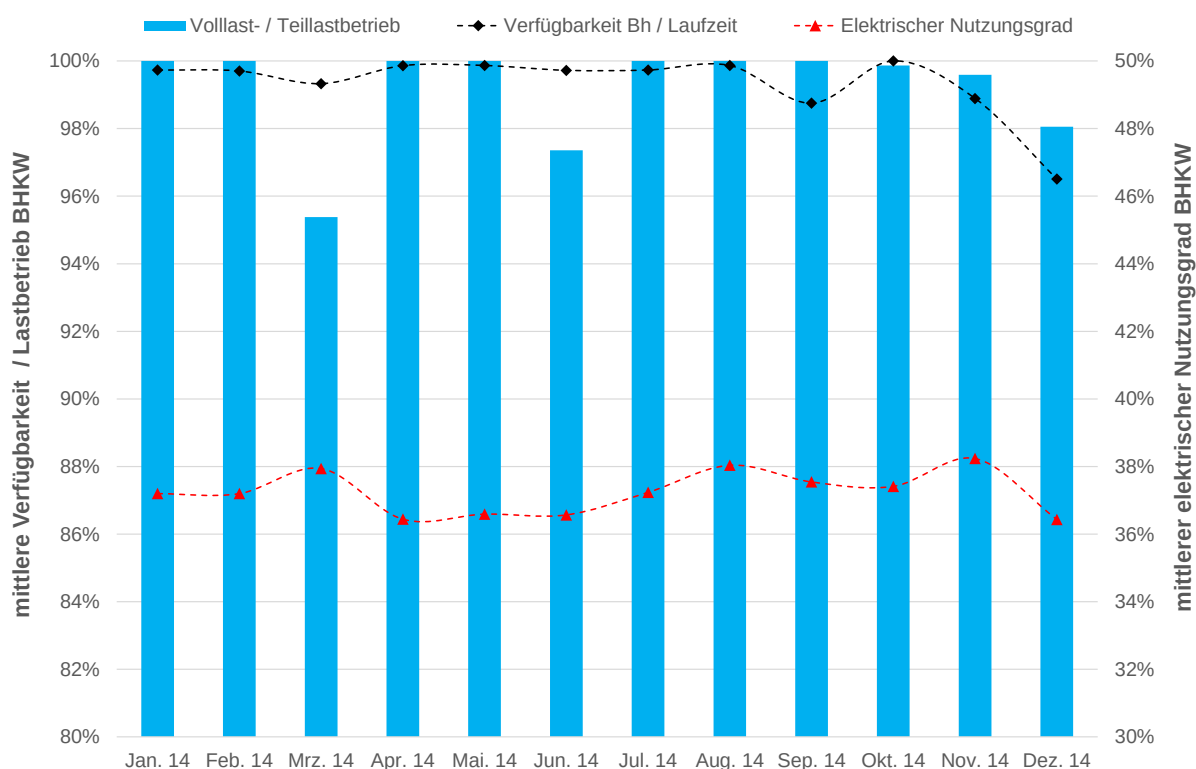


Abbildung 80: Monatsmittelwerte der Verfügbarkeit, der Last und des elektrischen Nutzungsgrades für das BHKW von Pilotanlage #22

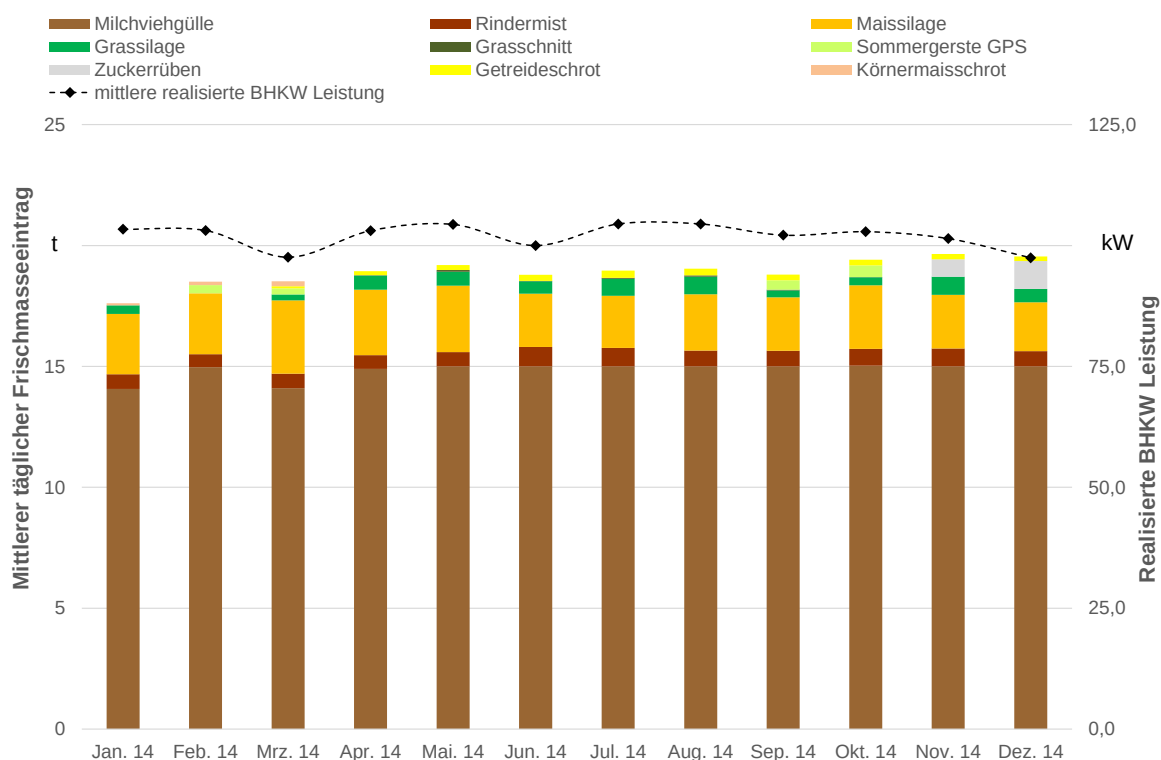


Abbildung 81: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #22

Der Verlauf des absoluten und anteiligen Eigenstromverbrauchs von Pilotanlage 22 weist erkennbare saisonale Schwankungen auf. Der niedrigste Eigenstromverbrauch wurde in den Monaten November und Dezember gemessen, die höchsten Werte in den Monaten Juni bis August (Abbildung 82 und Abbildung 71). Der erhöhte Stromverbrauch in den Sommermonaten resultierte aus dem Betrieb des leistungsstarken Lüfters der Trocknungsanlage, aber auch des BHKW-Notkühlers. Die Stromverbrauchsmaxima der Pump-/Rührtechnik in den Monaten April und Oktober wurden durch den Betrieb des Rührwerks im Gärrestlager vor und während der Ausbringung von Gärrest verursacht. In den Monaten November und Dezember war das Rührwerk im Gärrestlager wegen des niedrigen Füllstands nicht in Betrieb.

Durch den Einsatz von Zuckerrüben mit einem mittleren Massenanteil von 25 % an den pflanzlichen Einsatzstoffen im November und Dezember sank der TS-Gehalt im Gärgemisch von vorher durchschnittlich 9,2 % auf 8,3 %. Besonders bei der Zirkulationspumpe von Fermenter 2, welche im Jahresverlauf immer einen um 5 % höheren Pumpendruck und dementsprechend auch höheren Stromverbrauch als die Zirkulationspumpe von Fermenter 1 zeigte, führte dies zu einem verringerten Pumpendruck und einem 12 % geringeren Stromverbrauch im Mittel des Monats Dezember. Im Vergleich der Anlagen war der Strombedarf der Feststoffeintragstechnik in Anlage 22 außergewöhnlich hoch (Abbildung 83). Dieser wurde zu 60 % durch den als Futtermischer ausgeführten Feststoffdosierer verursacht.

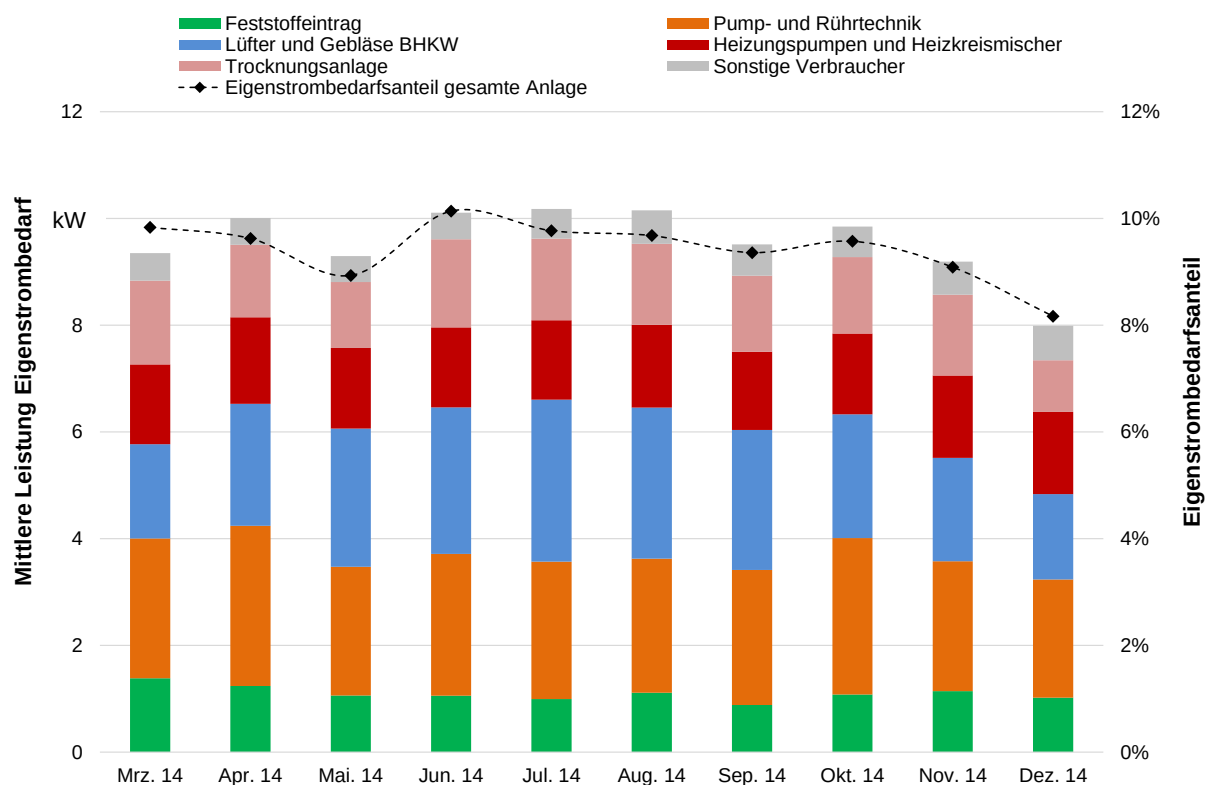


Abbildung 82: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #22

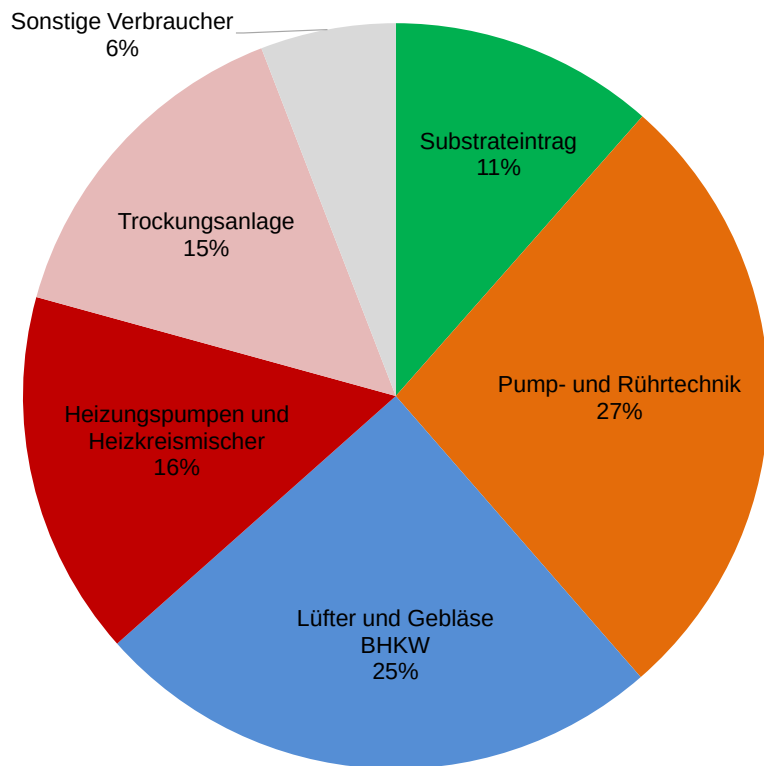


Abbildung 83: Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #22 im Jahresmittel 2014

Die Anlage weist einen hohen Nutzungsanteil der erzeugten BHKW-Wärme auf. Während in den Wintermonaten ein Großteil der erzeugten Wärmemenge in erster Linie in ein Nahwärmenetz mit Anschluss von vier Mehrfamilienhäusern eingespeist wurde, wurde die BHKW-Wärme im Sommer zur Trocknung von Druschfrüchten, Holzhackschnitzeln und Scheitholz genutzt. Der Wärmebedarf der Anlage war über die Jahreszeiten hinweg relativ konstant, da große Mengen an Milchviehgülle auf eine Gärtemperatur von 53°C erwärmt werden müssen (Abbildung 84).

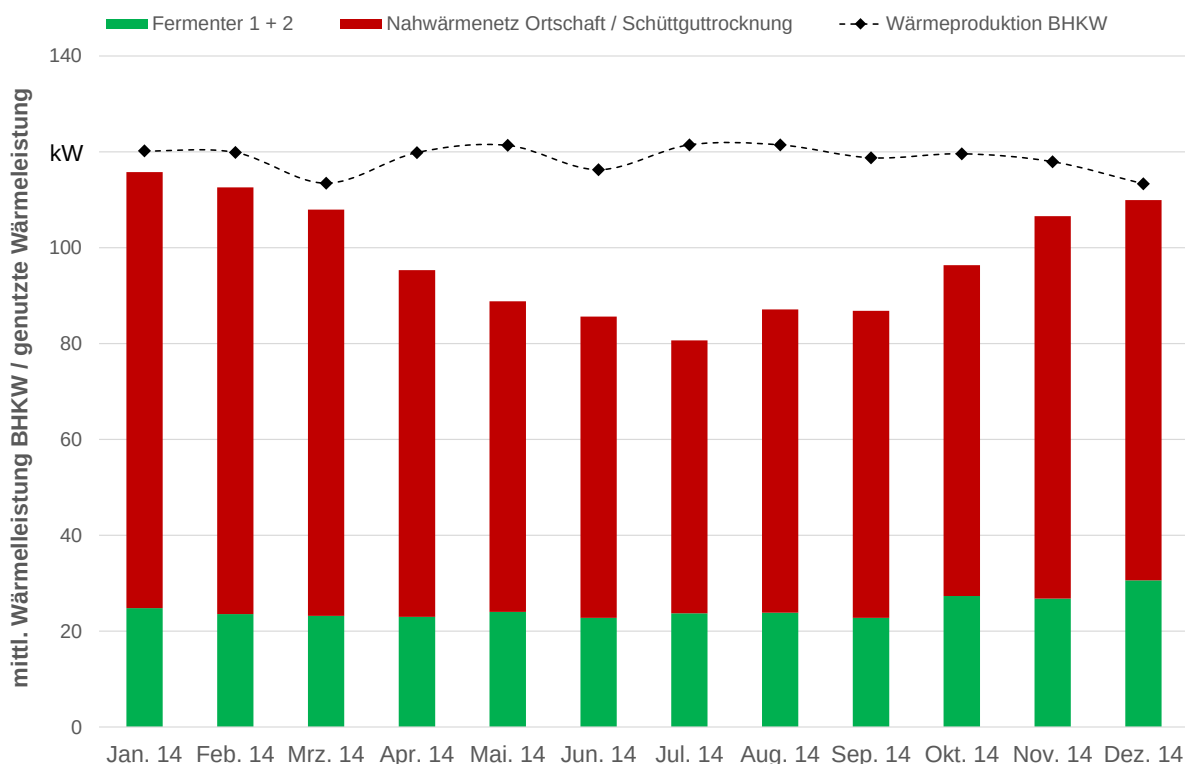


Abbildung 84: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #22

Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 22 bei 21,7 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $32,7 \text{ kWh t}^{-1}$.

4.1.7 Pilotanlage 23

Besonderes Merkmal dieser neu in das Monitoring aufgenommenen Anlage sind der thermophil betriebene, liegende Fermenter – ausgeführt als Kompaktmodul im Container mit integriertem BHKW. Dem Fermenter sind ein Nachgärer und zwei zur Atmosphäre hin offene Gärrestlager nachgeschaltet.

4.1.7.1 Einsatzstoffe

Auch dieser Betrieb setzte in seiner Biogasanlage überwiegend Gülle, in diesem Fall von Mastschweinen ein. Dieses Anlagenkonzept ist laut Hersteller speziell auf hohe Anteile von Gülle in der Einsatzstoffmischung ausgelegt, setzt hierbei jedoch auf einen liegenden Fermenter. Maissilage hatte immerhin einen Massenanteil von 21 %, die restlichen drei Einsatzstoffe waren mengenmäßig unbedeutend (Abbildung 85). Der Frischmasseeintrag

pro Tag schwankte in dieser Anlage sowohl im Jahresverlauf, als auch von Tag zu Tag auffällig stark (Abbildung 86). Aufgrund der Umbaumaßnahmen im Zuge der Anlagenerweiterung wurde im Dezember einige Tage nicht gefüttert.

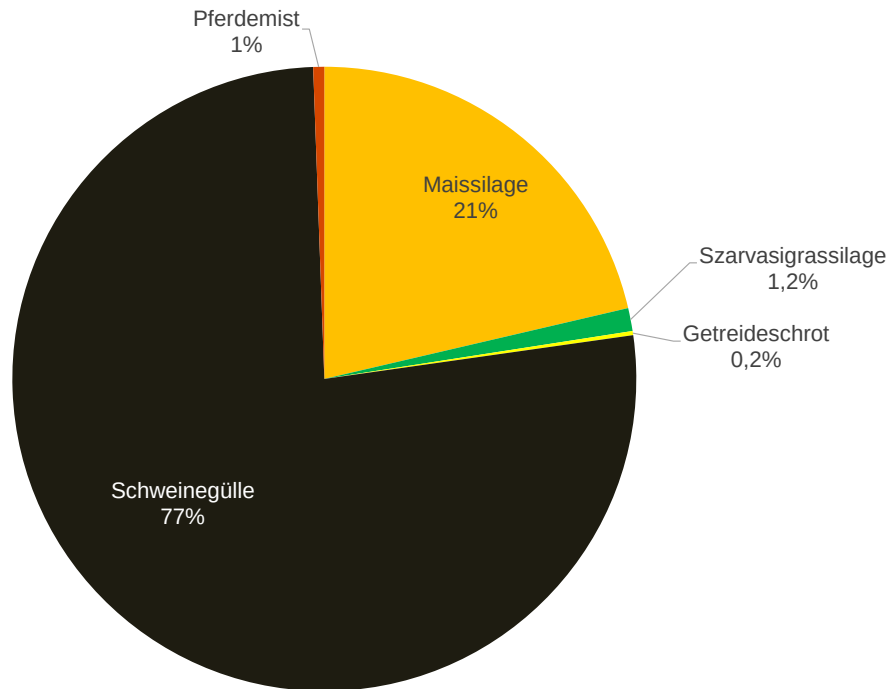


Abbildung 85: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #23 im Jahresmittel 2014

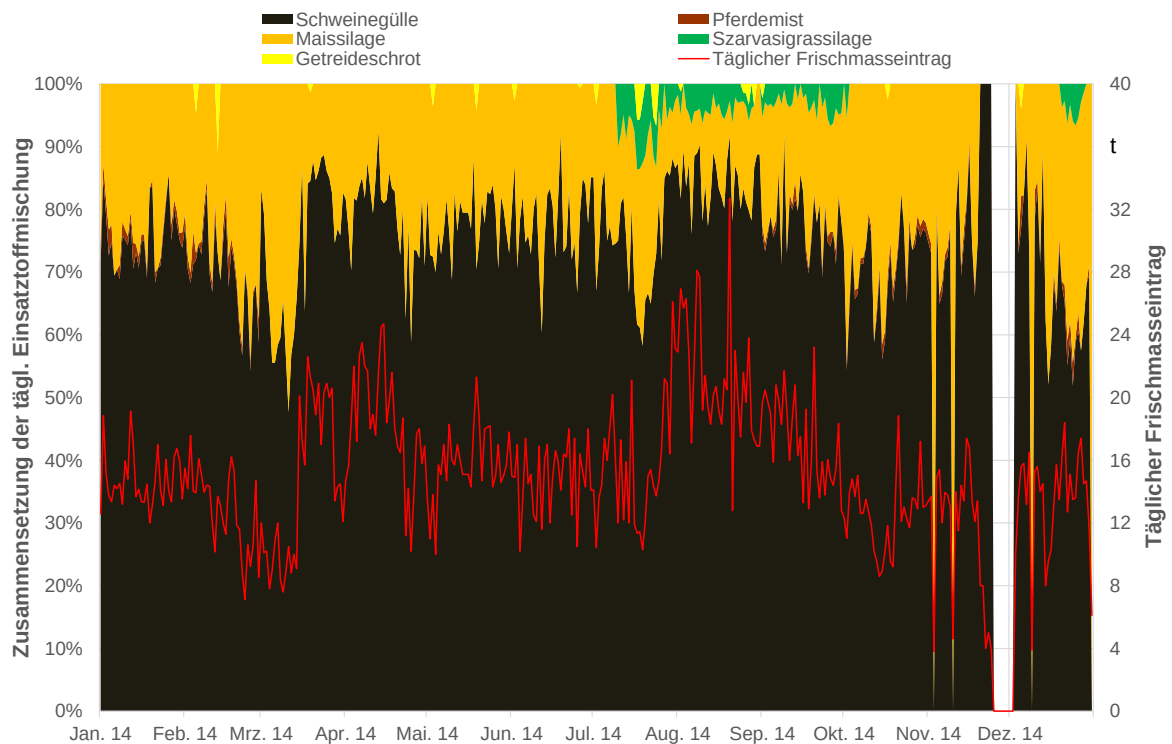


Abbildung 86: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #23 (tägliche Auflösung)

4.1.7.2 Prozessparameter

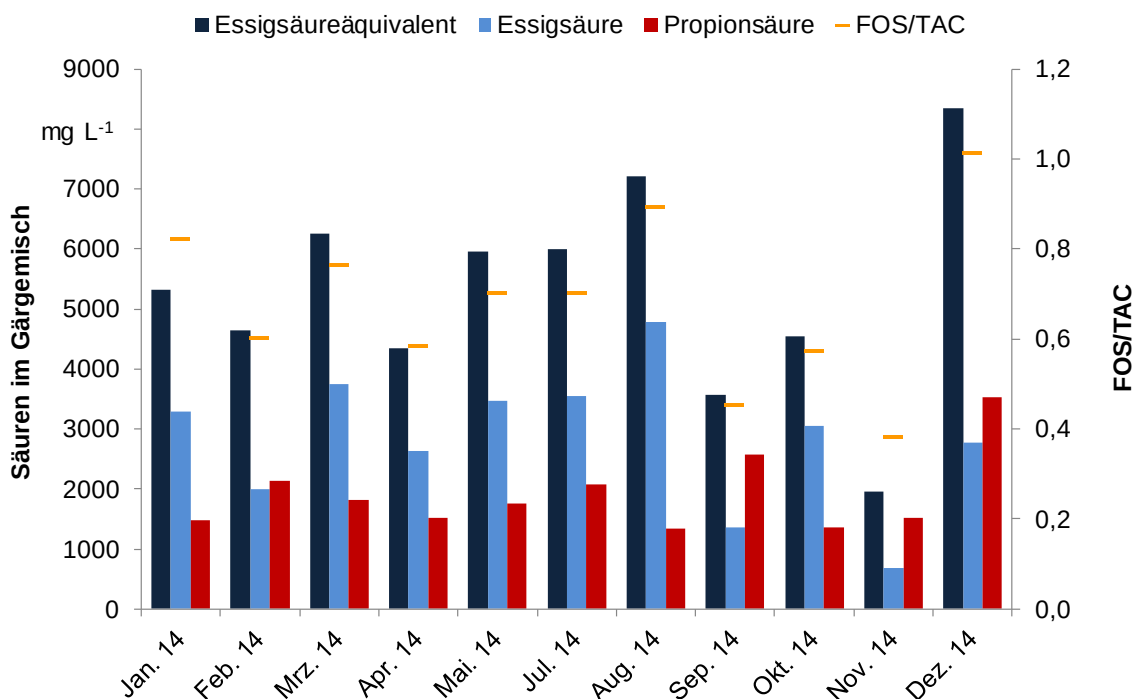


Abbildung 87: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Hauptgärbehälter von Pilotanlage #23

Die in Abbildung 87 betrachteten flüchtigen Fettsäuren lagen im Fermenter im Jahresmittel als Gesamt-Essigsäureäquivalent bei knapp 5300 mg L^{-1} . Die Propionsäurekonzentration lag in allen Proben oberhalb von 1000 mg L^{-1} und war teilweise deutlich höher als die Essigsäurekonzentration. Der FOS/TAC-Wert schwankte von Monat zu Monat in einem weiten Bereich von 0,4 bis 1,0. Insgesamt deuteten die hier betrachteten Prozessindikatoren auf einen zeitweise kritischen Zustand der Gärbiologie im Hauptgärbehälter von Anlage 23 hin. Ein Grund hierfür dürfte in der von Tag zu Tag stark schwankenden Eintragsrate zu finden sein (Abbildung 86).

Ebenfalls deutliche Schwankungen wiesen die gemessenen Gärtemperaturen auf (Abbildung 89), was insbesondere auf thermophilem Temperaturniveau einen erheblichen Risikofaktor für die Stabilität der Gärbiologie darstellt. Die Aufzeichnungslücke Ende November/Anfang Dezember und der deutliche Temperaturabfall gehen auf den Anlagenumbau zurück, bei welchem der Fermenter vollständig und der Nachgärer zur Hälfte entleert wurden und anschließend wieder angefahren werden mussten.

Aus dem Nachgärbehälter von Anlage 23 konnten insgesamt nur vier Proben gewonnen werden, da die Probenahme aus dem Überlauf in das Gärrestlager nur dann möglich war, wenn dieses weitgehend leer war. In drei dieser vier Proben war die Konzentration flüchtiger Fettsäuren sehr gering, im Oktober deutlich erhöht, jedoch absolut gesehen im unkritischen Bereich (Abbildung 88).

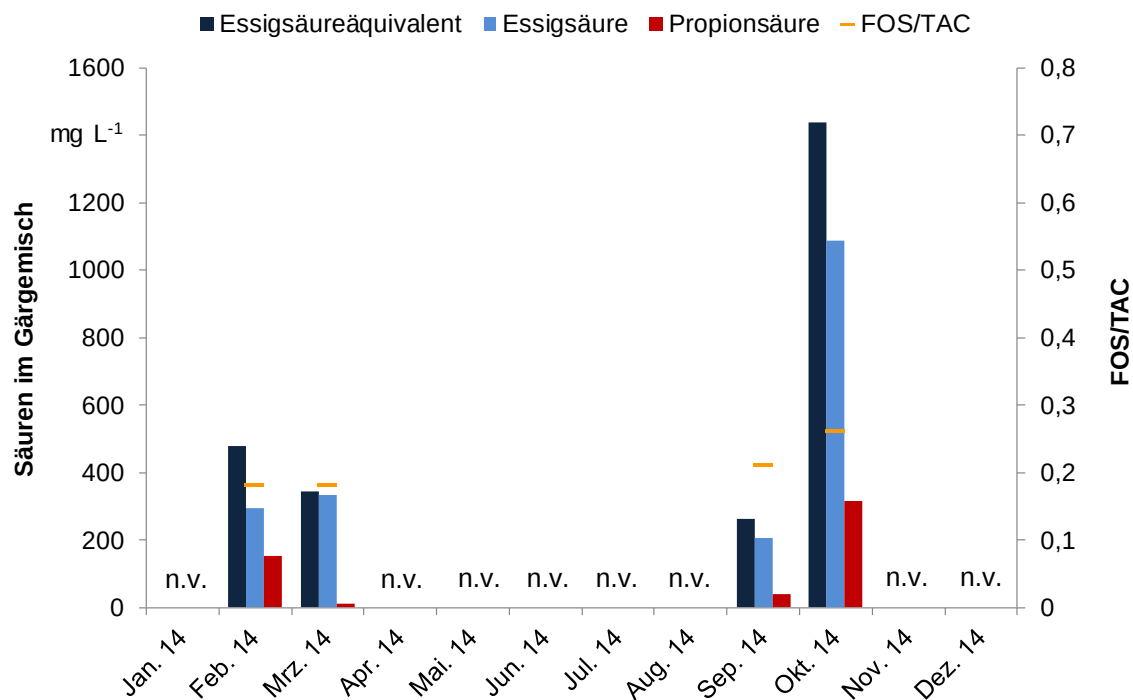


Abbildung 88: Konzentration flüchtiger Fettsäuren und FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #23

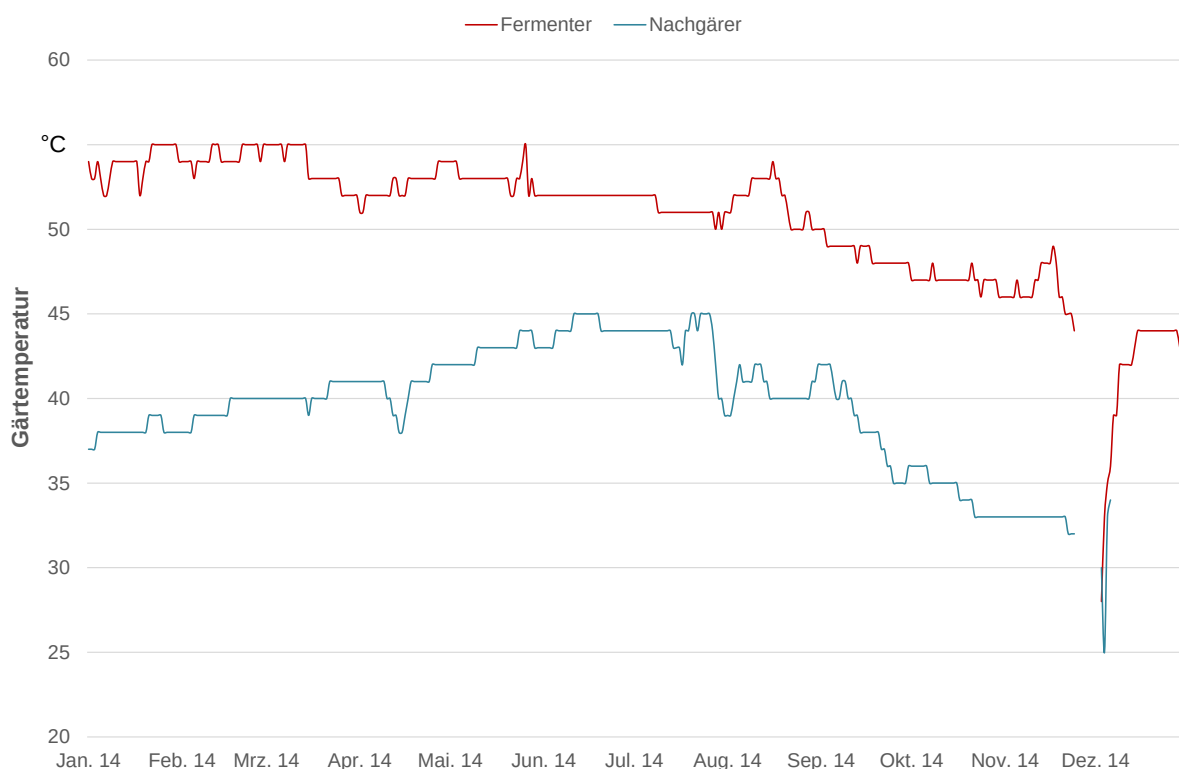


Abbildung 89: Verlauf der Gärtemperatur im Fermenter und Nachgärer der Pilotanlage #23

4.1.7.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 23 verfügt über ein Zündstrahl-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 75 kW. Die Laufzeit des BHKW im Jahr 2014 betrug 8231 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit des BHKWs von 93,9 % oder einer mittleren Laufzeit von 22,6 Stunden pro Tag. Während die mittlere Verfügbarkeit des BHKW in den Monaten Januar bis Oktober oberhalb 95 % lag, wurde im November und Dezember ein Umbau der Biogasanlage durchgeführt, bei dem auch das BHKW ausgetauscht wurde (Abbildung 90). Der ursprüngliche Motor wurde gegen einen größeren Zündstrahlmotor mit einer elektrischen Nennleistung von 250 kW ersetzt. Mit dem um den Faktor drei leistungsstärkeren Motor soll ein 12 h-Intervallbetrieb zur bedarfsgerechten Stromerzeugung umgesetzt werden.

Das ursprünglich vorhandene Zündstrahl BHKW mit $P_{el} = 75$ kW erzielte einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 35,6 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf die ersten zehn Monate des Jahres belief sich auf 72 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 73 kW betrieben, das entspricht nahezu Volllastbetrieb (98 % des Nennwertes). Der mittlere Zündölanteil lag für dieses BHKW bei 4,6 %. Demnach wurden 68,8 kW elektrische Leistung aus Biogas und 3,3 kW aus Zündöl erzeugt. Die beiden kleinen Einbrüche in der BHKW-Verfügbarkeit sind auf einen Riss der Gasspeicherhaube auf dem Nachgärer im Mai bzw. auf Stillstandszeiten in Folge eines Netzfehlers und Gasmangels zurückzuführen (Abbildung 90).

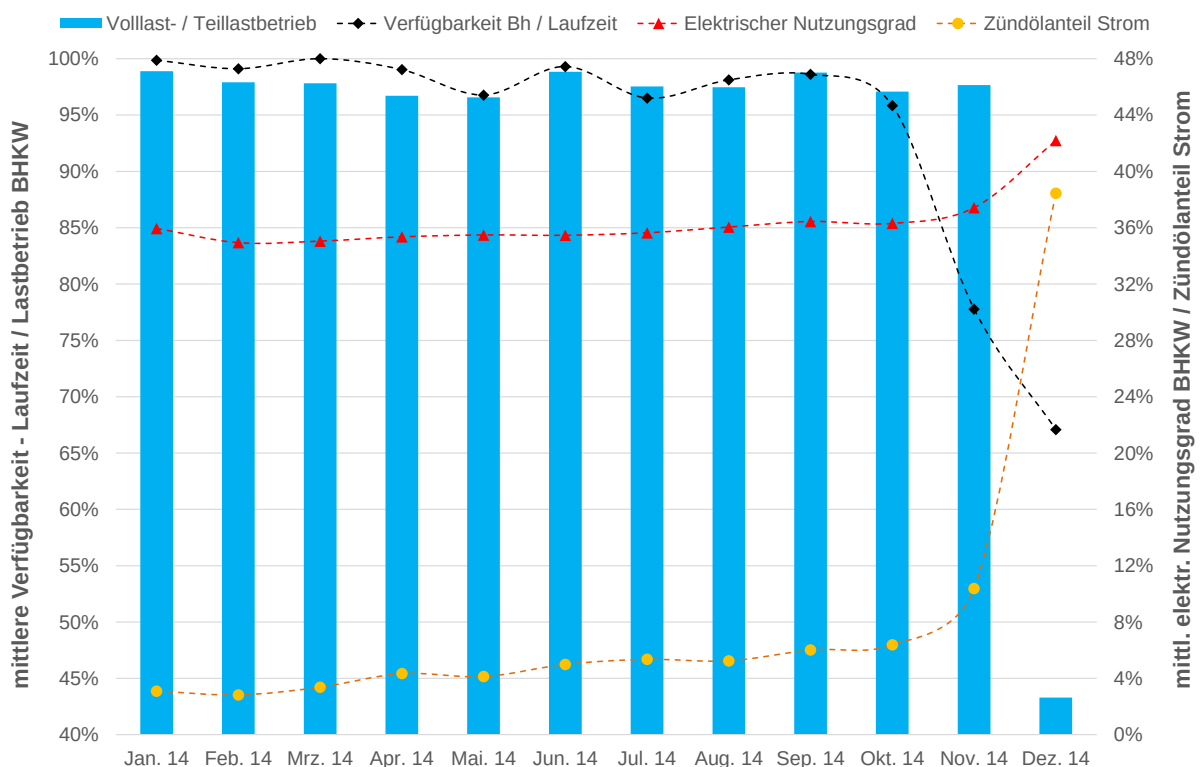


Abbildung 90: Verfügbarkeit, Lastbetrieb und elektrischer Nutzungsgrad des BHKW ($P_{el} = 75 / 250$ kW) der Pilotanlage #23

Da bei der Umbaumaßnahme auch die Gärbehälter zum größten Teil entleert wurden, mussten diese nach Abschluss der Baumaßnahmen durch Zündölbetrieb des neuen BHKW erst wieder auf Gärtemperatur gebracht werden. Erst in der zweiten Dezemberhälfte erzeugte die Biogasanlage wieder Gas, das im BHKW verwertet werden konnte.

Betrachtet man die realisierte elektrische BHKW-Leistung im Zusammenhang mit dem Einsatzstoffmassen, zeigt sich der geringe Einfluss der sehr dünnflüssigen Schweinegülle auf den Biogasertrag (Abbildung 91). Die deutlich geringere Fütterung im November und Dezember resultierte aus dem oben erwähnten Anlagenumbau, für den der Fermenter entleert wurde. Hierdurch ging die Biozönose komplett verloren, der Hauptgärbehälter musste neu angefahren werden.

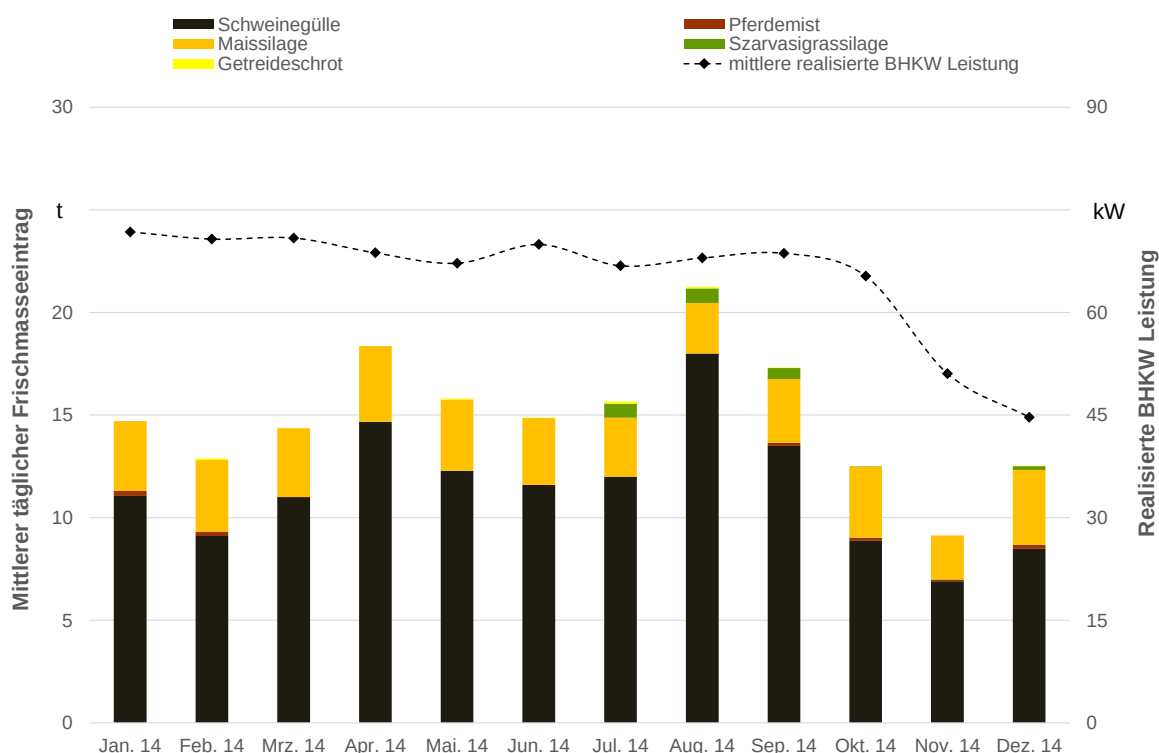


Abbildung 91: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #23

Der Strombedarf von Anlage 23 variierte im Jahresverlauf relativ wenig - hauptsächlich in Abhängigkeit von den Rührzeiten und dem Füllstand der Vorgrube - , ging jedoch bedingt durch den Anlagenumbau im November und Dezember deutlich zurück (Abbildung 92). Der Hochpunkt im August resultierte aus den überdurchschnittlich hohen Einsatzmengen von Schweinegülle, so dass mehr gerührt und geheizt werden musste (Abbildung 91).

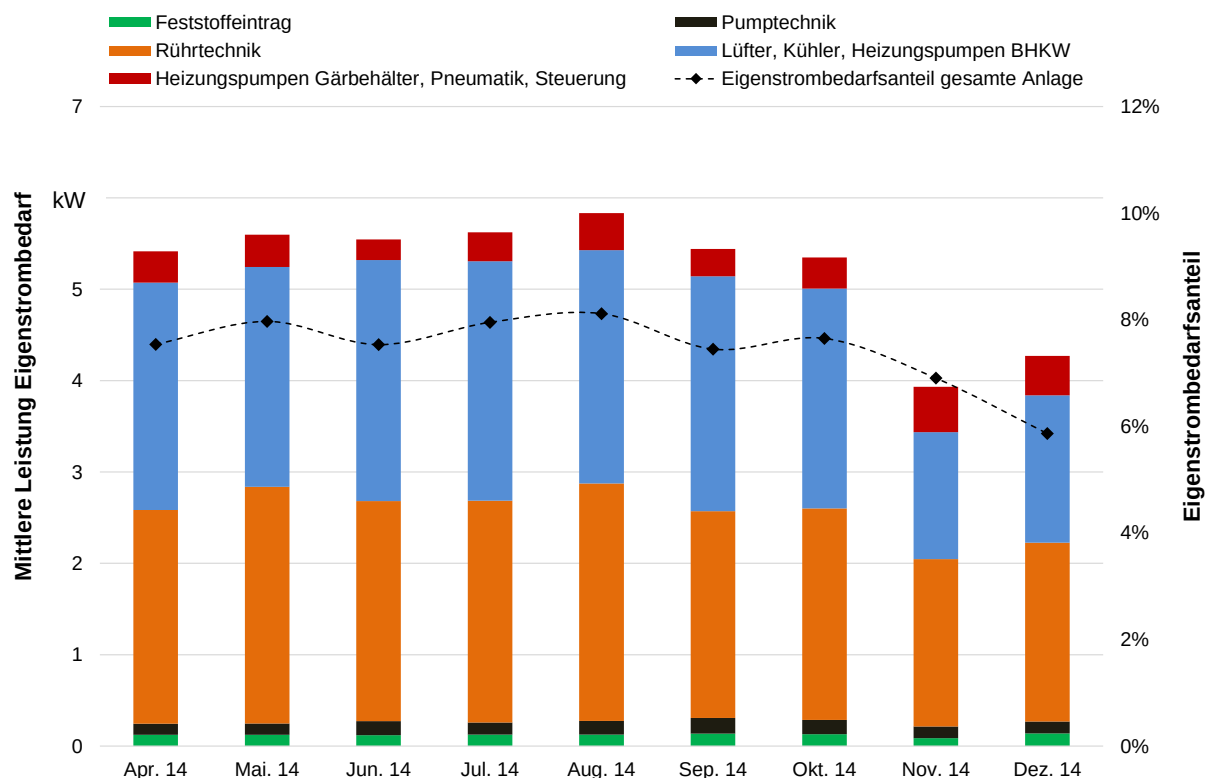


Abbildung 92: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #23

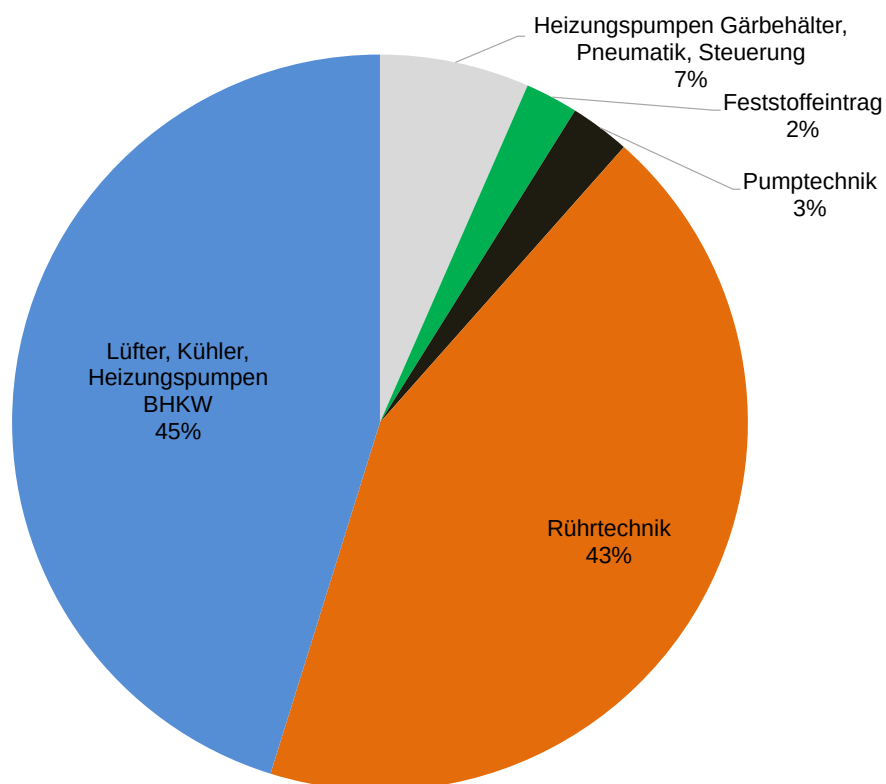


Abbildung 93: Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #23 im Jahresmittel 2014

Anlage 23 erreichte bisher einen relativ geringen Wärmeabsatzgrad. Das im Jahr 2014 neben der Anlage neu errichtete Wohnhaus bezog zum ersten Mal im Oktober Wärme von der Biogasanlage. Größter Wärmeverbraucher im Beobachtungszeitraum war die Biogasanlage selbst (Abbildung 94).

Als weiterer Wärmeabnehmer wird derzeit ein großer Schweinestall am Standort der Biogasanlage errichtet. Im Vergleich der hier vorgestellten Anlagen muss das Wärmenutzungskonzept dieses Betriebes aber als am wenigsten ausgereift gelten. Im Zuge der Verdreifachung der elektrischen BHKW-Leistung im Dezember für den „Flex-Betrieb“ wurde auch ein 40 m³ fassender Wärmepufferspeicher errichtet, um das Wärmemanagement zu verbessern.

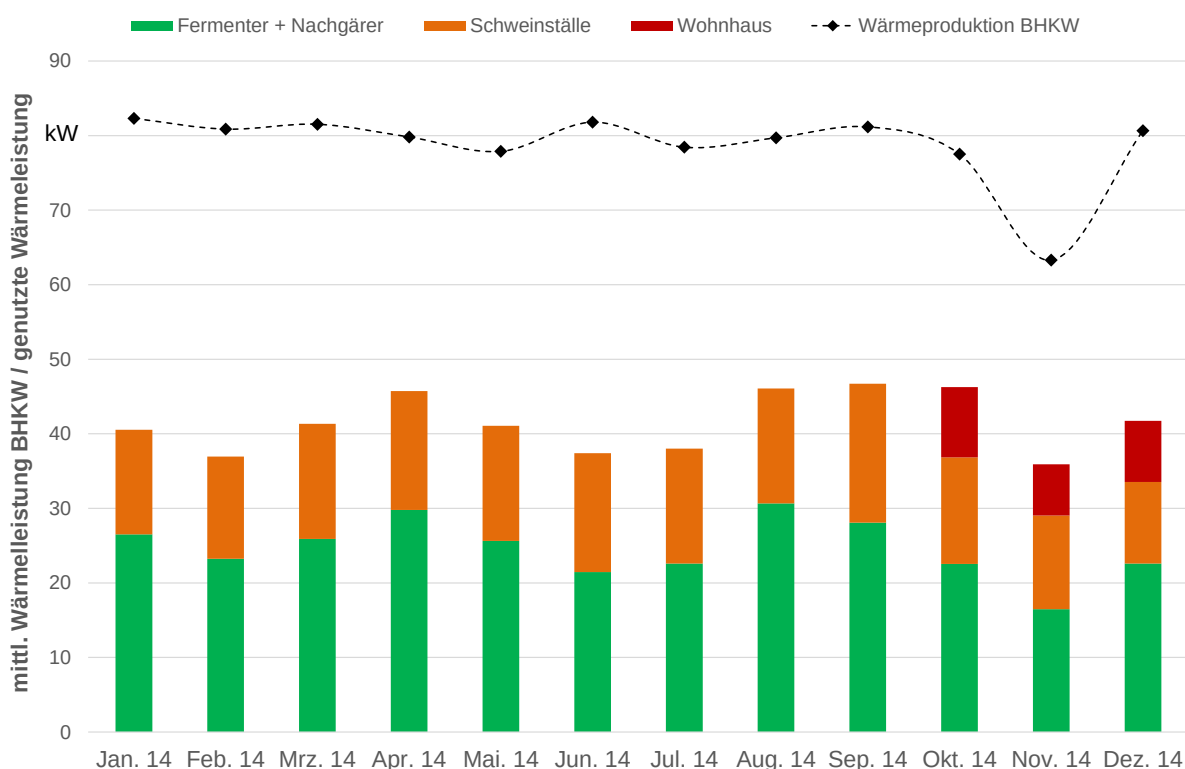


Abbildung 94: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb 23

Der im Jahresdurchschnitt errechnete Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 23 lag bei 31,3 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von 39,5 kWh t⁻¹.

4.1.8 Pilotanlage 24

Diese neu in das Monitoring aufgenommene, in einen großen Marktfruchtbetrieb integrierte Biogasanlage zeichnet sich durch sehr groß dimensionierte Gärbehälter mit vorgeschalteter Anmaischgrube sowie einen bedeutenden Anteil an Reststoffen im Einsatzstoffmix aus.

4.1.8.1 Einsatzstoffe

Dieser Betrieb weist von allen hier vorgestellten Pilotbetrieben die vielfältigste Auswahl an Einsatzstoffen auf, die zudem im Jahresverlauf je nach Verfügbarkeit deutlich variiert

wurde (Abbildung 95 und Abbildung 96). Die eingesetzten Reststoffe wie Kartoffelpülpe, Biertreber, aussortierte Kartoffeln und Marktgetreide minderer Qualität stammen aus dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb bzw. einer nahegelegenen Brauerei. Rindergülle wird von einem benachbarten Betrieb angeliefert.

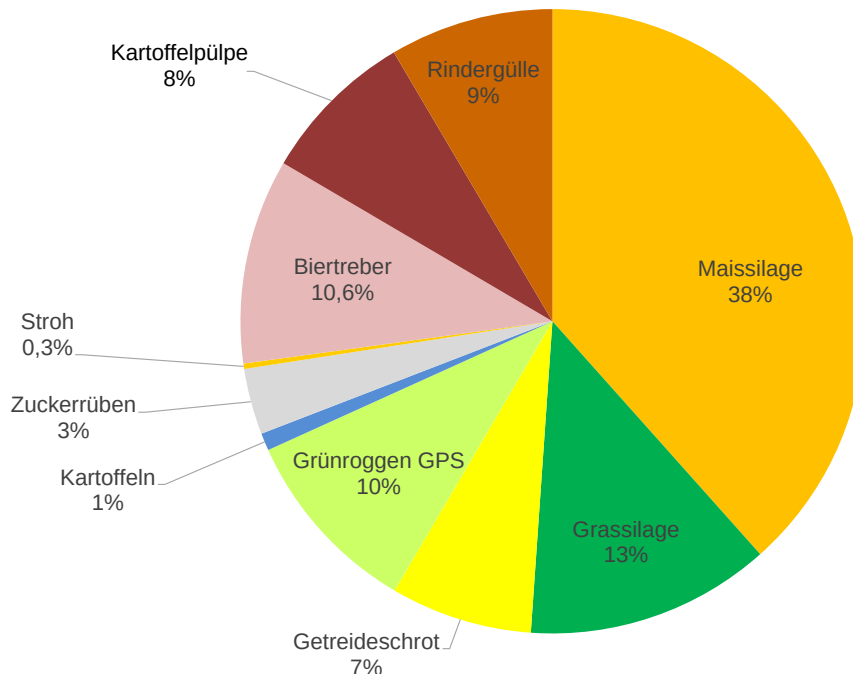


Abbildung 95: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #24 im Jahresmittel 2014

Im Winter und Frühjahr 2014 war Mais der Haupteinsatzstoff – im Frühjahr ergänzt durch Zuckerrüben – im Sommer überwog der Einsatz von Grünroggen-GPS und im Herbst/Winter 2014/15 löste Grassilage die Grünroggen-GPS ab und wurde zusätzlich Kartoffelpülpe eingesetzt. Rindergülle wurde jeweils nur wochenweise zum Verdünnen des Gärgemisches zugegeben, ohne den Eintrag pflanzlicher Einsatzstoffe zu verringern.

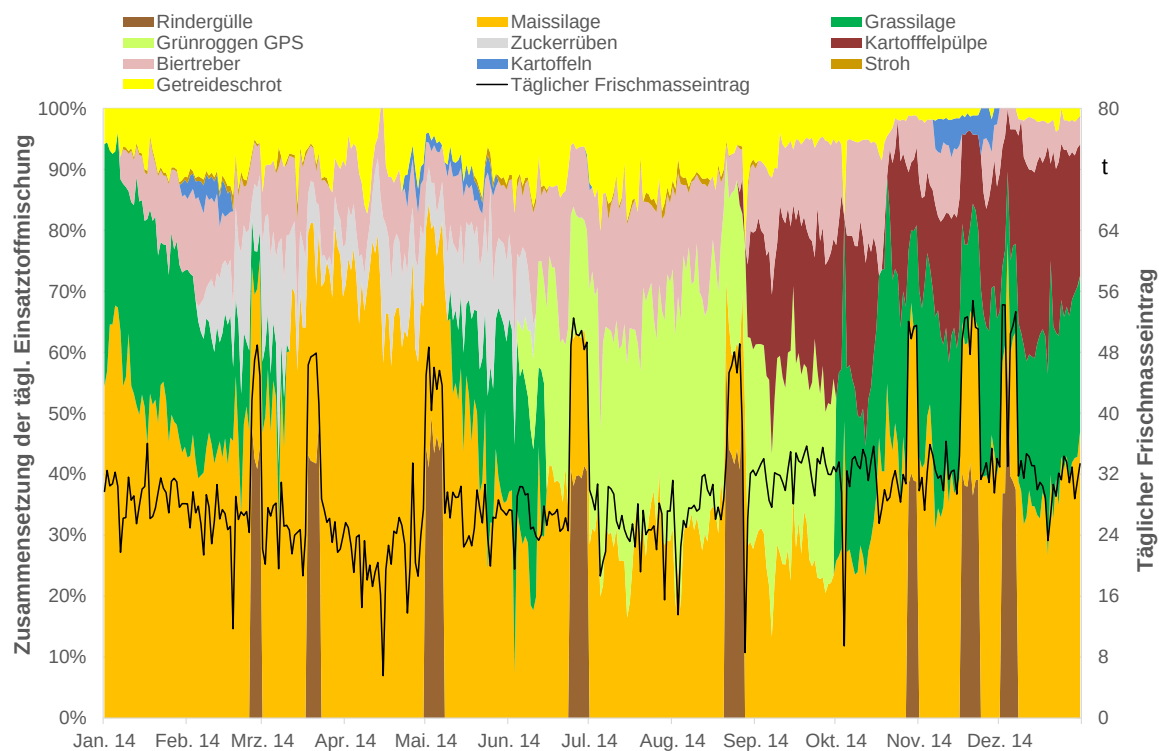


Abbildung 96: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #24 (tägliche Auflösung)

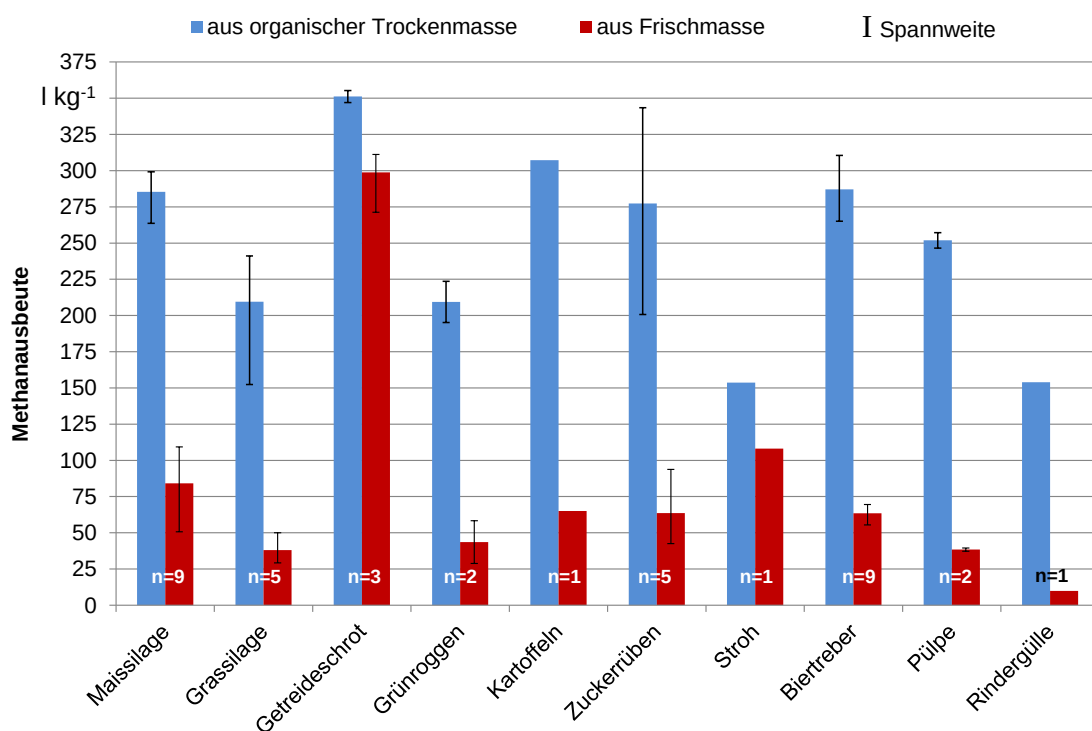


Abbildung 97: Nach Futterwertmethode berechnete theoretische Methanausbeuten aus den Einsatzstoffen von Pilotanlage #24

4.1.8.2 Prozessparameter

Nennenswerte Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren traten in Proben aus dieser Anlage nur in den Monaten März und April auf (Abbildung 98). Die Starker Anstieg der Fettsäuren in den Monaten März und April auf über 3500 mg l⁻¹ Essigsäure. Die Gesamt-Essigsäureäquivalente erreichten in der Probe vom April aus dem Fermenter ca. 4000 mg L⁻¹, waren aber im folgenden Monat bereits wieder unter 1000 mg L⁻¹ gesunken. Propionsäure stieg erkennbar an, erreichte aber bei weitem keine kritischen Werte. Der Anstieg der Prozessindikatoren war in abgeschwächter Form auch in Proben aus dem Nachgärer erkennbar (Abbildung 99). Auslöser für diese unkritische Reaktion dürfte die Umstellung der Fütterung durch Herausnahme von Grassilage und Hinzunahme von Zuckerrüben gewesen sein (Abbildung 96).

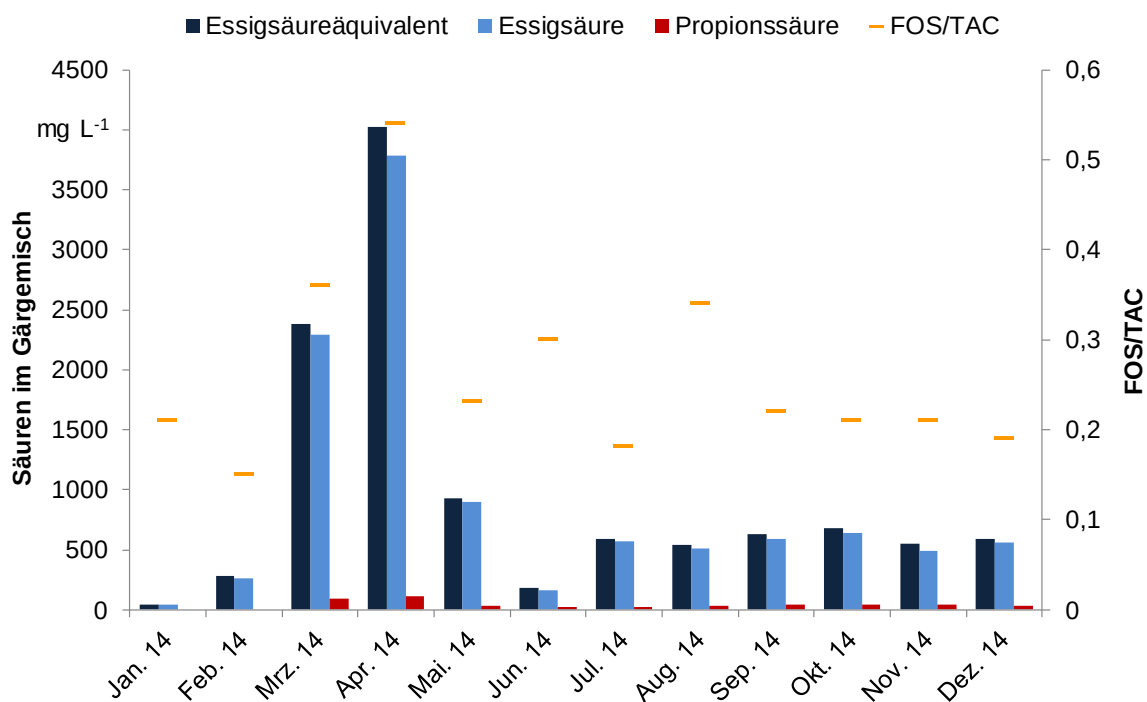


Abbildung 98: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage #24

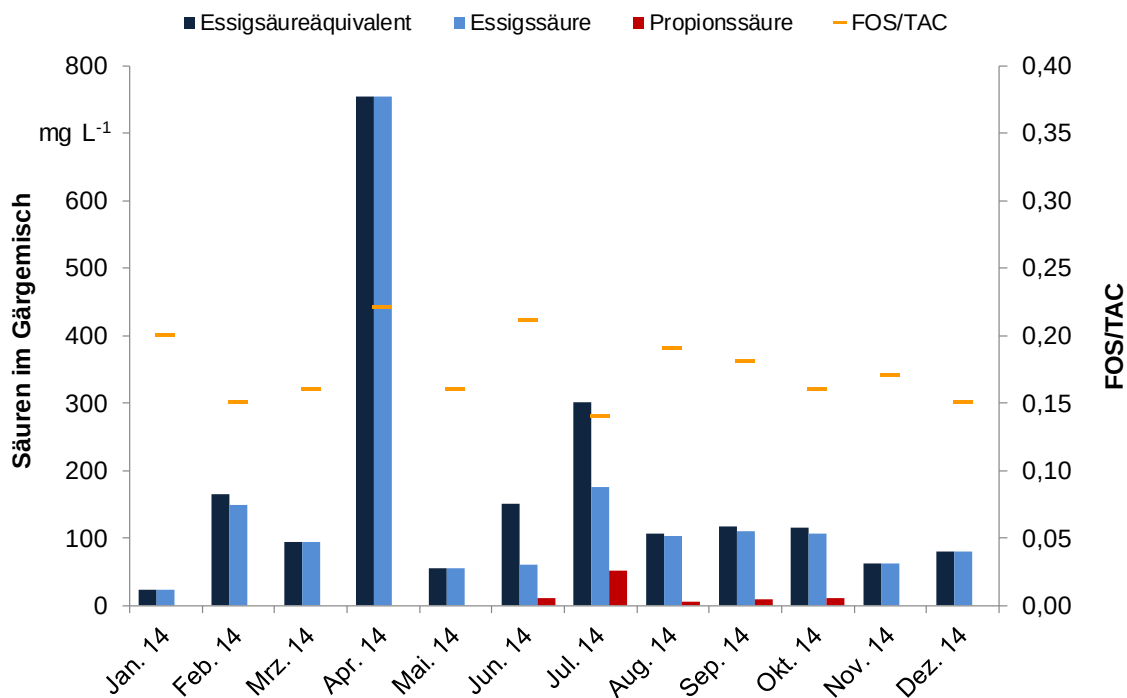


Abbildung 99: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #24

4.1.8.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 24 verfügt über ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 536 kW. Die Laufzeit des BHKW im Jahr 2014 betrug 8432 Betriebsstunden, das entspricht einer Verfügbarkeit des BHKW von 96,3 % oder einer mittleren Laufzeit von 23,1 Stunden pro Tag. Über das Jahr hinweg erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 37,1 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKW bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres belief sich auf 481 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 500 kW betrieben, das entspricht einer Auslastung von 93,3 %. Die BHKW-Leistung schwankte mit den verfügbaren Einsatzstoffen, die teilweise deutlich unterschiedliche Methanausbeuten aufweisen (Abbildung 100 und Abbildung 97).

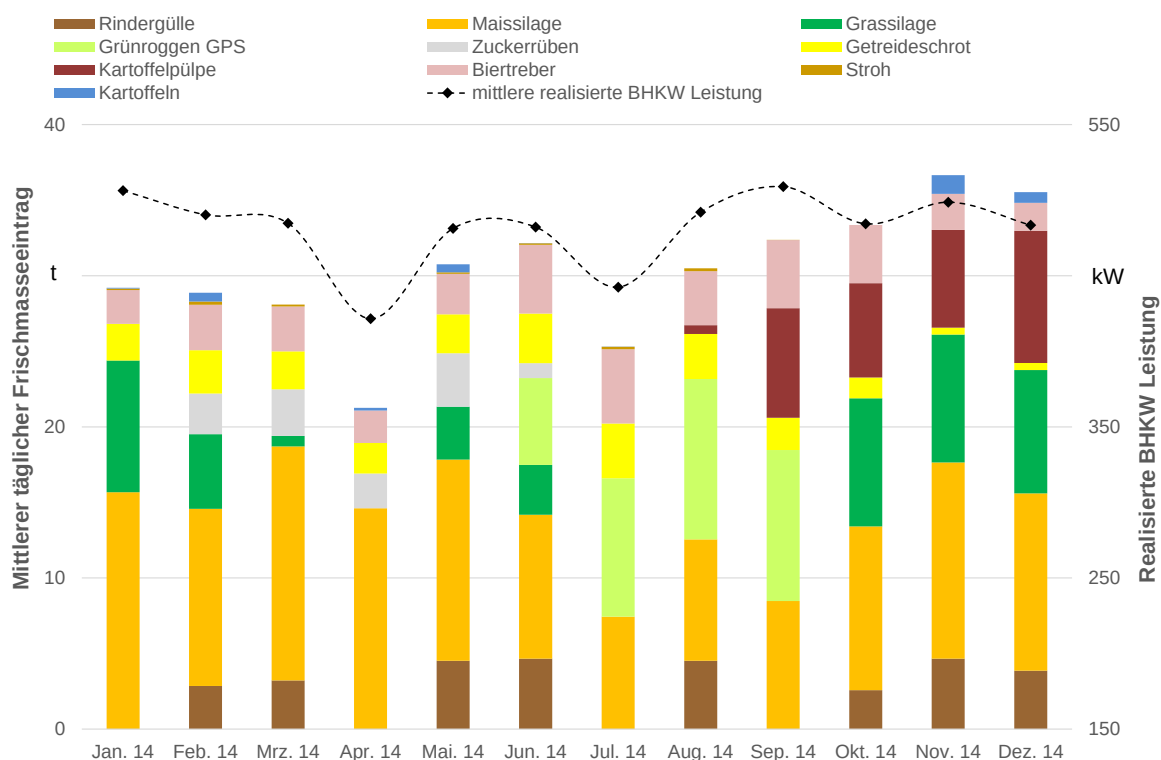


Abbildung 100: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #24

Der anteilige Strombedarf der Anlage 14 schwankte im Monatsmittel von ca. 14 bis 17 % und war damit überdurchschnittlich hoch. Betrachtet man die verschiedenen Verbrauchergruppen, so macht sich in den Monaten Januar bis Anfang April wieder das Rühren des Gärrestlagers bemerkbar. Um einen möglichst homogenen Gärrest auf die Felder ausbringen zu können, wurde das offene Gärrestlager mithilfe des leistungsstarken Tauchmotorrührwerks schon ab Januar und während der Ausbringzeit intensiv gerührt. Hinzu kam der Betrieb der Kreislaspumpe in der Fassfüllstation (Abbildung 101).

Ein weiterer Anstieg des Stromverbrauchs der Rührtechnik war in den Monaten September und Oktober zu verzeichnen. Da ab Ende Juni größere Mengen an Roggen-GPS und ab Anfang Oktober größere Mengen an Grassilage eingesetzt wurden (> 35 % Frischmasseanteil in den Monaten August, September und Oktober), wurden die Laufzeiten der drei Fermenterrührwerke ab September vorsorglich erhöht. Deutlich erkennbar ist auch der Anstieg des Strombedarfs für die Notkühler und Raumlüfter des BHKW während der Sommermonate.

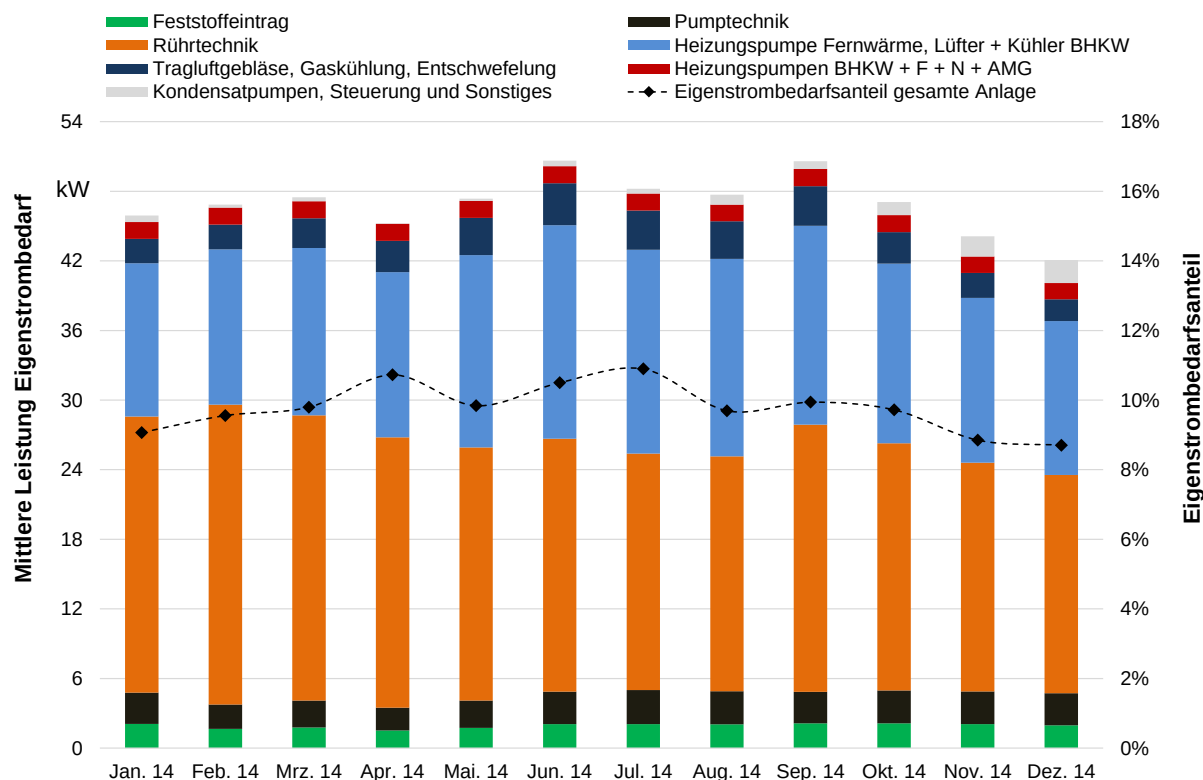


Abbildung 101: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #24

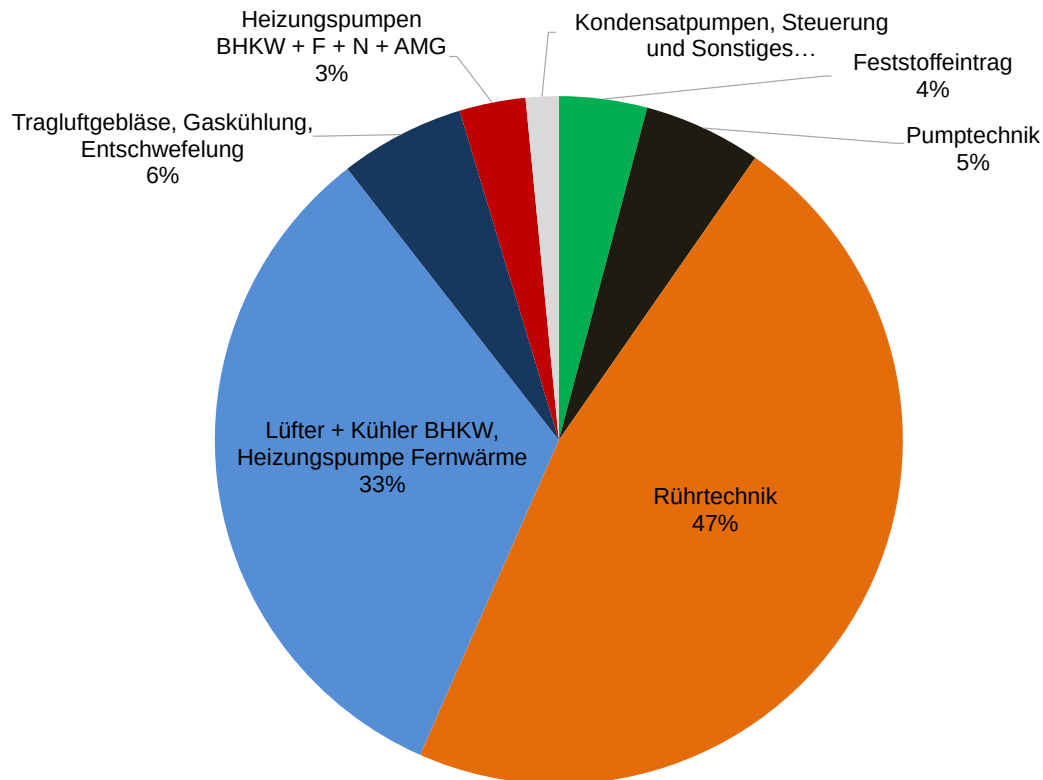


Abbildung 102: Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #24 im Jahresmittel 2014

Den größten Wärmeabnehmer dieser Anlage stellte das nahe gelegene Schloss dar. Auch Gebäude in der Ortschaft wurden mit Wärme versorgt. Im Sommer wurde ein Teil der BHKW-Wärme für die Trocknung von Druschfrüchten verwendet (Abbildung 103). Bei der großen zu bewirtschaftenden Getreideanbaufläche des Gutsbetriebs schafft die eigene Getreidetrocknung in Jahren mit ungünstiger Witterung eine höhere Erntesicherheit.

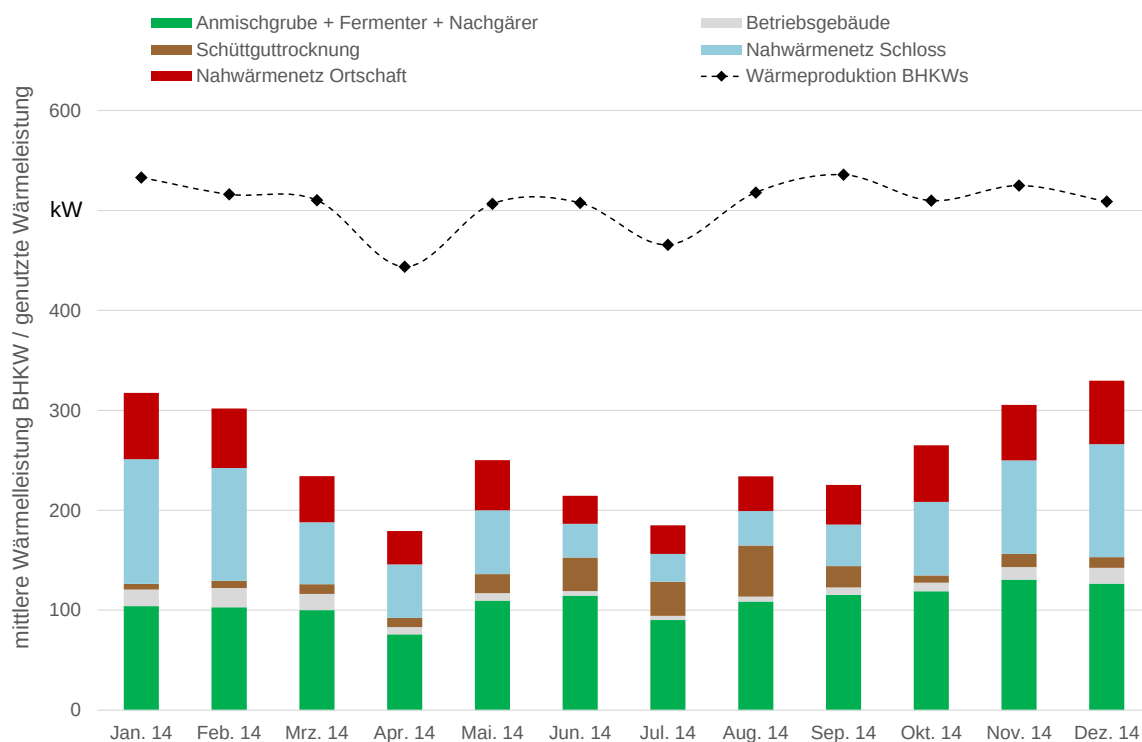


Abbildung 103: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #24

Die Wärmemengen für die Beheizung der Gärbehälter wurden entsprechend der monatlichen eingetragenen Frischmassemengen sowie der Bauform der Gärbehälter und des realisierten Prozesstemperaturniveau errechnet. Der dabei ermittelte Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 24 lag im Jahresdurchschnitt bei 21,3 %.

Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $85,5 \text{ kWh t}^{-1}$. Der relativ hohe Wert wird durch die sehr großen Gärbehältervolumina und die Einleitung großer Mengen an Oberflächenwasser sowie Sickersaft zur Verdünnung des Gärgemisches in die Fermenter begründet.

4.1.9 Pilotanlage 25

Charakteristische Merkmale dieser neu in das Monitoring aufgenommenen, ursprünglich für die Getreidebreivergärung ausgelegten Biogasanlage sind die dem Fermenter vorgeschaltete „Hydrolysegrube“ sowie die aufwändige Technik zur Aufbereitung der eingesetzten Substrate.

4.1.9.1 Einsatzstoffe

Betrieb 25 setzte im Jahresmittel bezogen auf den gesamten Frischmasseeintrag ca. ein Drittel Gülle, ein Drittel Maissilage und ein weiteres Drittel verschiedener pflanzlicher Einsatzstoffe ein (Abbildung 104). Während der Gülleanteil naturgemäß im Jahresverlauf kaum schwankte, variierte der Anteil der pflanzlichen Einsatzstoffe deutlich. Es gab Wochen, in denen ausschließlich Maissilage oder Grassilage gefüttert wurde, meist wurden aber drei bis vier Energiepflanzen gemischt. Zuckerrüben waren nur in den Wintermonaten verfügbar und ersetzen dann Grassilage (Abbildung 105).

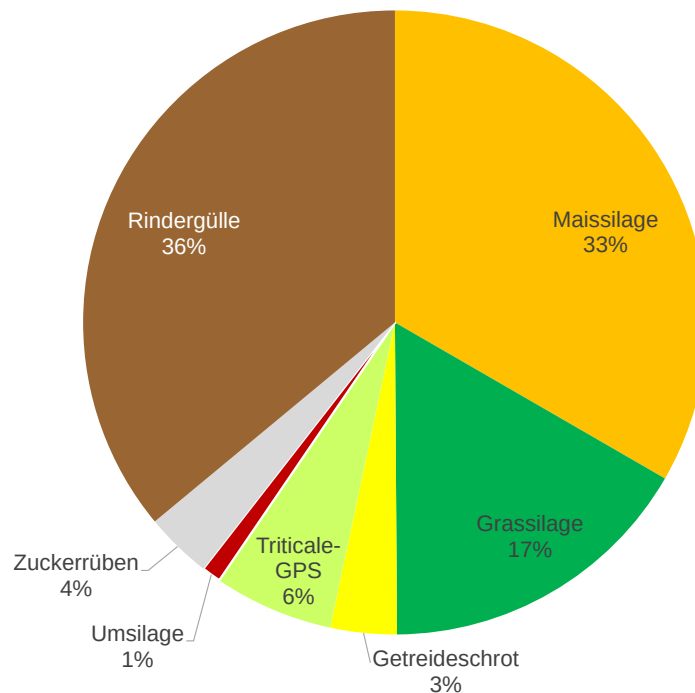


Abbildung 104: Massenanteile der Einsatzstoffe in Pilotanlage #25 im Jahresmittel 2014

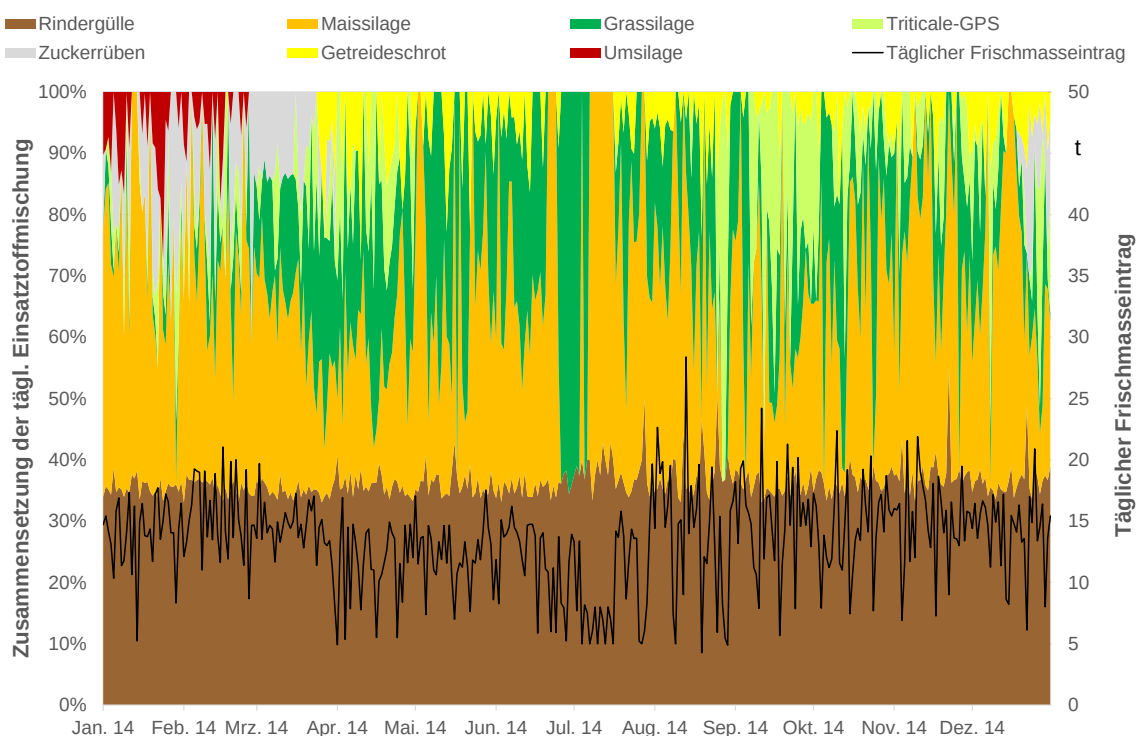


Abbildung 105: Massenanteile der Einsatzstoffe und Gesamteintrag an Frischmasse für Pilotanlage #25 (tägliche Auflösung) Prozessparameter

4.1.9.2 Prozessparameter

Pilotanlage 25 verfügt als einzige der hier dokumentierten Biogasanlagen über eine ausgewiesene „Hydrolysestufe“, die während der Beobachtungsperiode nicht gasdicht ausgeführt war (Anschluss an die Gasstrecke erfolgte im Frühjahr 2015). Die Konzentration flüchtiger Fettsäuren in Proben aus diesem Behälter lag meist über 12.000 mg L^{-1} auf, was zeigt, dass es sich realiter um eine Hydrolyse-/Versäuerungsstufe handelt. Ob bzw. in welchem Umfang es in dieser Prozessstufe auch zur Methanbildung kam, konnte indessen nicht nachgewiesen werden. Der pH-Wert in Proben aus der „Hydrolysestufe“ lag mit einem Mittelwert von 6,0 auf einem Niveau, das keinen vollständigen Abbauprozess mehr erlaubt.

In Abbildung 106 sind neben den Gesamt-Essigsäureäquivalenten nur die Konzentrationen von Essig- und Propionsäure dargestellt. Daneben wurden auch länger-kettige Fettsäuren wie Capronsäure in höheren Konzentrationen gemessen. In Proben aus dem Hauptgärbehälter waren diese nicht mehr bzw. nur noch in Spuren nachzuweisen.

In Proben aus dem Hauptfermenter und dem Nachgärer war die Konzentration flüchtiger Fettsäuren die meiste Zeit sehr niedrig, wie dies bei einem Anlagenkonzept mit separater Hydrolysestufe zu erwarten war (Abbildung 107). Weshalb im Oktober und Dezember deutlich erhöhte Konzentrationen in Fermenterproben gemessen wurden, ließ sich nicht plausibel erklären. Der FOS/TAC-Wert verzeichnete in diesen Proben keinen entsprechenden Anstieg. Möglicherweise kam es zu Fehlern bei der Probenbehandlung/-lagerung.

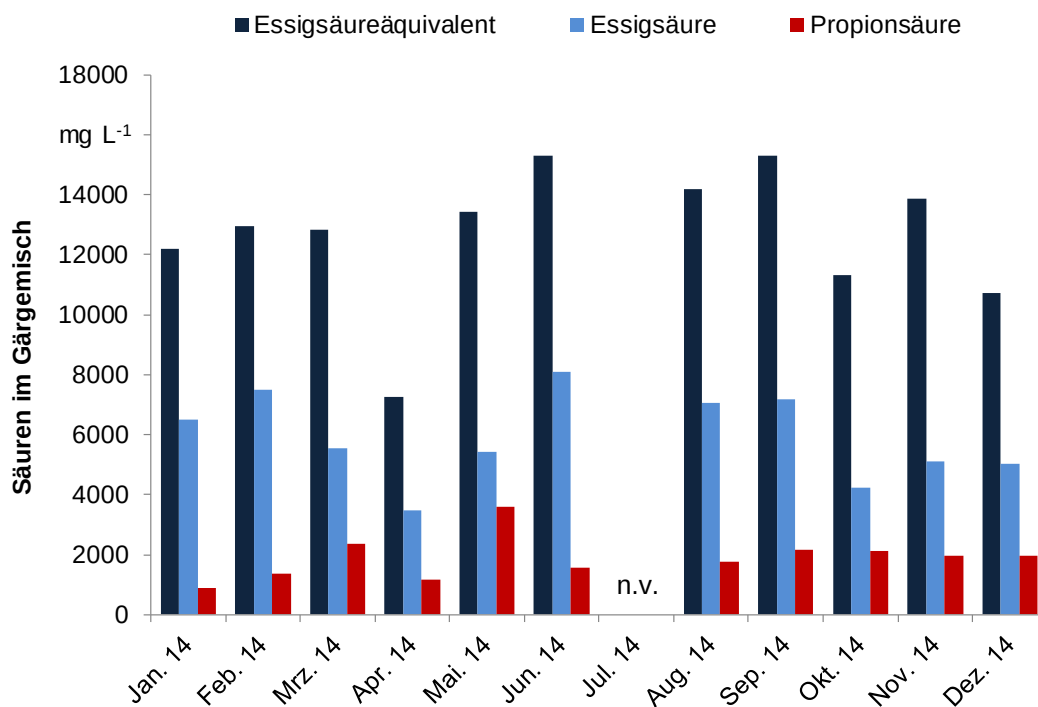


Abbildung 106: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus der Hydrolysestufe von Pilotanlage #25

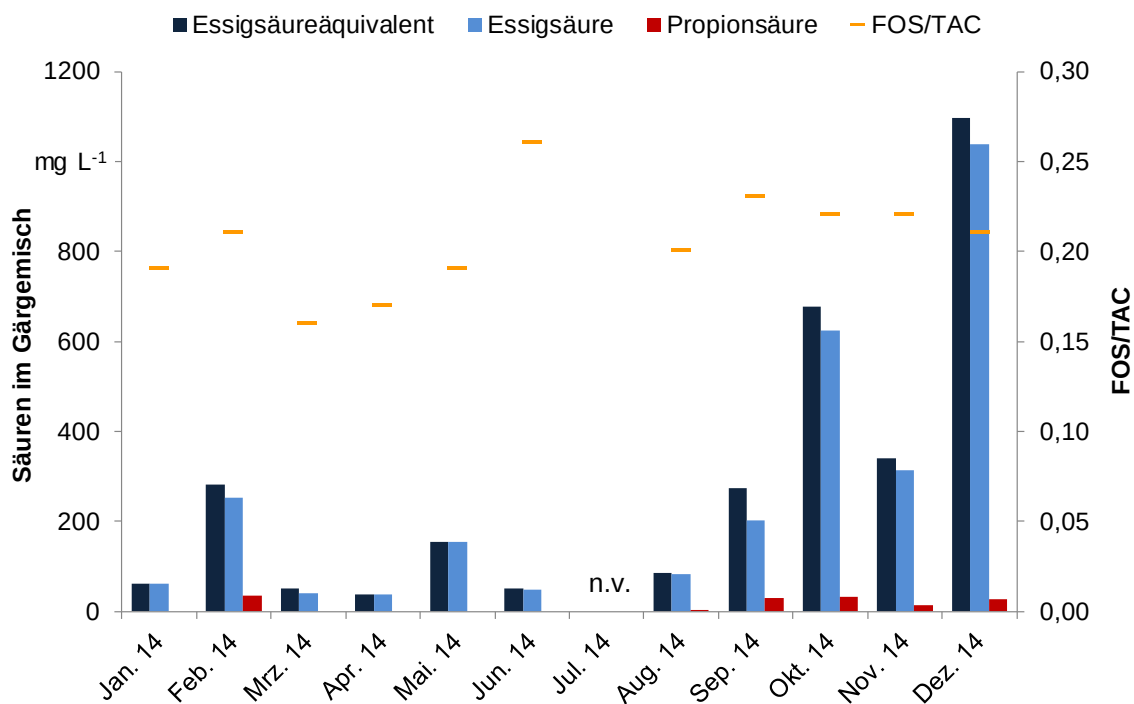


Abbildung 107: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Fermenter von Pilotanlage #25

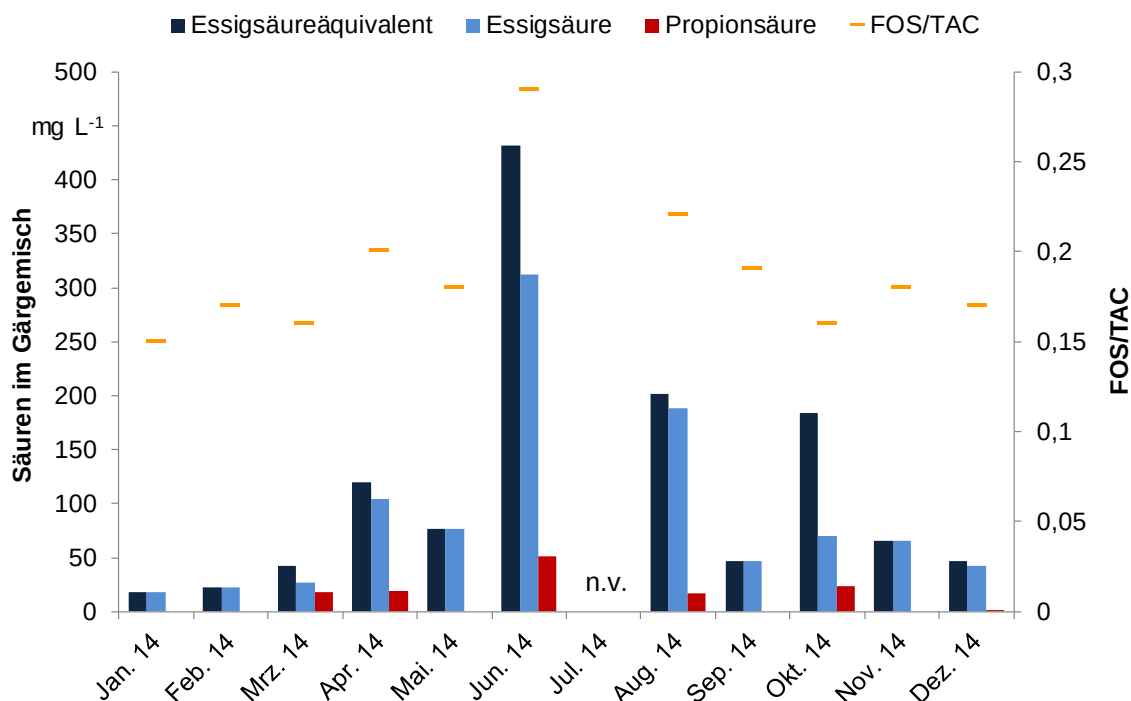


Abbildung 108: Konzentration von Gesamt-Essigsäureäquivalenten, Essig- und Propionsäure sowie FOS/TAC-Werte in Proben aus dem Nachgärbehälter von Pilotanlage #25

4.1.9.3 Leistungsparameter

Die Pilotanlage 25 verfügte bis Ende des Jahres über ein Blockheizkraftwerk, in dem ein Gas-Otto-Motor mit einer elektrischen Nennleistung von 190 kW Strom und Wärme produzierte. Mitte Dezember wurde ein zweites BHKW, ebenfalls mit Gas-Otto-Motor mit einer elektrischen Leistung von 100 kW für den Spitzenlastbetrieb installiert. Zweck der Leistungserhöhung war weniger eine bedarfsgerechte Stromerzeugung sondern vielmehr eine angepasste Wärmeproduktion besonders in den Wintermonaten, in denen der Wärmebedarf des umfangreichen Wärmenetzes besonders hoch ist. Das zweite BHKW läuft seit dem Jahr 2015.

Die Laufzeit des ersten BHKWs im Jahr 2014 betrug 8721 Betriebsstunden, das entspricht einer mittleren Verfügbarkeit des BHKWs von 99,6 % oder einer Laufzeit von 23,9 Stunden pro Tag. Über das Jahr hinweg erzielte das BHKW einen mittleren elektrischen Nutzungsgrad von 36,4 %. Die durchschnittlich realisierte elektrische Leistung des BHKWs, bezogen auf 8760 Stunden eines Jahres beläuft sich auf 174,9 kW. Umgerechnet auf die realisierten Betriebsstunden wurde das BHKW mit einer mittleren elektrischen Leistung von 175,7 kW betrieben, das entspricht einem Teillastbetrieb auf 92,5 % der installierten Leistung. Das BHKW erreichte 8064 Volllaststunden im Jahr 2014.

Für den Einbruch der BHKW-Leistung im Juni bei nahezu gleichbleibender Fütterungsrate und den Wiederanstieg der Leistung im Juli trotz deutlich reduzierter Fütterungsrate konnte keine andere plausible Erklärung gefunden werden, als die Bildung und Wiederauflösung eines Substratstocks im Hauptgärbehälter (Abbildung 109).

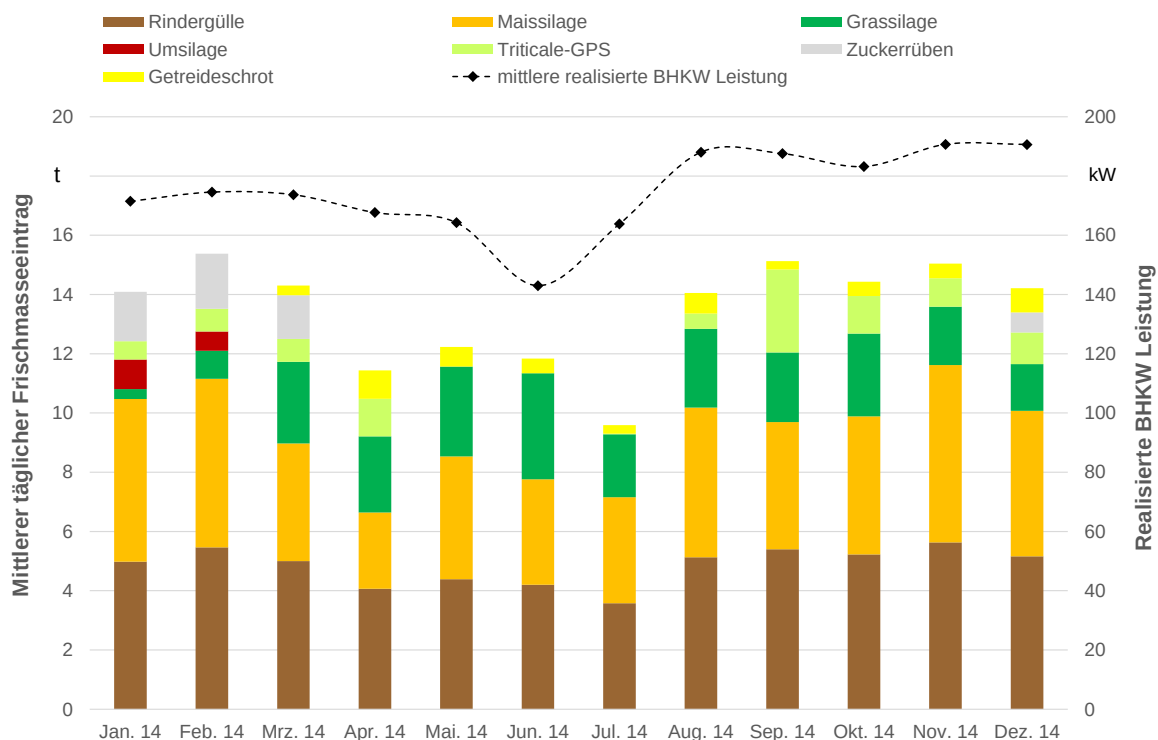


Abbildung 109: Monatsmittelwerte des täglichen Frischmasseeintrags und der realisierten elektrischen BHKW-Leistung für Pilotanlage #25

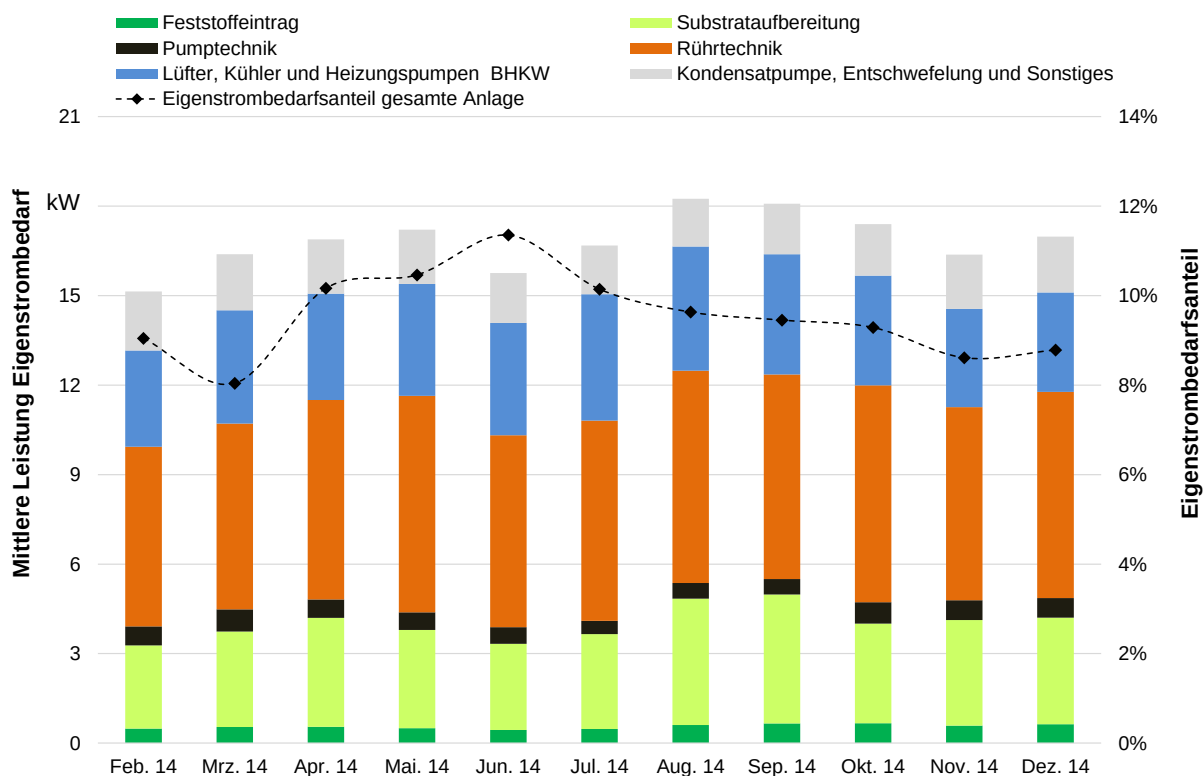


Abbildung 110: Monatsmittelwerte der gesamten Strombedarfsleistung und des anteiligen Eigenstrombedarfs für Pilotanlage #25

Den größten Stromverbraucher der Anlage 25 stellte die Rührtechnik dar, wobei 52 % auf die beiden leistungsstarken Rührwerke in der Hydrolysegrube entfielen, da der Kraftbedarf für das Einrühren der Feststoffe in Rezirkulat und Rindergülle in der 90 m³ fassenden Grube enorm ist (Abbildung 111). An zweiter Stelle folgte die Technik für die Substrataufbereitung, wobei 90 % des Stromverbrauchs auf den Querstromzerspaner und nur 10 % auf den Lochscheibennasszerkleinerer entfielen.

Im Jahresverlauf wies die Eintrags- und Substrataufbereitungstechnik den niedrigsten Stromverbrauch je Tonne eingetragene FM in den Monaten Januar und Februar auf. In diesem Zeitraum wurden ca. 12 % Zuckerrüben eingesetzt. Offensichtlich waren die mithilfe einer Schnitzelschaufel bereits vorzerkleinerten Zuckerrüben ohne großen Kraftaufwand zu verarbeiten. Das Maximum beim anteiligen Strombedarf im Monat Juni ist auf die im Verhältnis relativ geringe realisierte BHKW-Leistung aufgrund von Wartungsarbeiten zurückzuführen (Abbildung 110).

In den Monaten August und September war ein deutlicher Anstieg des Eigenstrombedarfs für Substrateintrag- und aufbereitung festzustellen. Grund dafür war neben dem gesunkenen Maisanteil in der Futtermittelration bei einem gleichzeitigen Anstieg des Gras- und GPS-Anteils der stark verschlissene Austragsflügel im Feststoffdosierer. Dieser hatte damit eine deutlich geringere Förderleistung, welche durch längere Laufzeiten des Feststoffeintrags und des Querstromzerspaners kompensiert werden musste. Der Austragsflügel wurde Ende September ausgetauscht.

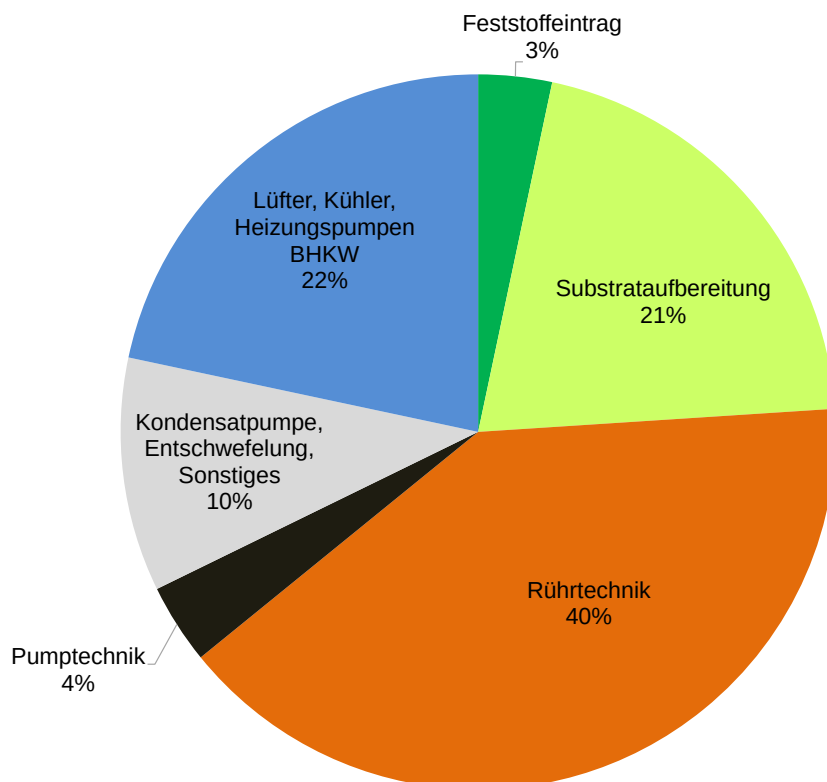


Abbildung 111: Aufteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbraucher der Pilotanlage #25 im Jahresmittel 2014

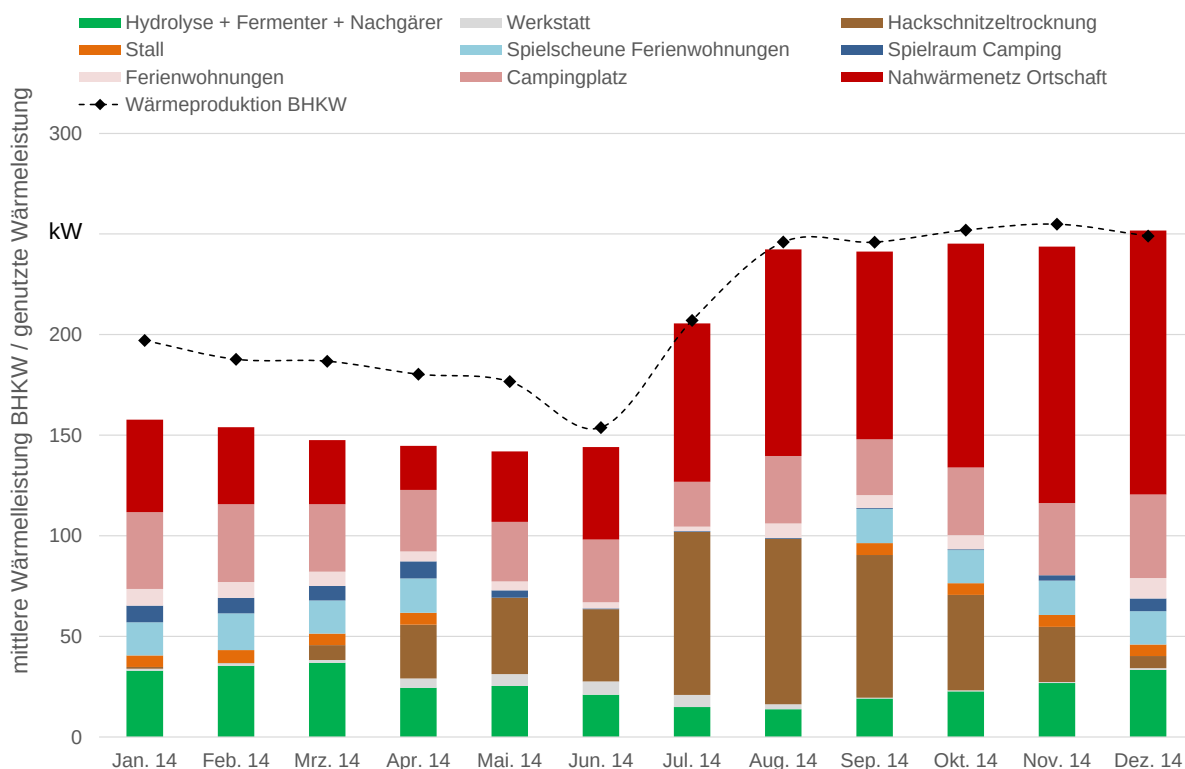


Abbildung 112: Monatsmittelwerte der Wärmeleistung der BHKW und der an unterschiedliche Nutzer abgesetzten Wärmeleistung für Pilotbetrieb #25

Pilotbetrieb 25 weist von allen hier dokumentierten Betrieben das am besten ausgebaute Wärmenutzungskonzept auf und erreichte einen sehr hohen Absatzgrad für die BHKW-Wärme. Hauptabnehmer sind das betriebseigene Nahwärmenetz mit Anschluss des betriebseigenen Feriendorfs inklusive Campingplatz und Freizeitmöglichkeiten sowie ein zweites Nahwärmenetz, an welches etliche Häuser der kleinen Ortschaft angeschlossen sind. Im Winter speist zusätzlich ein Holzhackschnitzelheizwerk in die Nahwärmenetze ein, während im Sommer mit der BHKW-Wärme Holzhackschnitzel und Druschfrüchte getrocknet werden (Abbildung 112).

Im Jahresdurchschnitt lag der Eigenwärmebedarfsanteil der Pilotanlage 25 bei 12 %. Bezogen auf die in das Fermentersystem eingetragene Menge an Frischmasse ergibt sich ein mittlerer spezifischer Prozesswärmebedarf von $45,5 \text{ kWh t}^{-1}$.

4.2 Vergleich der Pilotanlagen

Der horizontale Vergleich der Pilotanlagen soll dazu dienen, die Zusammenhänge zwischen Einsatzstoffen, Anlagentechnik sowie Anlagenmanagement einerseits und grundlegenden Kennwerten zur Beschreibung der Anlagenleistung andererseits herauszuarbeiten.

4.2.1 Einsatzstoffauswahl

Bezüglich der Auswahl der Einsatzstoffe lassen sich die hier vorgestellten Pilotbetriebe in drei Gruppen einteilen: In zwei Biogasanlagen kam mit einem Massenanteil von ca. 80 % hauptsächlich Gülle aus dem eigenen Betrieb zum Einsatz: #22 und #23. Drei weitere Betriebe lassen sich als Ko-Fermentationsanlagen mit einem Masseanteil von etwa einem Drittel Gülle oder Mist und zwei Dritteln pflanzlicher Einsatzstoffe typisieren: #10, #16 und #25. Die übrigen vier Pilotanlagen wären als „NAWARO-Anlagen“ zu bezeichnen, die weniger als zehn Massenprozent Wirtschaftsdünger tierischen Ursprungs einsetzten. In diese Gruppe fällt auch Anlage 24, die mit zehn unterschiedlichen Substraten den vielfältigsten Einsatzstoffmix der hier vorgestellten Betriebe aufwies (Abbildung 113).

Allen Pilotbetrieben gemeinsam war der Einsatz von Maissilage, deren Massenanteil im Jahresmittel von wenigen Masseprozent in Anlage 16 bis zu 75 % in Anlage 8 variierte. Die Pilotanlagen 15, 16 und 23 setzten Maissilage als Ergänzungssubstrat bzw. zur Begrenzung der NH_4^+ -Gehalte im Gärgemisch bedingt durch einen hohen Anteil an Klee-grassilage oder Schweinegülle ein. Hervorzuheben sind die in ökologisch wirtschaftende landwirtschaftliche Betriebe integrierten Biogasanlagen 15 und 16, in den das zur N-Fixierung angebaute Klee-gras den Haupteinsatzstoff für die Biogasproduktion darstellte. Pilotbetrieb 15 realisierte mit 77 % Massenanteil einen der höchsten Klee-grasanteile aller bisher untersuchten Pilotanlagen, Betrieb 16 erreichte einen Massenanteil von 61 %.

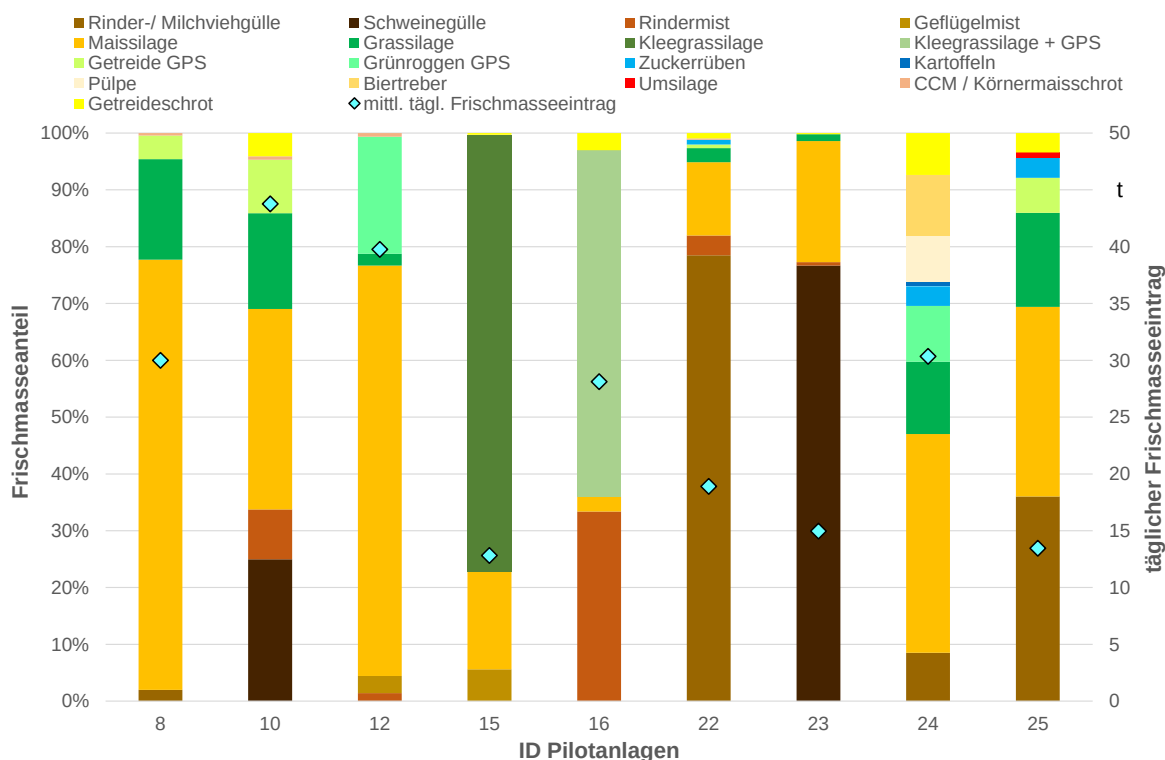


Abbildung 113: Gegenüberstellung der Einsatzstoffmischung und des täglichen Frischmasseeintrags der Pilotanlagen

Die Pilotanlagen 22, 24 und 25 setzen ein bis fünf Prozent Zuckerrüben im Jahresdurchschnitt, saisonal aber bis zu 20 % Massenanteil ein. Auch Szarvasigras wurde in geringen Mengen in den Pilotanlagen 12 und 23 verwertet. Nachdem die Hektarerträge und die im Gärtest ermittelten Biogasausbeuten für dieses alternative Substrat verglichen mit Silomais, GPS oder Ackergras deutlich geringer ausfielen, entschieden sich jedoch beide Betriebe gegen eine Ausweitung der Anbauflächen.

Besonders energiereiche Einsatzstoffe wie CCM und Getreideschrot wurden in allen Anlagen nur in geringem Umfang mit maximal vier Massenprozent (PB 10) eingesetzt und zwar überwiegend in den Wintermonaten, um Schwankungen/Engpässe in der Gasproduktion auszugleichen.

4.2.2 Raumbelastung und Verweilzeit

Die neun Pilotbetriebe lassen sich bezüglich der oTS-Raumbelastung der ersten Prozessstufe – mit etwas gutem Willen – in drei Gruppen einteilen: Anlage 12 steht mit der geringsten organischen Raumbelastung von $3,4 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ alleine da; in die zweite Gruppe fallen die Anlagen 8, 10, 15, 24, 25 mit einer Raumbelastung von 4 bis $5 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$; in der dritten Gruppe werden die drei Anlagen 16, 22, 23 mit einer Raumbelastung deutlich oberhalb von $6 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ zusammengefasst (Abbildung 114).

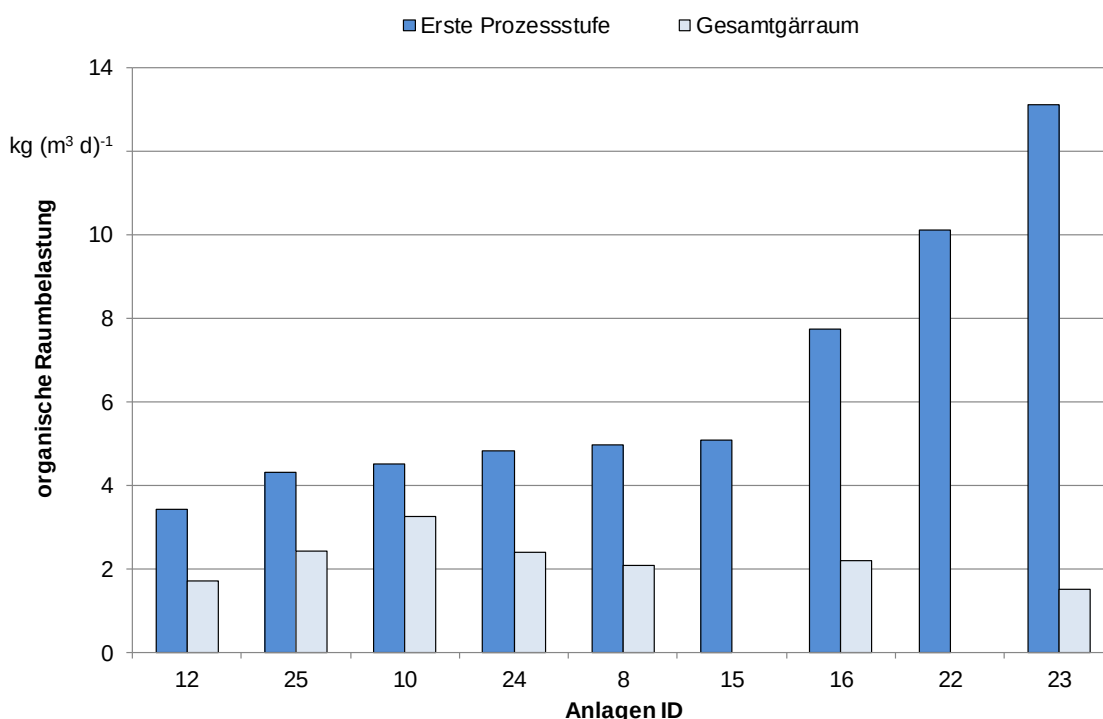


Abbildung 114: Gegenüberstellung der oTS-Raumbelastung der ersten Prozessstufe und des gesamten Fermentersystems der Pilotanlagen

Betrachtet man die Raumbelastung des gesamten Fermentersystems ergibt sich ein völlig anderes Bild. Die Spannweite ist hier – wenn die beiden einstufigen Anlagen 15 und 22 ausgenommen werden – mit $1,5$ bis $3,3 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ deutlich kleiner und wir finden die Kompaktbiogasanlage des Pilotbetriebs 23 mit der höchsten Raumbelastung in der ersten Prozessstufe nun am unteren Rand der Verteilung (Tabelle 9). Im Mittel aller neun Anlagen lag die Raumbelastung des gesamten Fermentersystems mit organischer Trockensub-

stanz bei $3,4 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$. Dieser Wert ist deutlich höher als der entsprechenden Mittelwert der fünf Grünland-Pilotbetriebe mit $2,2 \text{ kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ (KISSEL *et al.*, 2015).

Tabelle 9: Zusammenstellung der Raumbelastung und Verweilzeit der Pilotanlagen in der ersten Prozessstufe und im Fermentersystem

Anlagen ID	oTS-Raumbelastung, $\text{kg (m}^3 \text{ d)}^{-1}$		Hydraulische Verweilzeit, d	
	erste Prozessstufe	Fermentersystem	erste Prozessstufe	Fermentersystem
8	5,0	2,1	60	143
10	4,5	3,3	51	71
12	3,4	1,7	91	181
15	5,1	=	63	=
16	7,7	2,2	32	113
22	10,1	=	12	=
23	13,1	1,5	7	64
24	4,8	2,4	69	138
25	4,3	2,4	52	93

Bei Betrachtung der hydraulischen Verweilzeiten werden die Unterschiede zwischen den Anlagenkonzepten noch deutlicher. Auffällig ist hier die Pilotanlage 10 mit einem relativ kleinen Nachgärer, was darauf zurückzuführen ist, dass die ursprüngliche Anlage sukzessive erweitert, aber kein zusätzlicher Nachgärer errichtet wurde. Im Gegensatz dazu weisen die Pilotanlagen 23 und 16 in Relation zum Arbeitsvolumen der Fermenter sehr groß dimensionierte Nachgärer auf (Abbildung 115).

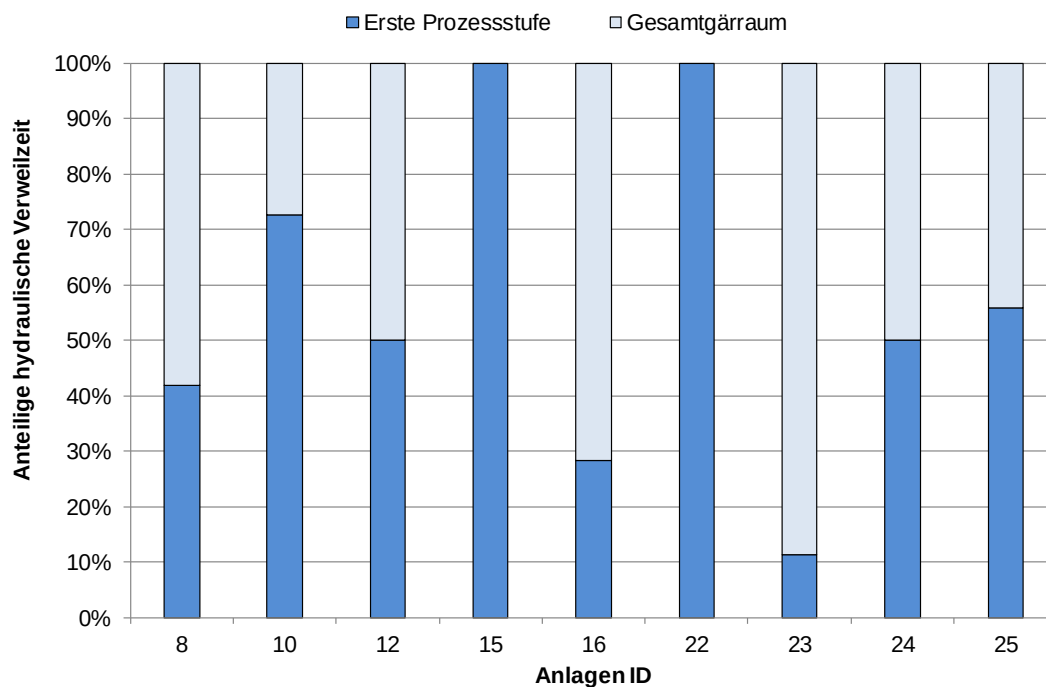


Abbildung 115: Gegenüberstellung der anteiligen hydraulischen Verweilzeit in der ersten Prozessstufe und im Fermentersystem der Pilotanlagen

4.2.3 Relative Gasausbeute

Einen bekannten Maßstab zur Gegenüberstellung der Effizienz von Biogasanlagentypen mit unterschiedlicher Auswahl an Einsatzstoffen stellt das Verhältnis zwischen der theoretischen (potentiellen) Gasausbeute der in den Gärraum eingetragenen Einsatzstoffe und der realisierten Gasausbeute dar. Dieser Zusammenhang wird als relative Biogas- oder Methanausbeute bezeichnet. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der potentiellen Gasausbeute von Einsatzstoffen wird in Kapitel 3.3.6 genauer erläutert.

Wie bereits in vorangegangenen Untersuchungszeiträumen des Biogasanlagen-Monitorings lagen die tatsächlich realisierten Gasausbeuten bei den meisten Anlagen deutlich über den ermittelten potentiellen Gasausbeuten der Einsatzstoffe. Ausnahmen stellten die Pilotanlagen 23, deren tatsächliche Gasausbeute etwa der prognostizierten entsprach, sowie die Pilotanlage 15 dar, deren realisierte Methanausbeute nur 15 % über der theoretischen lag. Spitzenreiter der Anlagen hinsichtlich der relativen Methanausbeute ist die Pilotanlage 8 mit ca. 170 %. Der Mittelwert aller Pilotanlagen im Beobachtungszeitraum liegt bei 133 % relativer Methanausbeute.

Die zum Teil deutlichen Differenzen zwischen den potentiellen und den in der Praxis erzielten Gasausbeuten stellen ein methodisches Problem dar. Da der Anfall von Silagesickersäften nicht quantifiziert wurde, fehlen die Gaserträge aus der darin enthaltenen oTS in den Werten der theoretischen Gasausbeute. Auch die in den Silagen enthaltenen Gär-säuren und Alkohole tragen zur Gasbildung bei, verflüchtigen sich aber teilweise bei der Trocknung der Substratproben für die Futtermitteluntersuchung nach Weender und werden daher bei der Berechnung der potentiellen Gasausbeuten ebenfalls nicht berücksichtigt. Insgesamt führt dies zu einer deutlichen Unterschätzung der zu erwartenden Biogas-/Methanausbeuten. Der Vergleich der Werte zwischen den Anlagen lässt dennoch Tendenzen bezüglich der Abbauleistung erkennen. Bei Anlage 8 liegt möglicherweise ein systematischer Fehler bei der Wägung der Einsatzstoffe vor, der überprüft werden sollte.

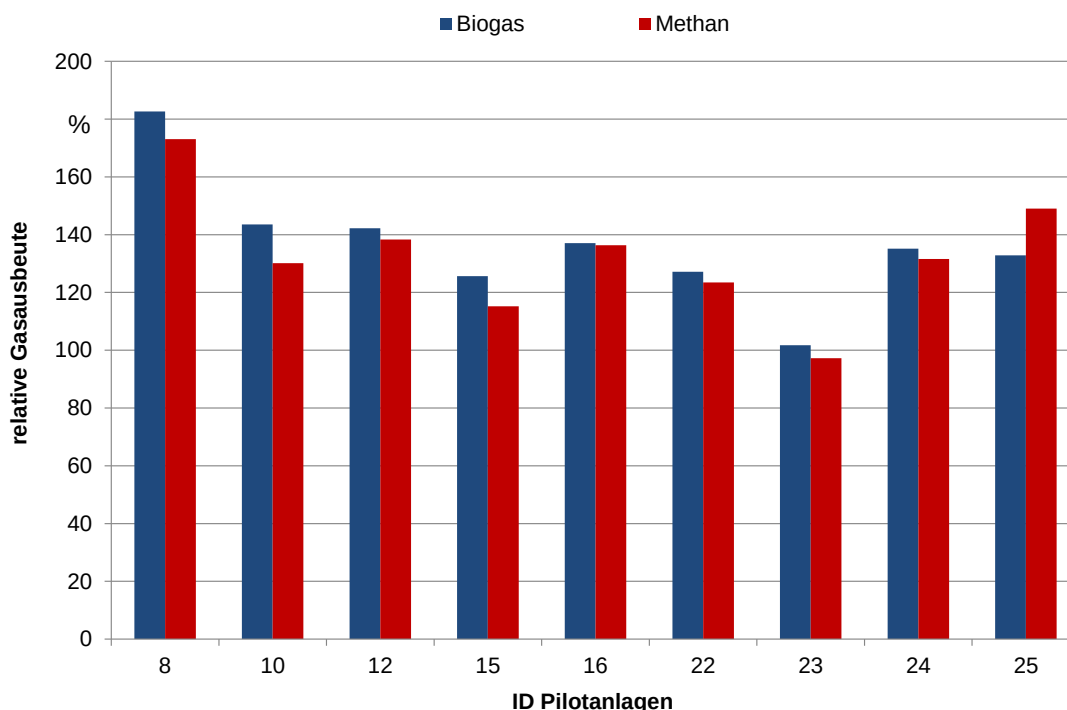


Abbildung 116: Gegenüberstellung der relativen Biogas-/Methanausbeute aus den Einsatzstoffen für die Pilotanlagen

4.2.4 Realisierte elektrische Leistung und Auslastung der BHKW

Insgesamt zeigten die neun Pilotanlagen ein sehr weites Spektrum bezüglich der realisierten elektrischen Leistung, der Auslastung sowie der Verfügbarkeit/Laufzeit der BHKW. Die für den Beobachtungszeitraum eines Jahres dargestellte installierte elektrische Leistung wurde bei den Pilotanlagen 8, 10 und 23 wegen der Installation eines zusätzlichen oder des Tauschs eines alten BHKW wie folgt ermittelt:

$$\text{PB \#8: } 250 \text{ kW} + 250 \text{ kW} + (5 \text{ Monate} \times 190 \text{ kW} + 7 \text{ Monate} \times 250 \text{ kW}) / 12 = 725 \text{ kW}$$

$$\text{PB \#10: } 240 \text{ kW} + 150 \text{ kW} + 265 \text{ kW} + (6 \text{ Monate} \times 265 \text{ kW}) / 12 = 810 \text{ kW}$$

$$\text{PB \#23: } (11 \text{ Monate } 75 \text{ kW} + 1 \text{ Monat } 250 \text{ kW}) / 12 = 90 \text{ kW}$$

Die höchste Auslastung der installierten Leistung erreichte Pilotanlage 22 mit 99 %, die niedrigste Pilotanlage 10 mit 75 % (Abbildung 117). Da wie Pilotanlage 10 immer mehr Biogasanlagen über (ein) zusätzliche(s) BHKW verfügen, welche zur Anpassung der Stromerzeugung an die Nachfrage am Strommarkt nur einige Stunden täglich betrieben werden, kann die Auslastung eines BHKW kaum mehr als Vergleichsmaßstab für die Anlageneffizienz herangezogen werden. Mehr Aussagekraft haben hier die Parameter Verfügbarkeit/Laufzeit sowie der Lastverlauf der BHKW.

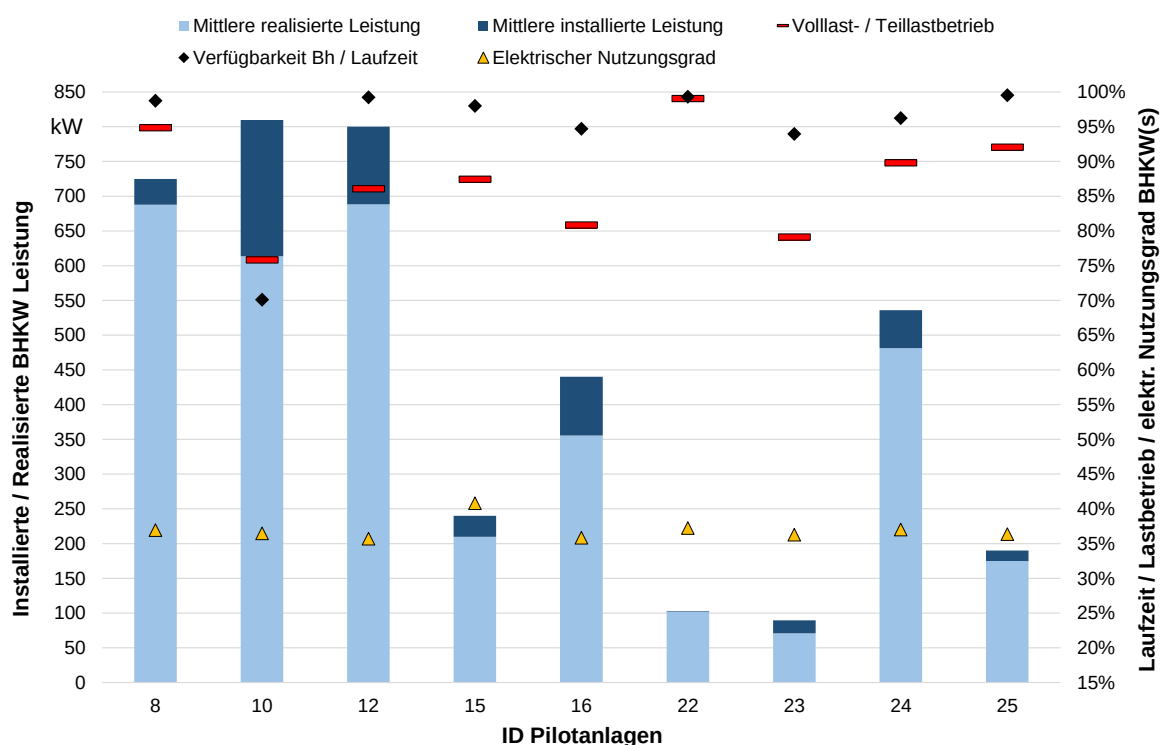


Abbildung 117: Gegenüberstellung der mittleren realisierten elektrischen Leistung, der Laufzeit, der Auslastung und des elektrischen Nutzungsgrades der BHKW

Hierbei zeigte sich, dass die Pilotanlage 25 im Betrachtungszeitraum 2014 die höchste Laufzeit des BHKW mit 99,5 % der Jahresstunden erreichte, dicht gefolgt von den Pilotanlagen 22 mit 99,3 %, 12 mit 99,2 % und 8 mit 98,7 %. Die niedrigste Laufzeit der BHKW im Anlagendurchschnitt wies aufgrund bedarfsorientierter Stromerzeugung die Pilotanlage 10 mit 70 % der Jahresstunden auf.

Im Jahresmittel aller Pilotanlagen wurden die BHKW bei 87 % der installierten Leistung betrieben. Quasi Vollast erreichte im Jahresdurchschnitt nur das BHKW der Anlage 22 mit 99,1 % der installierten Leistung. Die im Mittel mit knapp 76 % der installierten Leistung auf Teillast betriebenen BHKW der Anlage 10 zeigten die niedrigste Auslastung.

Die mittleren elektrischen Nutzungsgrade der Blockheizkraftwerke wiesen im Beobachtungszeitraum mit einer Spannweite von 35,7 % für Pilotbetrieb 10 und 40,8 % für Pilotbetrieb 15 eine eher geringe Streubreite auf. Der Durchschnitt des elektrischen Nutzungsgrads aller Blockheizkraftwerke errechnete sich zu 37 %.

4.2.5 Eigenstrombedarf

Der elektrische Energiebedarf zum Betrieb der Biogasanlagen wurde bei den meisten Pilotbetrieben von außerhalb bezogen, d. h. aus dem öffentlichen Stromnetz oder von einer PV-Anlage. Für Pilotbetrieb 8 wurde er aus der Differenz der produzierten und der eingespeisten elektrischen Energie errechnet, da diese Anlage eine Überschusseinspeisung betreibt. Für Pilotanlagen 22 und 24 wurde der elektrische Energiebedarf mittels Stromzählern ermittelt, da auf den Netzstromzähler noch andere Verbraucher des Betriebes mit aufgeschaltet waren.

Im Jahresmittel errechnete sich im Durchschnitt aller Pilotanlagen ein anteiliger elektrischer Energiebedarf von 9,0 % der produzierten Strommenge. Zwischen den Anlagen bestanden diesbezüglich jedoch erhebliche Unterschiede. Den niedrigsten Eigenstrombedarfsanteil mit 6,2 % realisierte Pilotbetrieb 10. Den höchsten Eigenstrombedarfsanteil wies die Pilotanlage 15 auf, was auf den enorm hohen Kraftaufwand für das Durchmischen, Aufbereiten und Separieren des hochviskosen Fermenterinhalt zurückzuführen ist (Abbildung 118).

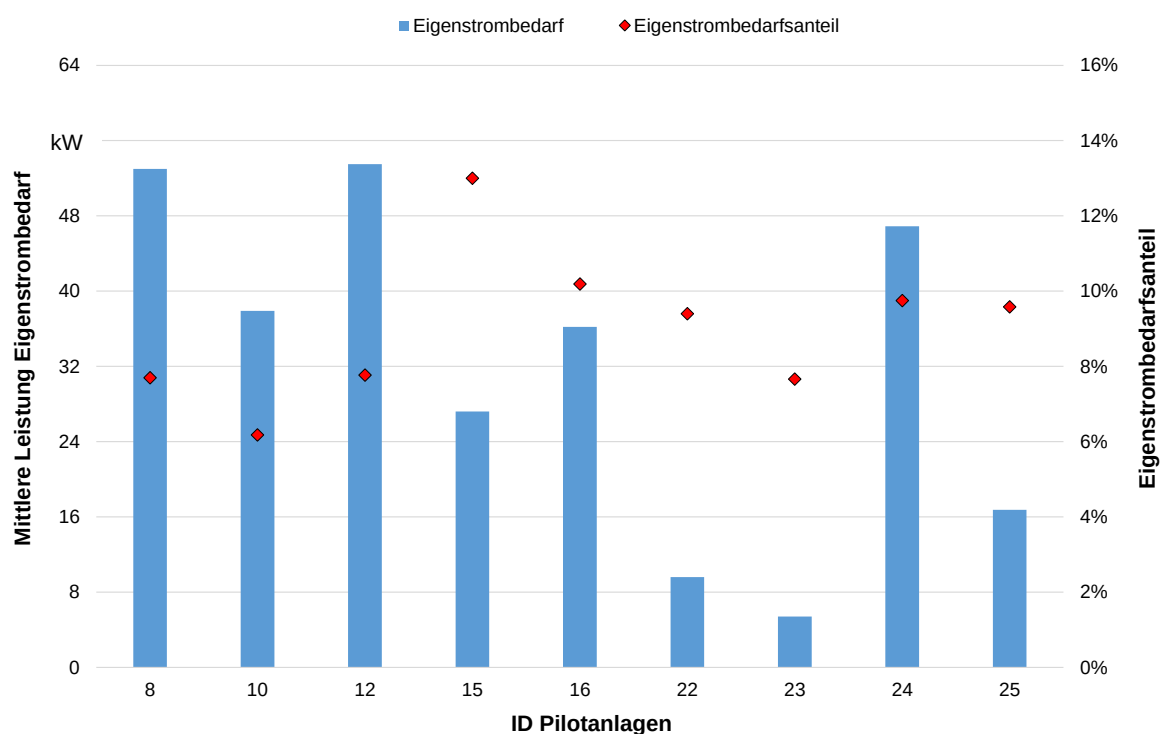


Abbildung 118: Gegenüberstellung der elektrischen Bedarfsleistung und des anteiligen elektrischen Energiebedarfs („Eigenstrombedarfsanteil“) der Pilotanlagen im Jahresmittel

Im Vergleich dazu erscheint der Eigenstrombedarfsanteil von Pilotanlage 16, welche ebenfalls ein hochviskoses Gärgemisch im Fermenter zeigte, mit ca. 10 % relativ gering. Gründe hierfür sind die deutlich höhere realisierte Leistung sowie eine bessere Ausnutzung des eingesetzten Substrats durch fast doppelt so hohe Verweilzeiten in den Gärbehältern im Vergleich zu Pilotanlage 15.

Der Unterschied im Eigenstrombedarfsanteil der beiden Kompaktbiogasanlagen der Pilotbetriebe 22 und 23 beruht auf der mangelnden Wärmenutzung des Pilotbetriebs 23. Bei Abzug des relativen hohen Strombedarfs für die Trocknung von Druschfrüchten und Holz aufgrund der großen Lüfterleistung unterscheidet sich der Eigenstrombedarfsanteil der beiden Anlagen nur noch um knapp 0,5 %.

Die Pilotanlagen 24 und 25 zeigten mit ca. 10 % einen etwa gleich hohen Eigenstrombedarfsanteil. Ein wesentlicher Anteil des Eigenstrombedarfs von PB 24 ist auf die Durchmischung der mit jeweils 2100 m³ Arbeitsvolumen sehr groß dimensionierten Fermenter und Nachgärer zurückzuführen. Da das Gärgemisch der Pilotanlage 25, welche ursprünglich für die Vergärung von Getreidebrei ausgelegt wurde, bei den nun eingesetzten Silagen nicht mehr ausreichend durchmischt werden konnte, werden die Einsatzstoffe nun mithilfe eines leistungsstarken Querstromzerspaners sowie eines Lochscheibennasszerkleinerers aufbereitet. Diese Zusatzaggregate trieben den elektrischen Energiebedarf in die Höhe.

Sowohl im Hinblick auf die elektrische BHKW-Leistung als auch den Eigenstrombedarfsanteil von knapp 8 % sind Pilotanlagen 8 und 12 sehr ähnlich. Die Unterschiede liegen lediglich in der Aufteilung des elektrischen Energiebedarfs. Während bei Pilotbetrieb 8 die Wärmenutzung zur Holztrocknung einen größeren Anteil des Gesamtstromverbrauchs verursachte, wurde bei Pilotbetrieb 12 ein erhöhter elektrischer Energiebedarf für die Durchmischung sowie die Kühlung der Gärbehälter im Sommer festgestellt.

4.2.6 Wärmeproduktion und Wärmenutzung

Die produzierte Wärmemenge wurde bei allen Pilotbiogasanlagen über die vom Hersteller angegebene Stromkennzahl aus der gesamten bereitgestellten elektrischen Energie errechnet. Die meisten übrigen Wärmemengen wurden gemessen. Lediglich die Wärmemengen für die Beheizung der Gärbehälter wurden für die Pilotanlagen 8, 23 und 24 anhand der Einsatzstoffmengen, Bauweise der Gärbehälter und der realisierten Gärtemperatur im Jahresdurchschnitt berechnet.

Im Mittel der Pilotanlagen wurden 60 % der BHKW-Wärme außerhalb der Biogasanlage abgesetzt und 13 % als Prozesswärme für die Beheizung der Gärbehälter verwendet. Ca. 27 % der BHKW-Wärme wurden über Notkühler an die Umgebung abgegeben oder gingen durch Übertragungsverluste in Form von Strahlungswärme verloren.

Den mit knapp 84 % höchsten Wärmenutzungsanteil erzielte Pilotanlage 25 (v. a. Nahwärmeversorgung einer Feriensiedlung und von Wohnhäusern), dicht gefolgt von Pilotanlage 8 mit 81 % (Nahwärmeversorgung eines Altenheims und mehrerer Mehrfamilienhäuser sowie Holztrocknung). Schlusslicht der Pilotanlagen hinsichtlich der Wärmenutzung war Pilotanlage 23 mit 21,4 % Absatzanteil an der BHKW-Wärme (Abbildung 119).

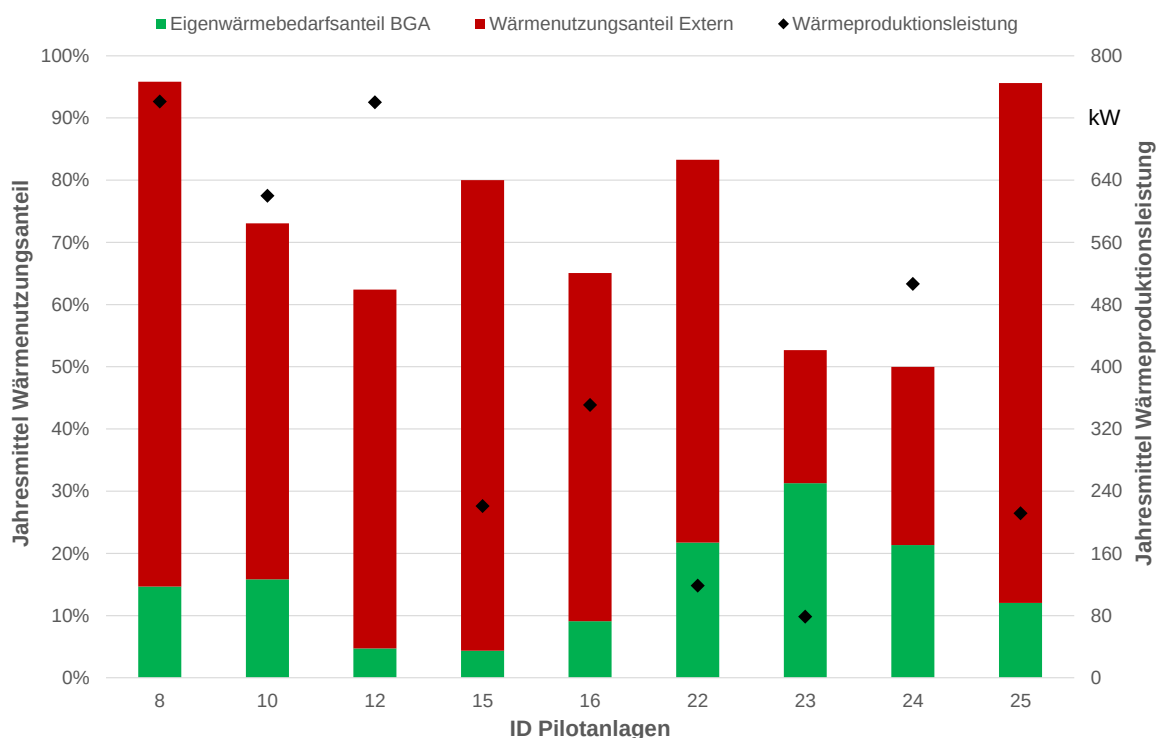


Abbildung 119: Gegenüberstellung der thermischen BHKW-Leistung, des anteiligen Prozesswärmebedarfs („Eigenwärmebedarfsanteil“) und des externen Wärmenutzungsanteils für die Pilotbetriebe

Bei Betrachtung des Parameters anteiliger Prozesswärmebedarf wiesen Anlage 23 mit 31 % und Anlage 22 mit knapp 22 % die höchsten Werte auf. Beide setzten ca. 80 % Gülle in der gesamten eingetragenen Frischmasse ein. Am entgegengesetzten Ende der Verteilung finden sich Anlage 15 mit 4,4 % (kein Gülleeinsatz) und Anlage 12 mit 4,7 % (kaum Gülleeinsatz) Eigenwärmebedarfsanteil. Bei den beiden letztgenannten Pilotanlagen trat auch das Phänomen der Selbsterwärmung der Gärbehälter auf. Im Falle der Pilotanlage 12 wurden die Hauptgärbehälter während des Sommers sogar mit einem Klimagerät gekühlt.

4.2.7 Methanproduktivität

Einen weiteren wichtigen Parameter zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Biogasanlage stellt die Methanproduktivität der Gärbehälter dar. Diese gibt Aufschluss darüber, wie viel Methan aus einem Kubikmeter Gärraum täglich erzeugt werden. Dementsprechend wird zur Ermittlung der Methanproduktivität die im Jahresmittel erzeugte tägliche Methanmenge durch das effektiv genutzte Arbeitsvolumen des Fermentersystems dividiert; unberücksichtigt bleibt das Volumen der Gärrestlager:

$$\text{Methanproduktivität} = \frac{\text{erzeugte Methanmenge pro Tag, } m^3 d^{-1}}{\text{Arbeitsvolumen des Fermentersystems, } m^3}$$

Die höchste Methanproduktivität realisierte Pilotanlage 22, da der Gärraum der beiden Kompaktfermenter effektiv nur 220 m³ fasst. Mit weitem Abstand folgt Pilotanlage 15, welche mit einem effektiven Fermentervolumen von nur 850 m³ ebenfalls eine sehr hohe Methanproduktivität aufwies. Die niedrigste Methanproduktivität im Beobachtungszeitraum zeigte Pilotanlage 23, welche in Bezug auf den effektiven Gärraum von 960 m³ eine relativ geringe Methanrate erzielte (Abbildung 120).

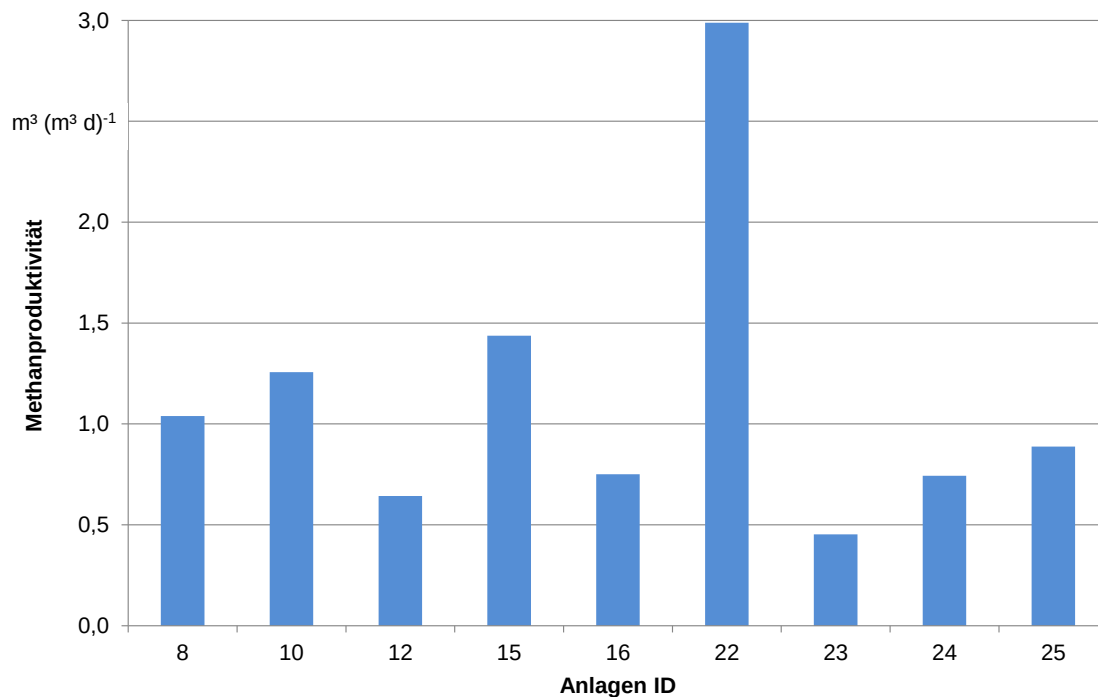


Abbildung 120: Gegenüberstellung der Methanproduktivität des Fermentersystems der Pilotanlagen

4.2.8 Stromausbeute aus Frischmasse und organischer Trockenmasse

Die Ausbeute an elektrischer Energie bezogen auf die in den Gärraum eingetragene Menge an Frischmasse oder organischer Trockenmasse ist ein Kennwert für die Gesamteffizienz von Biogasanlagen. Sie kann auch für Anlagen bestimmt werden, die über keine Gas-mengenerfassung und Gasanalyse verfügen. Die Netto-Ausbeute an elektrischer Energie wird um den Eigenbedarf der Biogasanlage an elektrischer Energie bereinigt und gibt somit Auskunft darüber, welche Menge an elektrischer Energie aus den Einsatzstoffen im Saldo als Nutzenergie bereitgestellt wird. Wie in Abbildung 121 dargestellt, erzielte Pilotbetrieb 8 hierbei den höchsten Wert, Pilotbetriebe 22 und 23 wiesen die niedrigste elektrische Energieausbeute aus den Einsatzstoffen auf.

Bei einem hohen Anteil an Gülle an den Einsatzstoffen verzerrt der hohe Wassereintrag den Vergleich auf Frischmassebasis. Einen deutlich besseren Vergleichsmaßstab stellt die eingetragene organische Trockenmasse dar. Hierdurch verringern sich die Unterschiede zwischen den Anlagen deutlich (Abbildung 122).

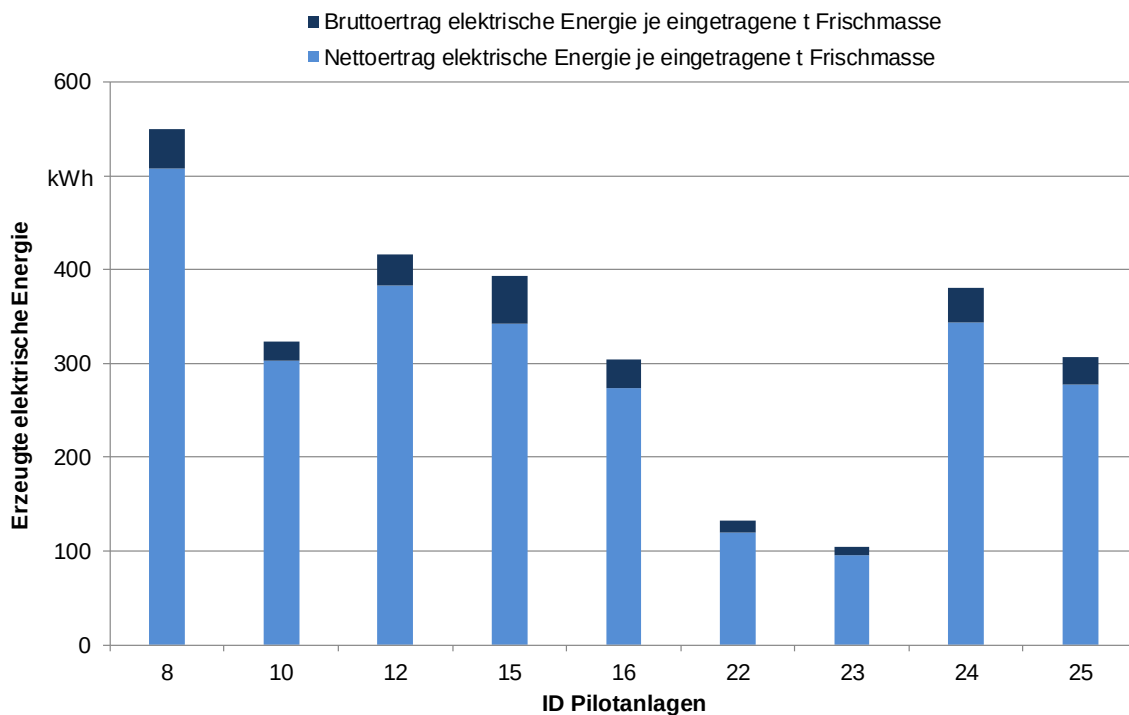


Abbildung 121: Gegenüberstellung der erreichten Netto-/Brutto-Ausbeute an elektrischer Energie der eingebrachten Frischmasse in den Pilotanlagen

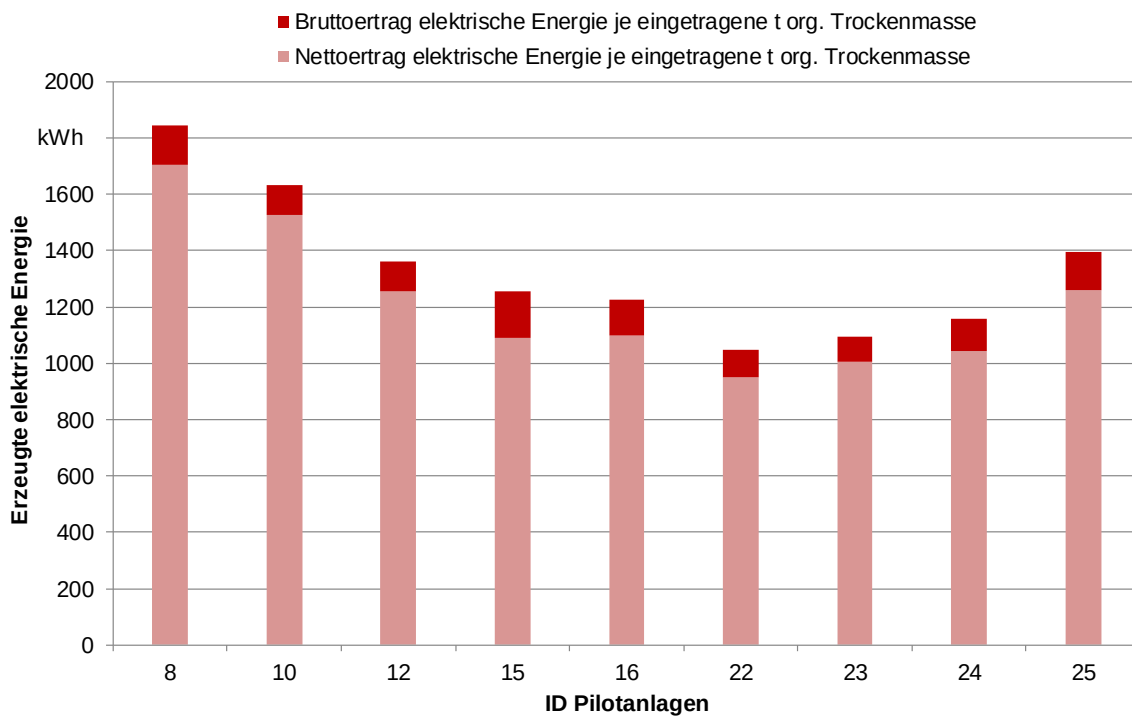


Abbildung 122: Gegenüberstellung der erreichten Netto-/Brutto-Ausbeute an elektrischer Energie aus der eingetragenen organischen Trockenmasse in den Pilotanlagen

4.2.9 Nutzungsgrad Methanenergie

Ein wichtiger Einflussfaktor sowohl für die Wirtschaftlichkeit, als auch für die Treibhausgas- und Energiebilanz eines Biogasbetriebes ist der Nutzungsgrad des erzeugten Biogases. Dieser Parameter gibt Auskunft darüber, welcher Anteil der Energiemenge, gemessen am Heizwert des in der Biogasanlage erzeugten Methans, als Nutzenergie bereitgestellt wird. Für die nachfolgende Diskussion wurde zusätzlich zwischen Brutto- und Nettonutzungsgrad unterschieden. Die Berechnung dieser Parameter erfolgte nach folgenden Gleichungen:

$$NGR_{brutto} = \frac{\sum \text{Stromertrag}_{ZÖB} + \sum \text{Wärmeertrag}_{ZÖB}}{\sum \text{Heizwert Methanertrag}}$$

$$NGR_{netto} = NGR_{brutto} - \frac{(\sum \text{Eigenstrombedarf}_{ZÖB} + \sum \text{Eigenwärmebedarf}_{ZÖB})}{\sum \text{Heizwert Methanertrag}}$$

mit NGR = Nutzungsgrad; ZÖB = Zündölbereinigt.

Wie in Abbildung 123 dargestellt, schnitt Pilotbetrieb 25 mit 78,5 % Brutto- bzw. 69,7 % Netto-Nutzungsgrad am besten ab, dicht gefolgt von Pilotanlage 15 mit 75,2 % Brutto- bzw. 67,6 % Nettonutzungsgrad und Pilotanlage 8 mit 75 % Brutto- bzw. 66,4 % Nettonutzungsgrad. Den geringsten Netto-Nutzungsgrad erzielte Pilotbetrieb 23 mit 41,9 % der im erzeugten Methan enthaltenen Energie.

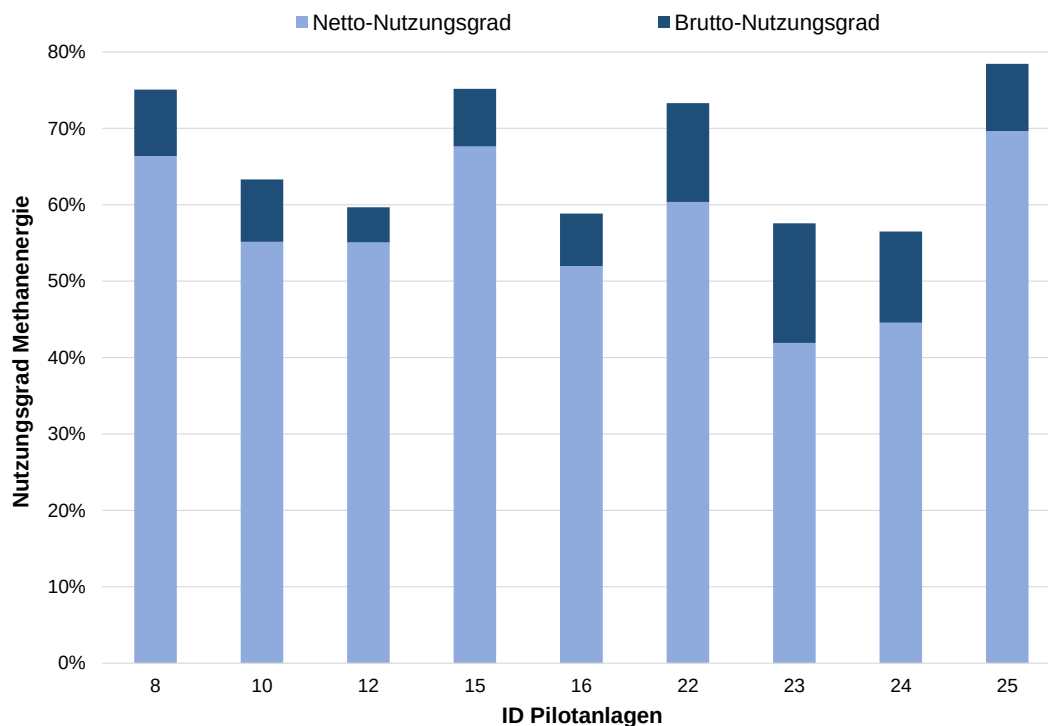


Abbildung 123: Gegenüberstellung des mittleren Brutto-/Netto-Nutzungsgrades der Methanenergie für die Pilotanlagen

Ausschlaggebend für die Erreichung eines hohen Netto- Nutzungsgrades der Methanenergie ist vor allem ein gut entwickeltes Wärmenutzungskonzept, weniger der elektrische Nutzungsgrad des BHKW und der elektrische Eigenenergiebedarf der Biogasanlage.

4.2.10 Biogaszusammensetzung

Im Durchschnitt der untersuchten Pilotbetriebe betrug der im Biogas gemessene Methangehalt 52,2 %. Auffällig ist der im Anlagenvergleich deutlich höhere Methangehalt im Biogas aus Pilotanlage 25 mit 58,9 % (Abbildung 124). Dieser ist durch die zweistufig-zweiphasige Prozessführung mit einer zur Atmosphäre hin offenen Hydrolysegrube zu erklären, aus der CO₂ freigesetzt und damit die Methankonzentration im Biogas aus der Methanstufe erhöht wurde. Den niedrigsten mittleren Methangehalt im Biogas zeigte Pilotanlage 15 mit 49,3 %. Die größten Schwankungen im Methangehalt des Biogases mit einer Standardabweichung von 3,5 % wurden in Pilotanlage 24 beobachtet, was auf die saisonalen Unterschiede bei der Auswahl der Einsatzstoffe zurückzuführen ist.

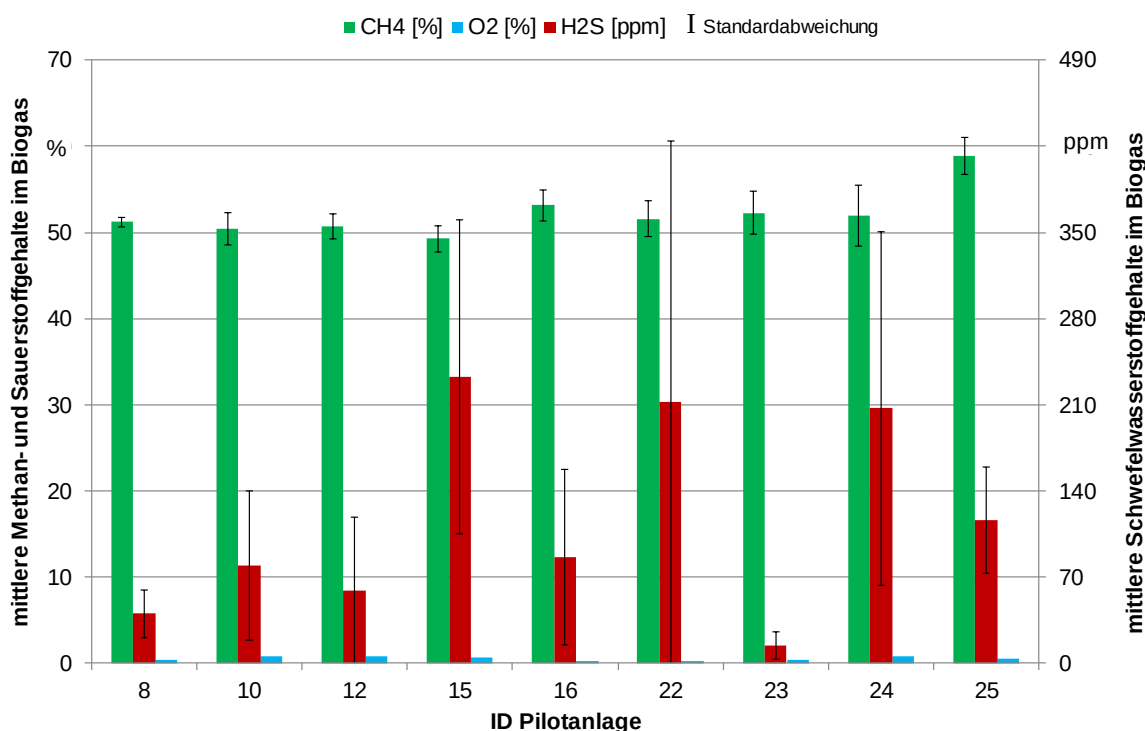


Abbildung 124: Gegenüberstellung der volumetrischen Gehalte an Methan, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff im Biogas aus den Pilotanlagen (Mittelwert und Standardabweichung)

Die gemessenen Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas der Pilotanlagen zeigten eine sehr große Variabilität. Die höchste Schwefelwasserstoffkonzentration trat mit über 1000 ppm in Pilotanlage 22 auf. Schwefelwasserstoffgehalte von im Mittel 200 ppm oder mehr wurden in Pilotanlagen 15, 22 und 24 gemessenen (Abbildung 124). Grund für die durchgängig relativ hohen Gehalte an H₂S im Biogas aus Anlage 22 war die offensichtlich zu geringe Besiedelungsfläche für Schwefelbakterien, da Luft zur biologischen Entschwefelung nur in das mit einem Tragluftdach ausgestattete Gärrestlager eingeblasen werden konnte. Als das Gärrestlager aufgrund zu geringen Füllstands nicht gerührt werden konnte, bildete sich eine deutlich erkennbare weiß-/gelbliche Schwefelschicht auf der Gärrestoberfläche. Während dieser Zeit sank der H₂S-Gehalt im Biogas auf unter 100 ppm. Als das Gärrestlager bei entsprechendem Füllstand wieder gerührt wurde, schossen die Werte in die Höhe. Auch bei Pilotanlagen 15 und 24 kann eine zu geringe Besiedelungsfläche als Grund für die hohen Schwefelwasserstoffgehalte vermutet werden. Bei Anlage 24 kommen als

Ursache die schwefelreichen Einsatzstoffe Kartoffeln, Pülpe und Biertreber hinzu (vgl. Abbildung 109).

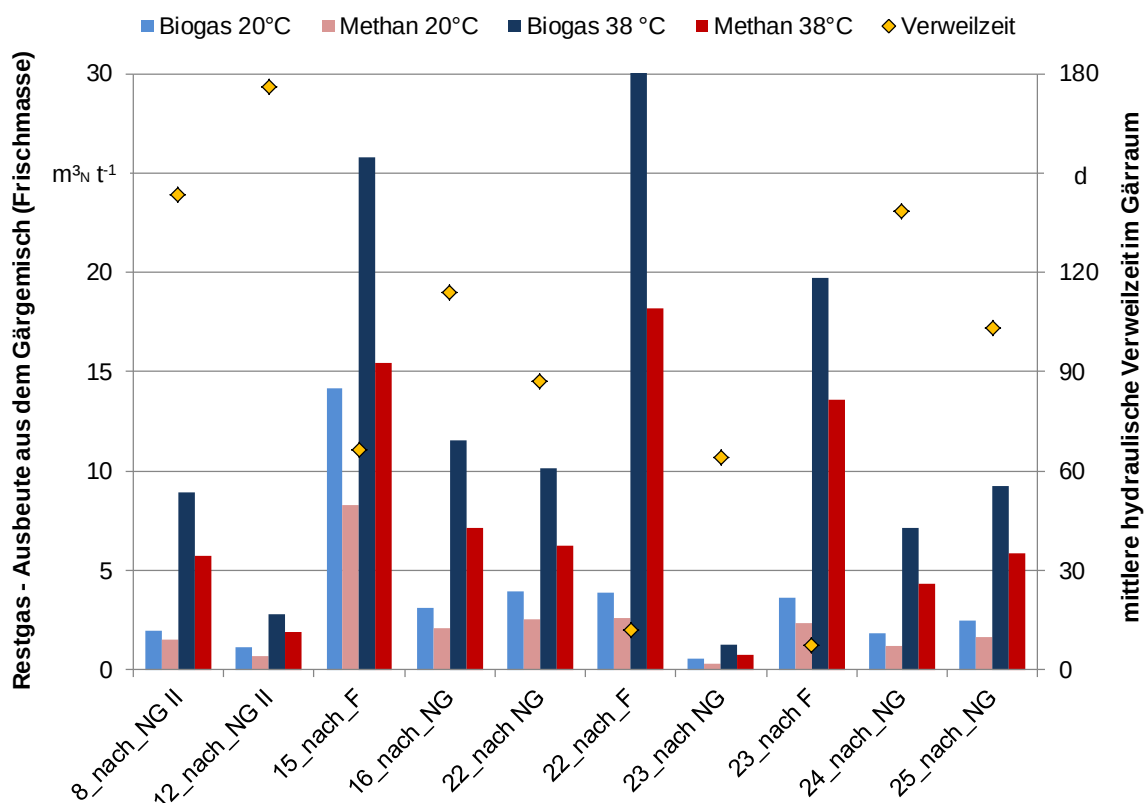
Alle Pilotanlagen arbeiteten mit biologischer Entschwefelung durch Lufteinblasen in die Gasstrecke. Der mittlere gemessene Sauerstoffgehalt im Biogas lag bei 0,5 %, wobei Pilotanlage 12 mit 0,8 % den höchsten Wert und Anlage 16 mit 0,2 % den niedrigsten Wert aufwies. Damit ergaben sich keine Hinweise auf eine zu hohe Luftrate. Mit Ausnahme von PB 8 wurden in allen Anlagen zusätzlich Eisenoxide zur chemischen Entschwefelung eingesetzt.

4.2.11 Restmethanpotential in Gärrückständen aus den Pilotanlagen

Anfang 2015 wurden Proben der Gärrückstände an unterschiedlichen Probenahmestellen der Pilotanlagen entnommen und zur Bestimmung des Restmethanpotenzials einem Gärttest unterzogen. Bei allen Pilotanlagen wurden Proben am Ablauf der letzten Vergärungsstufe gezogen, wobei das Gärrestlager der Pilotanlage 22 streng genommen keinen Nachgärer darstellt. Um jedoch abzuschätzen, wie sich das Restmethanpotential des Gärrests bei Durchlaufen eines weiteren Gärbehälters verändern würde, wurde die Probe aus dem Gärrestlager von PB 22 zu der Zeit entnommen, als der Behälter vollständig gefüllt war, ein Temperaturniveau von 36 °C erreicht hatte und mehrere Wochen gerührt worden war. In Pilotanlage 23 wurde zusätzlich zur letzten Stufe des Fermentersystems auch der Ablauf aus dem Hauptgärbehälter beprobt, um beurteilen zu können, wie sich die Abbauleistung dieses Kompaktfermenters darstellte. Aufgrund von Wartungsarbeiten war es leider nicht möglich, eine Probe aus dem Nachgärer der Anlage 10 zu entnehmen.

Das Restgaspotential im kalten Batchtest (20 °C) soll Auskunft über die Methanemissionen bei einer offenen Lagerung der Gärreste geben, während das im warmen Batchtest bei 38 °C ermittelte Restmethanpotential ein Maß für die Ausgärung der Gärreste darstellt. Die ermittelten Restgaspotentiale im kalten und warmen Batchansatz zeigten eine große Streubreite (Abbildung 125). Die höchsten Werte für das Restmethanpotential wurden für die Proben aus dem Ablauf der ersten Stufe der Pilotanlage 22 mit $18,2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, der Anlage 15 mit $15,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ und der Anlage 23 mit $13,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ermittelt. Den niedrigsten Wert im „warmen“ Batchtest erreichte Pilotanlage 12 mit $1,9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Da der Nachgärer der Anlage 23 zum Zeitpunkt der Probenahme aufgrund von Rührwerksproblemen eine deutlich ausgeprägte Schwimmschicht aufwies, ist der in dieser Probe ermittelte Wert zu verwerfen.

Dass ein Nachgärer bei Pilotanlage 22 das Restmethanpotential deutlich senken und dementsprechend die Gasausbeute der Einsatzstoffe wesentlich verbessern würde, zeigt das um 65 % niedrigere, im warmen Batchtest ermittelte Restmethanpotential der Gärrestprobe aus dem Gärrestlager im Vergleich zu der Fermenterprobe. Fast man die Ergebnisse für das Restmethanpotential zusammen, so wird ein Trend zu abnehmendem Restgaspotential des Gärrestes mit zunehmender Verweilzeit des Gärgemischs im Fermentersystem erkennbar.



nach_NG = Probe aus dem Ablauf des Nachgärers;

nach_F = Probe aus dem Ablauf des Fermenters;

22_nach_NG = Probe aus dem Ablauf des Gärrestlagers (betrachtet als „Nachgärer“).

Abbildung 125: Gegenüberstellung der im „kalten“ und „warmen“ Gärtest ermittelten Restmethanausbeuten aus Gärrückstandsproben der Pilotanlagen

4.2.12 Abbaugrad der oTS

Um die Ergebnisse zur Methanausbeute aus den Einsatzstoffen und zum Restmethanpotential in den Gärrückständen zu plausibilisieren, wurde nach dem Ansatz von KOCH (2015) auch der oTS-Abbaugrad in den Pilotanlagen ermittelt. Hierbei wird als Bezugsgröße der Gehalt an mineralischer Substanz in den Einsatzstoffen/im Gärrückstand herangezogen und die Annahme getroffen, dass sich die Biogasanlage im stationären Betrieb befindet, d. h. keine Akkumulation in den Gärbehältern erfolgt. In diesem Fall gilt:

$$\text{Abbaugrad}_{\text{oTS}} = 1 - \frac{\text{oTS}_{\text{Output}} \cdot (1 - \text{oTS}_{\text{Input}})}{\text{oTS}_{\text{Input}} \cdot (1 - \text{oTS}_{\text{Output}})}$$

mit $\text{oTS}_{\text{Input}}$ = oTS-Gehalt der Mischung der Einsatzstoffe; $\text{oTS}_{\text{Output}}$ = oTS-Gehalt im Ablauf des Fermentersystems.

Es errechnen sich Werte von 58 % (Anlage 22) bis 84 % (Anlage 8) (Abbildung 126). Die Relationen dieser Werte decken sich qualitativ mit den relativen Biogas-/Methanausbeuten (vgl. Abbildung 116). Allerdings hebt sich Anlage 8 hier deutlich weniger ab, was ein weiterer Hinweis auf einen möglichen systematischen Fehler bei der Substratwägung in dieser Anlage ist. Die vergleichsweise große Streubreite des oTS-Abbaugrades in Anlagen 15 und 16 könnte auf den hohen Schmutzeintrag mit Kleegrassilage zurückzuführen sein.

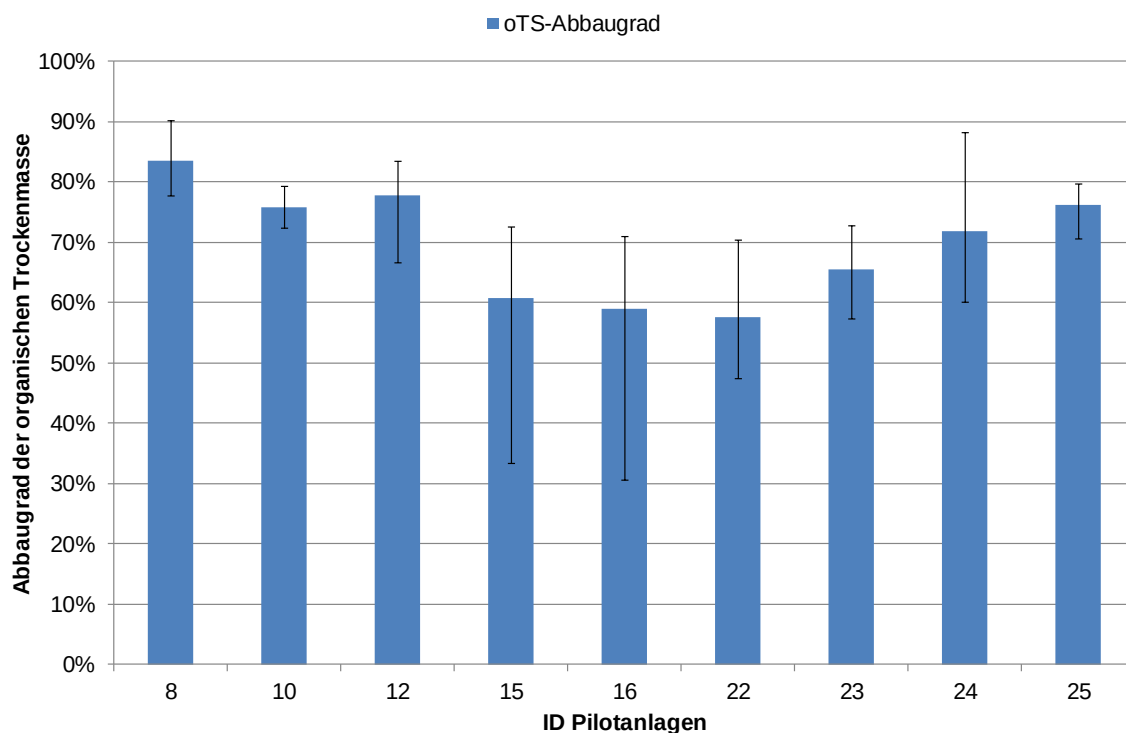


Abbildung 126: Gegenüberstellung der berechneten oTS-Abbaugrade für die Pilotanlagen im Beobachtungszeitraum 2014 (Mittelwert und Spannweite)

4.2.13 THG- und KEV-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas

Mit dem ‚THG-Rechner‘ wurden für die Biogasketten der hier zu bewertenden neun Pilotbetriebe die Massen an THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten und der KEV in Primärenergieeinheiten für das Jahr 2014 berechnet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Berechnete THG-Emissionen und KEV für die Biogasketten der Pilotbetriebe im Jahr 2014

Betriebs-ID	22	23	24	25	8	10	12	15	16
CO ₂ -Äquiv., kg	310.568	286.511	2.067.076	769.765	2.220.353	2.163.702	2.511.801	1.441.283	1.865.254
KEV, kWh	324.989	380.875	2.071.462	757.143	1.051.420	2.786.071	2.501.608	1.607.603	1.620.038

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 fünf Betrieben die CO₂-Äquivalente mit einem Anteil von 60 bis 70 % überwiegend aus der Substratbereitstellung stammen, bei zwei Betrieben (22, 25) je etwa zur Hälfte aus beiden Bereichen und bei zwei weiteren Betrieben (15, 23) zum größeren Teil aus der Biogasanlage. Der KEV wird in drei von neun Betrieben (15, 22, 23) mehr oder weniger deutlich vom Bereich Biogasproduktion/-verwertung dominiert (Abbildung 127).

Es sollen hier zwei Betriebe herausgegriffen werden, die bezüglich der Aufteilung der THG-Emissionen und des KEV auffällig sind: #8 und #15. Betrieb 8 hat einen äußerst geringen KEV der Biogasproduktion/-verwertung, da er (im Regelbetrieb) keinen Strom aus dem öffentlichen Netz bezieht und ausschließlich Gas-Otto-Motoren betreibt. Mit 30 % weist er in diesem Vergleich zudem den niedrigsten Anteil der THG-Emissionen aus der Biogasanlage auf, während die THG-Bilanz durch den Mineraldüngereinsatz und die Lachgasemissionen bei der Energiepflanzenproduktion dominiert werden (Abbildung 128). Betrieb 15 stellt das entgegengesetzte Extrem dar. Hier ist die offene Lagerung des

Gärrestes, der im Gärttest ein sehr hohes Restmethanpotenzial aufwies, die Hauptquelle für CO₂-Äquivalente (Abbildung 128). Da es sich um einen ökologisch wirtschaftenden Betrieb handelt, ist der KEV aus der Substratbereitstellung vergleichsweise gering. Die Biogasanlage benötigt allerdings eine hohe Energiezufuhr in Form von Zündöl und elektrischem Strom aus dem Netz (Abbildung 129).

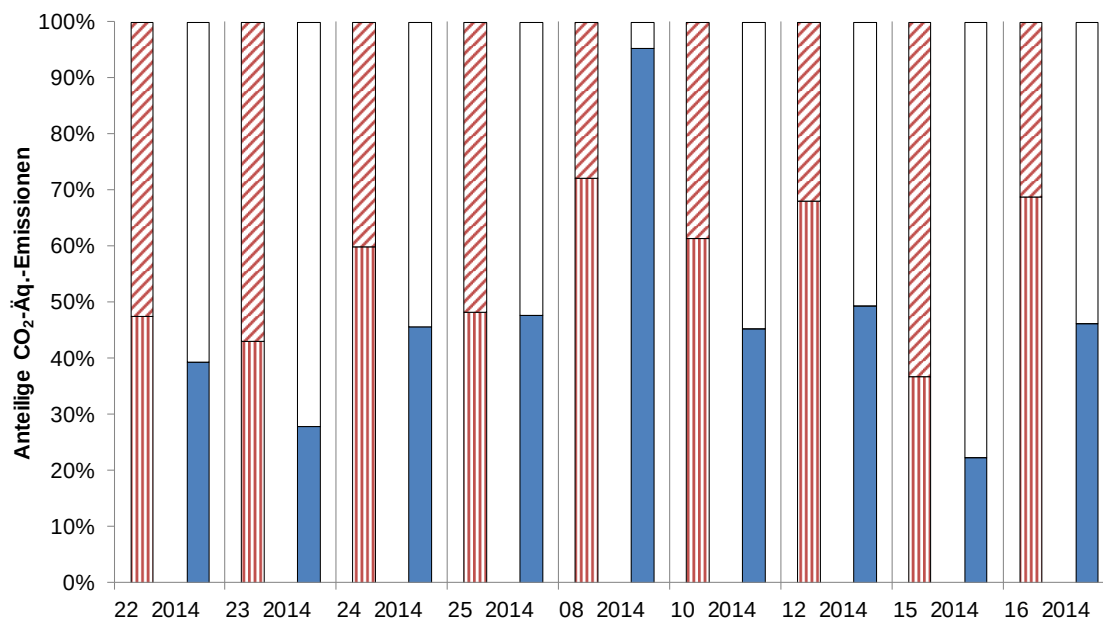


Abbildung 127: Aufteilung der CO₂-Äquivalente (schraffierte Säulen) und des KEV (ausgefüllte Säulen) auf die beiden Prozessbereiche Substratbereitstellung (untere Säulenabschnitte) und Biogasproduktion/-verwertung (obere Säulenabschnitte)

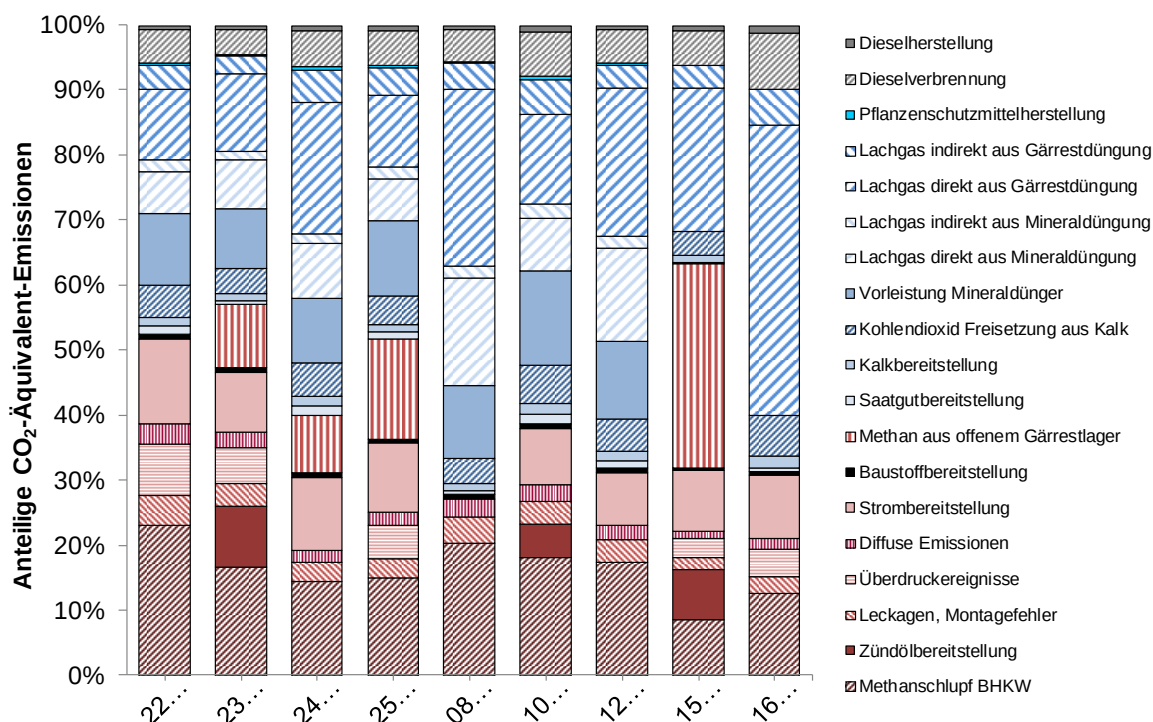


Abbildung 128: Aufteilung der CO₂-Äquivalente der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse

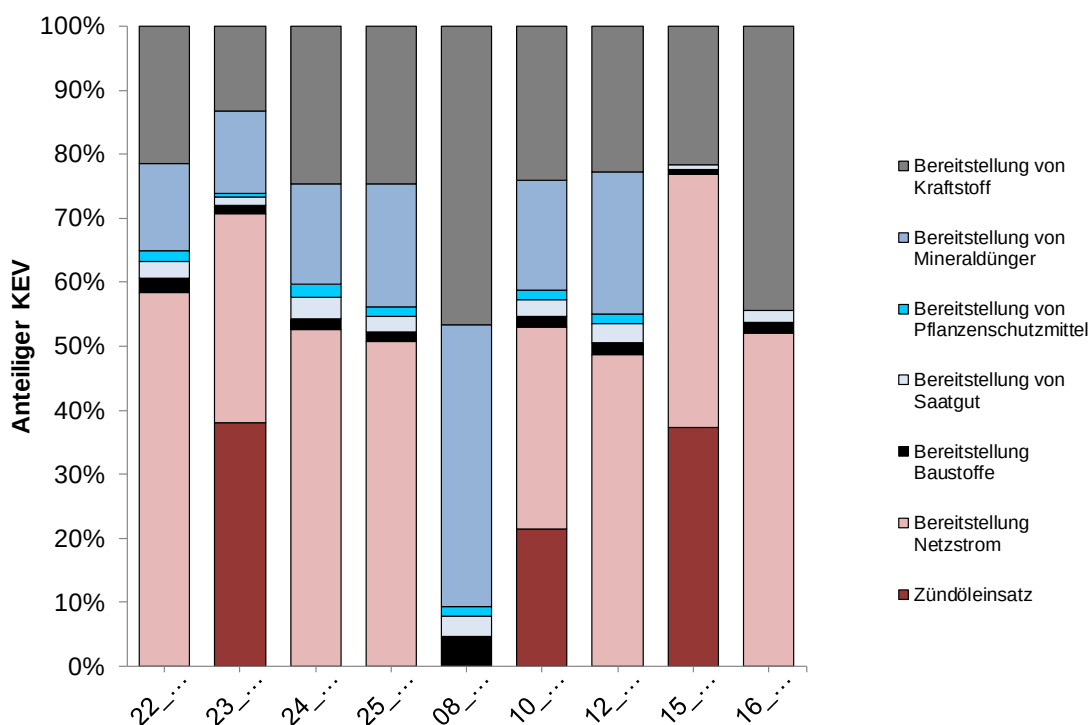


Abbildung 129: Aufteilung des KEV der Biogaskette auf die einzelnen Prozesse

Die berechneten THG-Emissionen und kumulierten Energieverbräuche wurden anschließend auf die Nutzenergie der Netto-Stromeinspeisung bezogen. Für die Ausweisung dieser spezifischen Umweltwirkungen je kWh Nutzenergie gemäß Tabelle 11 wurden zwei Methoden angewandt: (1) Gutschrift für die Substitution von Wärme aus fossilen Quellen durch BHKW-Wärme, (2) Allokation nach Exergie-Methode. Für (1) wurde eine Erdgas-Heizung mit spezifischen CO₂-Äq.-Emissionen von 284 g kWh⁻¹ und einem KEV-Wert von 1,338 angesetzt. Für (2) wurde mit einer Carnot-Effizienz von 0,3546 bei einem Temperaturniveau von 150 °C (423 Kelvin) gerechnet.

Tabelle 11: Spezifische Werte für die THG-Emissionen und den KEV bezogen auf die Netto-Strombereitstellung aus Biogas für die Biogas-Pilotbetriebe

Betriebs-ID	22	23	24	25	8	10	12	15	16
CO₂-Äquivalente, g kWh⁻¹									
Gutschriftenmethode:									
Emissionen Biogaskette	348	461	490	510	369	402	417	784	597
Substitution von Erdgas	<u>-183</u>	<u>-61</u>	<u>-77</u>	<u>-255</u>	<u>-224</u>	<u>-138</u>	<u>-159</u>	<u>-204</u>	<u>-193</u>
Saldo	165	400	413	255	145	264	258	581	404
Allokation nach Exergie	248	341	348	369	266	300	301	568	432
KEV, 1									
Gutschriftenmethode:									
KEV der Biogaskette	0,36	0,61	0,49	0,50	0,17	0,52	0,41	0,87	0,52
Substitution von Erdgas	<u>-0,86</u>	<u>-0,29</u>	<u>-0,36</u>	<u>-1,20</u>	<u>-1,05</u>	<u>-0,65</u>	<u>-0,75</u>	<u>-0,96</u>	<u>-0,91</u>
Saldo	-0,50	0,33	0,13	-0,70	-0,88	-0,13	-0,34	-0,09	-0,39
Allokation nach Exergie	0,26	0,45	0,35	0,36	0,13	0,40	0,28	0,53	0,37

Die spezifischen Brutto- CO_2 -Äq.-Emissionen der Strombereitstellung variieren für die neun Pilotbetriebe von 348 bis 784 g kWh^{-1} ($97 - 218 \text{ g MJ}^{-1}$). Betrieb 15 mit den höchsten spezifischen THG-Emissionen liegt um ca. 30 % über dem Emissionsfaktor des deutschen Kraftwerksparks im Jahr 2013 von 598 g kWh^{-1} (nach FRITSCH & GREß, 2014), Betrieb 16 liegt mit diesem gleichauf (Abbildung 130).

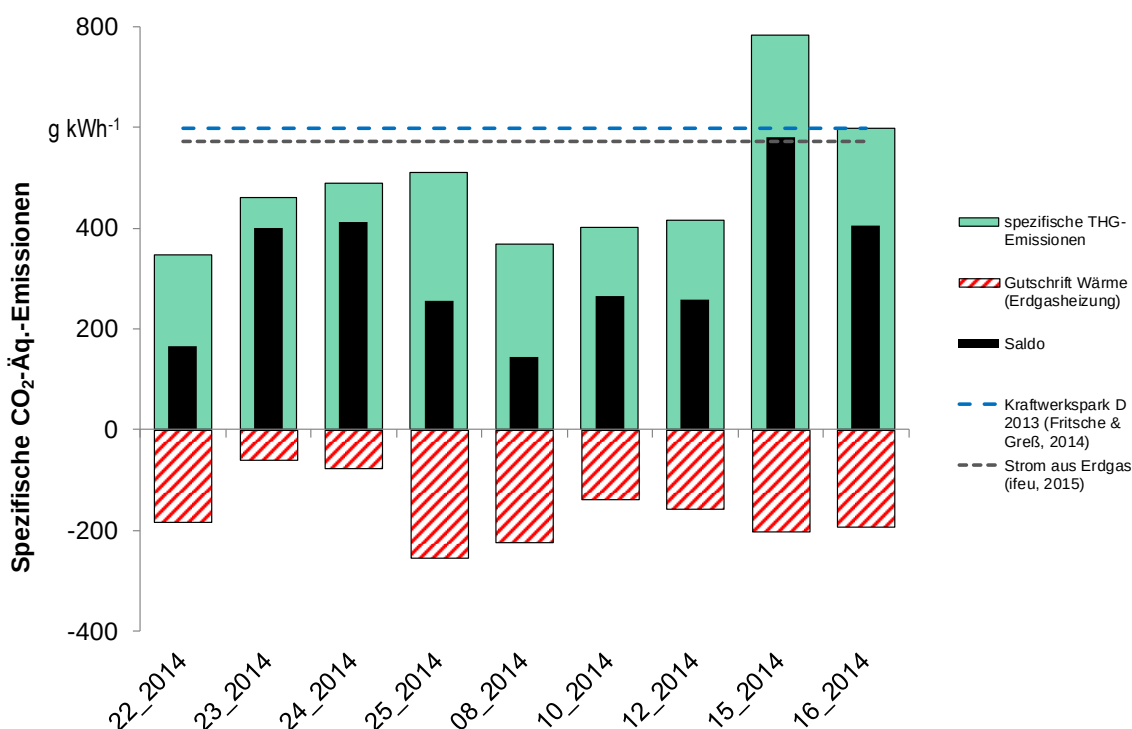


Abbildung 130: Spezifische CO_2 -Äq.-Emissionen der Strombereitstellung aus den Biogas-Pilotbetrieben nach Gutschriftenmethode im Vergleich zu ausgewählten Referenzsystemen

Wird für die von den Biogasanlagen abgesetzte Heizwärme eine Gutschrift für die Substitution der Wärmebereitstellung aus Erdgas angesetzt, so ergeben sich im Saldo spezifische Brutto- CO_2 -Äq.-Emissionen von 145 bis 581 g kWh^{-1} ($40 - 161 \text{ g MJ}^{-1}$). Betrieb 15 liegt somit knapp über dem Wert der Strombereitstellung aus Erdgas von 572 g kWh^{-1} (nach IFEU, 2015). Im Vergleich zu diesem Referenzwert errechnet sich für die Strombereitstellung aus den Biogas-Pilotbetrieben eine Minderung der CO_2 -Äq.-Emissionen von ≈ 0 bis 71 %.

Die Anlagen 23, 24, 25 und 15 mit offenem Gärrestlager weisen neben Anlage 16 die höchsten spezifischen Brutto- CO_2 -Äq.-Emissionen auf und liegen allesamt deutlich über 400 g kWh^{-1} (Abbildung 130). Hierzu ist anzumerken, dass die getroffene Annahme, dass das gesamte im Gärttest gemessene Restmethanpotential während der Lagerung freigesetzt wird, den schlechtesten Fall darstellt. Realiter ist von geringeren Methanemissionen aus dem Gärrestlager auszugehen. Betrieb 25 kann sich im Saldo der CO_2 -Äq.-Emissionen aufgrund der sehr hohen Wärmegutschrift von den übrigen Betrieben mit offenem Gärrestlager absetzen. Betrieb 16 kommt trotz Gaserfassung aus dem Gärrestlager auf dasselbe Emissionsniveau wie Betriebe 23 und 24. In diesem ökologisch wirtschaftenden Betrieb wird mit Klee gras als Hauptsubstrat für die Biogasproduktion sehr viel Stickstoff umgesetzt, so dass die Lachgasemissionen aus der Gärrestdüngung etwa die Hälfte der CO_2 -Äq.-Emissionen ausmachen (Abbildung 128).

Der KEV der Strombereitstellung aus Biogas in den neun Pilotbetrieben variiert von 0,17 bis 0,87; mit Gutschriften für die Substitution von Erdgas errechnen sich Werte von -0,88 bis 0,33 (Tabelle 10). Gegenüber dem deutschen Kraftwerkspark in 2013 mit einem KEV-Wert von 2,09 (FRITSCHKE & GREß, 2014) errechnen sich daraus Einsparungen an fossilen Energieträgern von 81 bis 142 %.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Beobachtungen an neuen bayerischen Biogasbetrieben während des intensiven Monitorings über den Zeitraum von einem Jahr. In den Biogasanlagen auf diesen Betrieben – davon zwei ökologisch und sieben konventionell wirtschaftend – wurden Wirtschaftsdünger aus eigener Tierhaltung, Energiepflanzen und in einem Fall auch Reststoffe bzw. Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung eingesetzt. Das erzeugte Biogas wurde in Blockheizkraftwerken mit Verbrennungsmotoren in Strom und Wärme umgewandelt.

Die Pilotbetriebe unterscheiden sich entsprechend der Ausrichtung des Forschungsprojekts vor allem hinsichtlich der Auswahl der Einsatzstoffe, des Betriebsmanagements und der Anlagentechnik. Im Folgenden wird versucht, aus den Beobachtungen während des Monitorings grundlegende Schlussfolgerungen in Bezug auf die Diversifizierung der Einsatzstoffe und der Verfahrenstechnik bei der Biogasproduktion in der Landwirtschaft 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.

Beginnt man die Diskussion der Ergebnisse aus der Perspektive der Einsatzstoffe, so lassen sich die Biogasanlagen in drei Gruppen einteilen: Gruppe I umfasst die Betriebe 22 und 23, welche mit einem Massenanteil von ca. 80 % hauptsächlich Gülle aus dem eigenen Betrieb einsetzten. Diese Gruppe ist zugleich verfahrenstechnisch interessant, da beide Anlagen sogenannte „Kompaktfermenter“ aufweisen, welche in Betrieb 22 als „Hochreaktor“ mit integrierter Hydrolyse-/Versäuerungskammer, in Betrieb 23 als liegender „Propfenstromreaktor“ ausgeführt sind. Bei Anlage 22 wurde bisher auf einen Nachgärer verzichtet.

In Gruppe II lassen sich die Betriebe 10, 16 und 25 als Ko-Fermentationsanlagen mit einem Masseanteil von ca. einem Drittel Gülle oder Mist und zwei Dritteln pflanzlicher Einsatzstoffe zusammenfassen. Diese Gruppe stellt sich verfahrenstechnisch sehr inhomogen dar. Anlage 10 zeigt eine klassische zweistufige Rührkesselskaskade mit zwei parallel betriebenen Hauptgärbehältern und einem verhältnismäßig klein dimensionierten Nachgärbehälter. Anlage 16 besteht aus einem liegenden Hauptgärbehälter und einem groß dimensionierten Rührkessel-Nachgärer. Anlage 25 arbeitet nach einem dreistufigen Konzept mit einer (zur Atmosphäre hin offenen) Hydrolyse-/Versäuerungsgrube, einem Rührkesselfermenter und einem Rührkessel-Nachgärer.

Gruppe III schließlich umfasst die Betriebe 8, 12, 15 und 24. Diese sind als „NAWARO-Anlagen“ zu bezeichnen und setzen weniger als zehn Massenprozent Wirtschaftsdünger tierischen Ursprungs ein. Betrieb 24 verwertete als Besonderheit auch ca. 20 % Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung. Verfahrenstechnisch tritt aus dieser Gruppe nur das einstufige Verfahren der Anlage 15 mit einem aus Betonfertigteilen erstellten Rundfermenter (mit Massivdecke) hervor. Die Rührkesselskaskaden der Anlagen 8, 12 und 24 weisen im Anlagenvergleich die längsten hydraulischen Verweilzeiten auf.

Bezüglich der der Gärstrecke lässt sich zu Gruppe I sagen, dass sich im hier dokumentierten Monitoring für die „Kompaktfermenter“ keine Vorteile erkennen ließen. Betrachtet man das Restmethanpotential, so wiesen diese klein dimensionierten Fermenter eine geringe Abbauleistung auf. In der Gesamtgasausbeute wurde dies dann im Fall von Anlage 22 durch das Gärrestlager mit Gaserfassung zu einem Großteil ausgeglichen. Anlage 23 zeigte insgesamt eine unbefriedigende relative Gasausbeute, wobei auch die sehr unruhige

Anlagenführung eine Rolle spielte. Der Fermenter dieser Anlage befand sich an der Grenze zur Versäuerung. Beide Anlagen wiesen einen verhältnismäßig geringen anteiligen elektrischen Energiebedarf und zugleich einen hohen Prozesswärmebedarf auf, wie es für Gülleanlagen zu erwarten ist.

Gruppe II ist zu inhomogen, als dass sich allgemeine Schlussfolgerungen ziehen ließen. Alle drei Anlagen liefen sehr stabil und erzielten sehr gute Werte bei der Abbauleistung. Der elektrische Energiebedarf war für Anlage 10 sehr gering, für Anlagen 16 und 25 über dem Durchschnitt der hier betrachteten Anlagen. Bei Anlage 25 kann man festhalten, dass es dem Betreiber gut gelungen ist, das eigentlich für die Verwertung von Getreidebrei konzipierte Verfahren für den Einsatz eines hohen Anteils an Ganzpflanzensilagen umzurüsten, wenn auch mit hohem technischen Aufwand.

In Gruppe III erzielten die sogenannten „Hubraumanlagen“ 8, 12 und 24 sehr gute Abbauleistungen. Die gärbiologischen Probleme in Anlage 12 zeigten, dass Spurenelementmangel bei sehr hohen Anteilen an Mais und Getreide - GPS in der Futterration ein nicht zu unterschätzendes Thema ist. Anlage 24 wies einen verhältnismäßig hohen Prozessenergiebedarf auf, was in erster Linie der Bauweise, aber auch dem Alter der Anlage geschuldet ist. Die Abbauleistung der einstufigen Anlage 15 ist deutlich eingeschränkt. Dem sehr geringen Prozesswärmebedarf der Anlage steht der höchste anteilige elektrische Energiebedarf gegenüber. Auch zeigte insbesondere die Pilotanlage 12, dass bei Trockenfermentationsanlagen mit sehr hochviskosen Gärgemischen das Phänomen der Selbsterwärmung von Gärsubstraten in Fermentern auftreten kann, dem je nach Ausmaß mit entsprechenden Vorkehrungen begegnet werden muss.

Bezüglich der Biogasverwertung zeigten sich im Monitoring unterschiedliche Strategien der Betriebe. Drei Betriebe erweiterten während des Beobachtungszeitraums ihre BHKW-Kapazität im Hinblick auf die bedarfsorientierte Direktvermarktung der erzeugten elektrischen Energie, vier Anlagen wurden Teilnehmer eines Direktvermarktungspools. Das Ziel einer möglichst hohen Arbeitsausnutzung des BHKW ist daher als Bewertungsmaßstab nicht mehr geeignet. Vielmehr sind nun die Parameter tägliche Laufzeit, Volllast-/ Teillastbetrieb und die realisierte Bemessungsleistung interessant. Eine Beeinträchtigung der BHKW-Auslastung aufgrund gärbiologischer Probleme trat nur in Anlage 23 auf.

Ausschlaggebender Faktor für den Gesamtnutzungsgrad des erzeugten Biogases war ein gut entwickeltes Konzept für den Wärmeabsatz. Vier der neun Anlagen erzielten Netto-Nutzungsgrade bezogen auf die Methanenergie von über 60 %, drei weitere mehr als 50 %. In der ersten Phase des Biogasanlagen-Monitorings in Bayern wurde letztere Schwelle nur von zwei Betrieben überschritten (darunter #8). Gemessen am Brutto-Nutzungsgrad haben Anlagen 8, 15, 22 und 25 praktisch das Optimum erreicht. Es stellt sich die Frage, wie sich eine Flexibilisierung der Stromerzeugung auf den Wärmeabsatz und damit auch den Netto-Nutzungsgrad der Methanenergie auswirken wird.

Ob für die Vergärung größerer Mengen an Gülle und Wirtschaftsdünger ein Biogasanlagenkonzept mit modular aufgebauten Kompaktfermentern, welche deutlich höhere Anschaffungskosten als herkömmliche Rührkesselfermenter aus Stahlbeton aufweisen, interessant ist, muss individuell auch im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Baufläche vor Ort entschieden werden. Fest steht, die relativ platzsparend gebauten Kompaktbiogasanlagen der Betriebe 22 und 23 hatten sich gut zwischen die Betriebsgebäude und Stallungen eingefügt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Autoren aus dem hier vorgestellten Anlagenvergleich, der auf einem intensiven Monitoring von neun Biogasanlagen über einen Zeitraum von einem Jahr beruht, keine Präferenz für ein bestimmtes Verfahrenskonzept ableiten können – mit einer Ausnahme: Eine einstufige Verfahrensführung mit offener Gärrestlagerung erscheint weder aus Sicht der Energieeffizienz, noch des Klima- und Ressourcenschutzes als akzeptabel. Hingegen bestätigt sich erneut, dass das Anlagenmanagement und damit die Qualifikationen sowie die Erfahrungen des Betreibers ein entscheidender Faktor für den stabilen und effizienten Betrieb einer Biogasanlage sind.

6 Wissenstransfer

Die Datensätze, die im Rahmen des Monitorings auf den bayerischen Pilotanlagen zur Biogasproduktion erhoben werden, dürften in Umfang und Qualität deutschlandweit einmalig sein. Seit Beginn des Biogas-Monitorings bildeten diese Daten Anknüpfungspunkte für eine Vielzahl weiterer Forschungsarbeiten an der LfL. Zu nennen sind hierbei insbesondere die Bilanzierung der Nährstoffflüsse in Biogasbetrieben und die Ökobilanzierung von Biogasketten innerhalb der Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie - ExpReSSBio. Die Daten aus dem Biogas-Monitoring waren auch unverzichtbar für die Entwicklung der kostenfrei zugänglichen Web-Anwendungen *THG-Rechner Biogas* (für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Biogasketten für landwirtschaftliche Einsatzstoffe auf betrieblicher Ebene) und *Biogas Doc* (Effizienzbewertung und Schwachstellenanalyse von Biogasanlagen) am Institut für Landtechnik und Tierhaltung.

Der Wissenstransfer aus dem Biogas-Monitoring erfolgt(e) einerseits zu den Fachberatern an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durch telefonischen Kontakt und im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen, andererseits direkt in die Praxis durch Publikationen in elektronischen und Print-Medien sowie die Mitwirkung von Projektbearbeitern im Schulungsprogramm Biogas Kompetenz Bayern.

6.1 Publikationen

Kissel, R.; R. Kliche; G. Streicher und M. Effenberger: [Empfehlungen für die Auswahl von Rührwerken für Gärbehälter und Gärrestlager](#). In: Biogas Forum Bayern Nr. IV-10/2014 (2. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V., Freising: 2014

Kliche, R.; M. Effenberger; M. Lebuhn und J. Götz: [Hinweise zum \(Wieder\) Anfahren von Biogasanlagen](#). In: Biogas Forum Bayern Nr. III - 2/2015 (2. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V., Freising: 2015

Streicher, G.; R. Kliche und M. Effenberger: Rührwerke für Gärbehälter und Gärrestlager. *Allgäuer Bauernblatt* 42/2015

Streicher, G. und M. Effenberger: Rührwerke in Biogasanlagen TEIL I – Worauf ist zu achten? *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, Ausgabe KW 6: Februar 2016

Streicher, G. und M. Effenberger: Rührwerke in Biogasanlagen TEIL II – Welche Rührwerke passen zu meiner Anlage? *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, Ausgabe KW 7: Februar 2016

6.2 Veranstaltungen für die Betreiber der Pilot-Biogasanlagen

Seminare im Dezember 2012 und Februar 2016 an der LfL in Freising zur Präsentation und Diskussion der Ergebnisse aus dem Biogas-Monitoring und weiterer aktueller Forschungsarbeiten an der LfL

7 Literaturverzeichnis

- BACHMAIER, H.; EBERTSEDER, F.; EFFENBERGER, M.; KISSEL, R.; RIVERA GRACIA, E. 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, Freising: 2011, 93 S.
- BASERGA, U.: *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*. FAT-Bericht Nr. 512, 1998
- EBERTSEDER, F.; KISSEL, R.; LEHNER, A.; RIVERA GRACIA, E.; BACHMAIER, H. et al.: *Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 8/2012, Freising: 2012, 113 S.
- EFFENBERGER, M.; LEBUHN, M.: Biologie der Methangärung - die Belastungsgrenzen erkennen. *Mais Special*(2008): 4-7
- EFFENBERGER, M.; BACHMAIER, H.; KRÄNSEL, E.; LEHNER, A.; GRONAUER, A.: *Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 1/2010, Freising: 2010, 166 S.
- EFFENBERGER, M.; ANDRADE, D.; BACHMAIER, H.; LEBUHN, M.; MARÍN-PERÉZ, C. et al.: Verfahrenstechnik der Grasvergärung: Technik, Gärprozess, Klimabilanz. In: *Tagungsband zur 20. Biogas Jahrestagung und Fachmesse, 11.01.-13.01.2011, Nürnberg*, Freising: 2011, S. 29-38
- EFFENBERGER, M.; MAZE, M.; ZERHUSEN, B.: *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.
- FRITSCH, U. R.; GREß, H.-W.: *Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2013. Bericht für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA)*. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS), Darmstadt/Berlin: 2014, 10 S.
- HÄRING, G.; SONNLEITNER, M.; WIEDEMANN, L.; ZÖRNER, W.; ASCHMANN, V.: Technische Anforderungen an Biogasanlagen für die flexible Stromerzeugung. *Biogas Forum Bayern* (2013), IV-12 [http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Technische_Anforderungen_an_Biogasanlagen_fuer_die_flexible_Stromerzeugung.pdf]
- KISSEL, R.; ADIKARAM, K.K.L.B.; POHL, A.; RIVERA GRACIA, E.; EFFENBERGER, M.: *Betriebs-Monitoring: Vergleichende Untersuchung für die Einwerbung und Vergärung von Grünlandaufwüchsen - Schwerpunkt Anlagen-Monitoring*. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. FKZ K/11/05. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2015, 135 S.
- KOCH, K.: Calculating the degree of degradation of the volatile solids in continuously operated bioreactors. *Biomass Bioenergy* 74(2015), 79-83
- LEBUHN, M.; ANDRADE, D.; BAUER, C.; GRONAUER, A.: 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.

SCHEER, H.: *Der energetische Imperativ. 100% jetzt: Wie der vollständige Wechsel zu erneuerbaren Energien zu realisieren ist.* Antje Kunstmann Verlag, München: 2010, 270 S. - ISBN 978-3-88897-683-4

Anhang

Tabelle 12: Übersicht der elektrischen Verbraucher von Pilotbiogasanlage #8

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Mischschnecken	2	36
Schrägförderschnecken (F1 + F2)	2	7,5
Stopfschnecken (F1 + F2)	2	7,5
Summe	6	102
<i>Substrataufbereitung</i>		
Lochscheiben-Nasszerkleinerer	1	5,5
Drehkolbenpumpe Aufbereitung	1	7,5
Elektrokinetische Desintegration	1	0,5
Summe	3	13,5
<i>Rührwerke</i>		
Langachsrührwerk (F1 + F2)	2	15
Langachsrührwerk (NG1)	1	11
Stabmixer (F1 + F2 + NG2)	3	15
Stabmixer (NG1)	1	18,5
Tauchmotorrührwerk (VG)	1	7,5
Tauchmotorrührwerk (NG2)	1	15
Stabmixer (GL)	1	18,5
Tauchmotorrührwerk (GL)	2	15
Summe	12	175,5
<i>Pumpen</i>		
Drehkolbenpumpe (Pumpschacht)	1	15
Drehkolbenpumpe (Pumpstation)	1	22
Summe	2	37
<i>Sonstige Verbraucher</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,22

Tabelle 13: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #10

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Fräßschnecken Dosierer (F1)	2	1,5
Stopfschnecke Dosierer (F1)	1	15
Fräßschnecken Dosierer (F2)	2	1,5
Stopfschnecke Dosierer (F2)	1	15
Summe	6	36
<i>Rührwerke</i>		
Paddelrührwerk (1 x F1; 2 x F2)	3	15
Tauchmotorrührwerk (1 x N1; 2 x GL1)	3	15
Tauchmotorrührwerk (1 x VG)	1	7,5
Paddelrührwerk (GL)	1	15
Summe	8	112,5
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe (F2 + NG)	2	9
Kreiselpumpe (VG)	1	11
Summe	3	29
<i>Sonstige</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,4
Druckluft Kompressor	1	1,5
Summe	2	1,9
<i>BHKW</i>		
Raumlüfter	1	2,5
Gemischkühler	1	2,5

Anhang

Notkühler	1	1,4
Summe	3	6,4
<i>Gastechnik</i>		
Gasverdichter BHKW	3	0,8
Gaskühler	1	2,6
Summe	4	5
<i>Wärmeverteilung</i>		
HKP Fernwärme	1	0,88
HKP Fermenter	2	0,25
HKP Nachgärer	1	0,09
Pumpe Motorkühler BHKW	2	0,7
Summe	6	2,87

Tabelle 14: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #12

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Hydraulik Schubbodencontainer	1	7,5
Dosierschnecke	1	3,5
Trogschnecke	1	7,5
Hochförderschnecke	1	5,5
Stopfschnecken	2	3,5
Summe	6	31
<i>Rührwerke</i>		
Paddelrührwerk (F1; F2; NG1; NG2)	4	12
Suma Stabmixer (F1; F2; NG1)	3	15
Summe	7	93
<i>Pumpen</i>		
Drehkolbenpumpe	1	30
<i>Sonstige</i>		
Gebälse Entschwefelung	1	0,4
Zweiwellen Nasszerkleinerer	1	22
Summe	2	22,4
<i>BHKW</i>		
Raumlüfter	2	1,5
Ladeluftkühler	1	1,5
Gemischkühler	1	2
Summe	4	6,5
<i>Gas/ Behälterkühlung</i>		
Klimagerät mit Puffer	1	60

Tabelle 15: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #15

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Mischschnecken Vorlagebehälter	2	30
Steigschnecke	1	7,5
Stopfschnecke	1	7,5
Summe	4	75
<i>Rührwerke</i>		
Paddelrührwerk (2 x F1)	2	6,8
Summe	2	13,6
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe	1	9
<i>Sonstige</i>		
Gebälse Entschwefelung	1	0,4
Separator	1	5,5
Lochscheiben-Nasszerkleinerer	1	7,5
Summe	1	13,4

BHKW

Raumlüfter	1	1,5
Ladeluftkühler	1	1,5
Gemischkühler	1	2
Summe	3	5

Tabelle 16: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #16

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Hydraulik Abschiebecontainer	1	3
Dosierschnecken stehend	5	3
Trogschnecke	1	5,5
Steigschnecke	1	5,5
Stopfschnecke	1	5,5
Summe	9	34,5
<i>Rührwerke</i>		
Haspelrührwerk Fermenter	1	11
Langachsührwerk (NG)	1	11
Tauchmotorrührwerk (1 x NG, 2 x EL)	3	13
Summe	5	61
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe (NG)	1	9
Exzentrerschneckenpumpe (Separator)	1	4
Kreiselpumpe Vorgrobe	1	11
Drehkolbenpumpe	1	11
Fassfüllstation (Kreiselpumpe)	1	18,5
Summe	5	53,5
<i>Sonstige</i>		
Lochscheiben-Nasszerkleinerer	1	5,5
Separator	1	3
Summe	2	8,5

Tabelle 17: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #22

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Förderband	1	4
Mischschnecke	1	30
Hydraulik	1	1,5
Flüssigfütterungspumpe	1	11
Summe	4	46,5
<i>Rührwerke</i>		
Tauchmotorrührwerk (GL)	1	15
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe (F1 + F2)	2	3
Tauchschneidpumpe (VG)	1	9
Summe	3	15
<i>Sonstige</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,064
Druckluft Kompressor	1	2,2
Summe	2	2,26
<i>BHKW</i>		
Raumlüfter	1	1,1
Gemischkühler	1	0,49
Notkühler	1	1
Summe	3	2,59
<i>Gastechnik</i>		
Tragluftdachgebläse (GL)	1	0,2

Anhang

Gasverdichter BHKW	1	1,3
Summe	3	1,5
<i>Wärmeverteilung</i>		
HKP Fernwärme	1	0,4
HKP Fermenter	1	0,37
Pumpe Gemischkühler BHKW	1	0,46
Pumpe Motorkühler BHKW	1	0,55
Pumpe Wärmeauskopp. BHKW	1	0,06
Summe	5	1,84

Tabelle 18: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #23

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Feststoffeintrag</i>		
Fräßschnecken	2	1,1
Steigschnecke	1	10
Stopfschnecke	1	5,5
Summe	4	17,7
<i>Rührwerke</i>		
Haspelrührwerk (F)	1	1,1
Tauchmotorrührwerk (NG)	1	15
Stabmixer (VG)	1	11
Summe	3	27,1
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe (F/N)	1	5,5
Exzentrerschneckenpumpe (V)	1	5,5
Summe	2	11
<i>Sonstige</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,22
Druckluft Kompressor	1	1,5
Summe	2	1,72
<i>BHKW</i>		
Raumlüfter	1	2,5
Notkühler	1	2
Summe	2	4,5
<i>Gastechnik</i>		
Gaskühler	1	1,89
<i>Wärmeverteilung</i>		
HKP Fernwärme	1	0,06
HKP Fermenter	1	0,1
Pumpe Motorkühler BHKW	1	0,18
Pumpe Wärmeauskopp. BHKW	1	0,1
Summe	4	0,44

Tabelle 19: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #24

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Fütterung</i>		
Hydraulik Abschiebecontainer	1	3
Dosierschnecke stehend	5	3
Trogschnecke	1	5,5
Flüssigfütterungspumpe	1	15
Summe	8	38,5
<i>Rührwerke</i>		
Langachsührwerk (2 x F)	2	11
Tauchmotorrührwerk (AMG; F1)	2	11
Tauchmotorrührwerk (2 x NG; 1 x EL)	3	15
Stabmixer (AMG)	1	15
Summe	8	104

<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschneckenpumpe	1	18,5
Kreiselpumpe (AMG)	1	22
Kreiselpumpe Fassfüllstation	1	22
Summe	2	62,5
<i>Sonstige</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,4
Druckluft Kompressor	1	1,5
Bauer Separator	1	3
Summe	3	4,9
<i>BHKW</i>		
Raumlüfter	1	1,5
Gemischkühler	1	2,5
Notkühler	1	2,5
Summe	3	6,5
<i>Gastechnik</i>		
Tragluftdachgebläse (F + N)	2	0,12
Gasverdichter BHKW	1	2,5
Gaskühler	1	1,25
Summe	4	3,99
<i>Wärmeverteilung</i>		
HKP Fernwärme	1	0,88
HKP Fermenter	1	0,45
HKP Nachgärer	1	0,63
HKP Anmaischgrube	1	0,26
Pumpe Gemischkühler BHKW	1	4
Pumpe Motorkühler BHKW	1	2,2
Pumpe Wärmeauskopplung BHKW	1	2,2
Summe	7	10,62

Tabelle 20: Übersicht der elektrischen Verbraucher in Pilotbiogasanlage #25

Komponente	Anzahl, n	Antriebsleistung, kW
<i>Fütterung</i>		
Rondomat	1	7,5
Stopfschnecke	1	5,5
Summe	2	13
<i>Substrataufbereitung</i>		
Querstromzerspaner	1	55
Lochscheiben-Nasszerkleinerer	1	7,5
Ultraschall Desintegration	1	2
Summe	3	9,5
<i>Rührwerke</i>		
Stabmixer (HYG)	1	22
Stabmixer (HYG)	1	15
Stabmixer (NG)	1	15
Stabmixer (2 x F)	2	18
Kreiselpumpe Zirkulation (F)	1	15
Summe	6	103
<i>Pumpen</i>		
Exzentrerschnecke Fütterung	1	4
Exzentrerschnecke Ultraschall	1	0,75
Exzentrerschnecke Ligavator	1	4
Exzentrerschnecke Nachgärer	1	4
Summe	4	12,75
<i>Sonstige</i>		
Gebläse Entschwefelung	1	0,4
Druckluft Kompressor	1	1,5
Summe	2	1,9
<i>BHKW</i>		

Anhang

Raumlüfter	1	0,79
Gemischkühler	1	0,7
Notkühler	1	1,9
Summe	3	3,39
<i>Gastechnik</i>		
Gasverdichter BHKW	1	0,75
<i>Wärmeverteilung</i>		
HKP Fermenter	1	0,31
HKP Nachgärer	1	0,24
HKP Hydrolysegrube	1	0,21
Pumpe Motorkühler BHKW	1	2,2
Pumpe Wärmeauskopp. BHKW	1	0,8
Nahwärmenetz Camping	0,47	0,8
Nahwärmenetz Ortschaft	1,9	0,8
Getreidetrocknung	1,3	0,8
Summe	8,67	6,70

Tabelle 21: Zusammenstellung verfahrenstechnischer Kenngrößen für die Pilotanlagen im Untersuchungszeitraum 2014

Anlage		8	10	12	15	16	22	23	24	25	Ø	Min	Max
Stammdaten													
Auswertungszeitraum	d	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365		
Arbeitsvolumen Hydrolyse-/ Anmischgrube	m³	-	-	-	-	-	-	-	170	85	128	85	170
Arbeitsvolumen Fermenter	m³	1800	2250	3600	800	900	220	110	2100	700	1.387	110	3.600
Arbeitsvolumen Nachgärer	m³	2500	850	3600	-	2300	-	850	2100	600	1.829	600	3.600
Nutzvolumen Gärrestlager (gasdicht)	m³	4100	5400	-	-	2700	1400	-	-	-	3.400	1.400	5.400
Nutzvolumen Gärrestlager (offen)	m³	-	500	-	1200	-	700	1700	3100	1950	1.525	500	3.100
Installierte el. Leistung Anfang 2014	kW	690	655	800	240	440	103	75	536	190	414	75	800
Installierte el. Leistung Ende 2014	kW	750	920	800	240	440	103	250	536	190	470	103	920
Mittlere installierte el. Leistung	kW	725,0	810,0	800,0	240,0	440,0	103,0	90,0	536,0	190,0	437,1	90,0	810,0
Spezif. installierte el. Leistung	kW m ⁻³	0,17	0,26	0,11	0,30	0,14	0,47	0,09	0,12	0,14	0,2	0,1	0,5
Prozesstemperatur Fermenter 1	°C	41,5	46,9	46,2	43,1	43,4	53,1	52,8 / 45,9	42,0	40,0	44,5	40,0	53,1
Prozesstemperatur Fermenter 2	°C	41,5	47,4	46,2	-	38,4	53,6	38,8	42,0	40,0	43,5	38,4	53,6
Prozesstemperatur Nachgärer 1	°C	40,6	44,4	40,0	-	-	-	-	-	-	41,7	40,0	44,4
Prozesstemperatur Nachgärer 2	°C	31,6	-	33,4	-	-	-	-	-	-	32,5	31,6	33,4
Frischmasseeintrag	t d ⁻¹	30,0	43,8	39,8	12,8	28,1	18,9	15,0	30,4	13,5	25,8	12,8	43,8
TS Eintrag	t d ⁻¹	9,4	10,1	12,9	4,6	8,0	2,7	1,7	11,1	3,2	7,1	1,7	12,9
oTS Eintrag	t d ⁻¹	8,9	8,7	12,1	4,0	7,0	2,3	1,4	10,0	3,0	6,4	1,4	12,1
Spezifischer Frischmassedurchsatz	kg FM (kW d) ⁻¹	41,4	54,1	49,8	53,3	63,9	183,5	166,7	56,7	71,1	82,3	41,4	183,5
Verweilzeit Stufe 1	d	60	51	90	63	32	12	7	69	52	48,5	7,3	90,5
Verweilzeit Gesamt (einschl. Hydrolyse)	d	143	71	181	63	114	12	64	144	103	99,3	11,6	180,9
Raumbelastung Stufe 1	kg oTS (m³d) ⁻¹	5,0	4,5	3,4	5,1	7,7	10,1	13,1	4,8	4,3	6,4	3,4	13,1
Raumbelastung Gesamt	kg oTS (m³d) ⁻¹	2,1	3,3	1,7	5,1	2,2	10,1	1,5	2,4	2,4	3,4	1,5	10,1

Anhang

Anlage		8	10	12	15	16	22	23	24	25	Ø	Min	Max
Daten Biogas													
Mittlerer CH ₄ - Gehalt	%	51,2	50,4	50,7	49,3	53,1	51,6	52,3	52,0	58,9	52,2	49,3	58,9
Mittlerer H ₂ S - Gehalt	ppm	40,4	79,3	59,3	232,6	86,4	212,1	14,5	207,2	116,1	116,4	14,5	232,6
Normgasproduktion	m ³ d ⁻¹	8.729	7.730	9.126	2.333	4.524	1.275	830	6.002	1.959	4.723,0	829,8	9.126,2
Normmethanproduktion	m ³ d ⁻¹	4.469	3.896	4.627	1.150	2.402	658	434	3.121	1.154	2.434,6	434,0	4.627,0
Ausbeute Normbiogas Frischmasse	m ³ t ⁻¹	291,0	176,5	229,3	182,2	161,0	67,5	55,3	197,4	145,1	167,3	55,3	291,0
Ausbeute Normbiogas Trockenmasse	m ³ t ⁻¹	928,6	765,4	707,5	507,1	565,4	472,3	488,1	540,7	612,3	620,8	472,3	928,6
Ausbeute Normbiogas org. Trockenmasse	m ³ t ⁻¹	980,7	888,5	754,2	583,2	646,2	554,4	592,7	600,2	653,1	694,8	554,4	980,7
Ausbeute Normmethan Frischmasse	m ³ t ⁻¹	149,0	88,9	116,3	89,8	85,5	34,8	28,9	102,7	85,5	86,8	28,9	149,0
Ausbeute Normmethan Trockenmasse	m ³ t ⁻¹	475,4	385,7	358,7	250,0	300,3	243,7	255,3	281,2	360,6	323,4	243,7	475,4
Ausbeute Normmethan org. Trockenmasse	m ³ t ⁻¹	502,1	447,8	382,4	287,5	343,1	286,1	310,0	312,1	384,7	361,8	286,1	502,1
Produktivität Normmethan	m ³ (m ³ d) ⁻¹	2,0	2,5	1,3	2,9	1,4	5,8	0,9	1,4	1,5	2,2	0,9	5,8
Normrestmethan (38 °C) Frischmasse	m ³ t ⁻¹	5,7	n.v.	1,9	15,4	7,2	18,2	n.v.	4,3	5,8	8,4	1,9	18,2
Normrestmethan (20 °C) Frischmasse	m ³ t ⁻¹	1,5	n.v.	0,7	8,3	2,1	2,6	n.v.	4,3	5,8	3,6	0,7	8,3
Daten BHKW													
Laufzeit BHKW 1	h d ⁻¹	23,8	22,8	23,7	23,5	23,8	23,8	22,6	23,1	23,9	23,4	22,6	23,9
Laufzeit BHKW 2	h d ⁻¹	23,5	11,0	23,9	-	20,0	-	-	-	-	19,6	11,0	23,9
Laufzeit BHKW 3	h d ⁻¹	23,9	23,1	-	-	-	-	-	-	-	23,5	23,1	23,9
Laufzeit BHKW 4	h d ⁻¹	-	10,4	-	-	-	-	-	-	-	10,4	10,4	10,4
Zündölverbrauch	l/d	-	144,4	-	83,9	-	-	35,0	-	-	87,8	35,0	144,4
Zündölanteil erzeugte Energie	%	-	3,6	-	6,8	-	-	7,5	-	-	6,0	3,6	7,5
Gesamtenergiezufuhr BHKW	kWh d ⁻¹	44.690	40.404	46.270	12.339	24.020	6.580	4.690	31.210	11.540	24.638,1	4.690,0	46.270,0
Feuerungswärmeleistung	kW	1862	1684	1928	514	1001	274	195	1300	481	1.026,6	195,4	1.927,9
Erzeugte elektr. Energie	kWh d ⁻¹	16.504,4	14.730,8	16.521,3	5.036,2	8.536,4	2.448,6	1.701,1	11.551,9	4.197,7	9.025,4	1.701,1	16.521,3
Realisierte elektr. Leistung	kW	687,7	613,8	688,4	209,8	355,7	102,0	70,9	481,3	174,9	376,1	71	688
Erzeugte Wärmemenge	kWh d ⁻¹	17788,8	14880,0	17764,8	5301,6	8421,6	2846,4	1891,2	12160,8	5078,4	9.570,4	1.891,2	17.788,8
Realisierte Wärmeproduktionsleistung	kW	741,2	620,00	740,2	220,9	350,9	118,6	78,8	506,7	211,6	398,8	78,8	741,2
Jahresbetriebsstunden	h	8650,7	6142,0	8693,0	8584,0	8296,5	8701,0	8231,0	8432,0	8721,0	8.272,4	6.142	8.721
Jahresvolllaststunden	h	8309,1	6641,4	7537,8	7659,2	7081,4	8676,9	6931,2	7866,5	8064,1	7.641	6.641	8.677
Korrigierte Jahresvolllaststunden	h	8309,1	7342,4	8375,4	7659,2	7081,4	8676,9	6931,2	7866,5	8064,1	7.812	6.931	8.677
Elektrischer Nutzungsgrad	%	36,9	36,5	35,7	40,8	35,9	37,2	36,3	37,0	36,4	37,0	35,7	40,8
Verstromungsfaktor (CH ₄)	kWh (m ³ CH ₄) ⁻¹	3,7	3,8	3,6	4,4	3,6	3,7	3,9	3,7	3,6	3,8	3,6	4,4

Anlage		8	10	12	15	16	22	23	24	25	Ø	Min	Max
Daten Anlagentechnik													
Elektr. Energiebedarf Feststoffeintrag	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	43,4	n.v.	26,4	3,0	46,6	13,4	26,6	3,0	46,6
Elektr. Energiebedarf Substrataufbereitung	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	44,1	n.v.	-	-	-	83,0	63,5	44,1	83,0
Elektr. Energiebedarf Rührtechnik	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	258,5	n.v.	57,1	56,4	528,7	161,6	212,5	56,4	528,7
Elektr. Energiebedarf Pumptechnik	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	20,6	n.v.	5,0	3,4	62,4	14,6	21,2	3,4	62,4
Elektr. Energiebedarf Heizungspumpen	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	-	n.v.	36,3	8,6	35,0	32,5	28,1	8,6	36,3
Elektr. Energiebedarf Lüfter, Gebläse, Kühler	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	209,1	n.v.	91,0	58,9	436,3	87,0	176,5	58,9	436,3
Elektr. Energiebedarf Sonstiges	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	77,8	n.v.	13,5	-	17,4	10,0	29,7	10,0	77,8
Elektr. Gesamtenergiebedarf Anlage	kWh d ⁻¹	n.v.	n.v.	n.v.	653,5	n.v.	229,3	130,3	1126,0	402,1	508,2	130,3	1.126,0
Energiebedarfsanteil Feststoffeintrag	%	n.v.	n.v.	n.v.	6,6	n.v.	11,5	2,3	4,1	3,3	5,6	2,3	11,5
Energiebedarfsanteil Substrataufbereitung	%	n.v.	n.v.	n.v.	6,7	n.v.	-	-	-	20,6	13,7	6,7	20,6
Energiebedarfsanteil Rührtechnik	%	n.v.	n.v.	n.v.	39,6	n.v.	24,9	43,3	47,0	40,2	39,0	24,9	47,0
Energiebedarfsanteil Pumptechnik	%	n.v.	n.v.	n.v.	3,1	n.v.	2,2	2,6	5,5	3,6	3,4	2,2	5,5
Energiebedarfsanteil Heizungspumpen	%	n.v.	n.v.	n.v.	-	n.v.	15,8	6,6	3,1	8,1	8,4	3,1	15,8
Energiebedarfsanteil Lüfter, Gebläse, Kühler	%	n.v.	n.v.	n.v.	32,0	n.v.	39,7	45,2	38,7	21,6	35,5	21,6	45,2
Energiebedarfsanteil Sonstiges	%	n.v.	n.v.	n.v.	11,9	n.v.	5,9	-	1,5	2,5	5,5	1,5	11,9
Energiebilanz													
Einspeisung elektr. Energie Netz	kWh d ⁻¹	15.232	14.731	16.521	5.036	8.536	2.449	1.701	11.552	4.198	8.884	1.701	16.521
Brutto-Ausbeute elektr. Energie (FM)	kWh t ⁻¹	550,1	336,3	415,1	393,5	303,8	129,6	113,4	380,0	310,9	325,9	113,4	550,1
Brutto- Ausbeute elektr. Energie (oTS)	kWh t ⁻¹	1.854,4	1.693,2	1.365,4	1.259,1	1.219,5	1.064,6	1.215,1	1.155,2	1.399,2	1.358,4	1.064,6	1.854,4
Netto-Ausbeute elektr. Energie (FM)	kWh t ⁻¹	507,75	315,55	382,85	342,45	272,87	117,37	104,77	342,97	281,15	296,4	104,8	507,7
Netto- Ausbeute elektr. Energie (oTS)	kWh t ⁻¹	1.711,5	1.588,6	1.259,3	1.095,9	1.095,4	964,4	1.122,5	1.042,6	1.265,2	1.238,4	964,4	1.711,5
Mittlerer Bezug elektr. Leistung	kW	53,0	37,9	53,5	27,2	36,2	9,6	5,4	46,9	16,8	31,8	5,4	53,5
Mittlerer Eigenstrombedarfsanteil	%	7,7	6,2	7,8	13,0	10,2	9,4	7,6	9,7	9,6	9,0	6,2	13,0
Mittlere Eigenwärmebedarfsleistung	kW	108,7	98,2	35,0	9,6	31,9	25,8	24,6	108,2	25,5	51,9	9,6	108,7
Eigenwärmebedarfsanteil	%	14,7	15,8	4,7	4,3	9,1	21,8	31,2	21,4	12,1	15,0	4,3	31,2
Spezifischer Eigenwärmebedarf Eintrag FM	kWh t ⁻¹	86,9	53,8	21,1	18,0	27,3	32,7	39,5	85,5	45,5	45,6	18,0	86,9
Externer Wärmeabsatz	kWh d ⁻¹	14.438	8.514	10.249	4.009	4.712	1.752	404	3.483	4.245	5.756,2	404,0	14.438,0
Extern genutzte Wärmeleistung	kW	602	355	427	167	196	73	17	145	177	239,8	16,8	601,6
Wärmenutzungsgrad (extern)	%	81,2	57,2	57,7	75,6	56,0	61,6	21,4	28,6	83,6	58,1	21,4	83,6
Brutto-Nutzungsgrad Methan	%	75,1	63,3	59,7	75,2	58,9	73,3	57,6	56,5	78,5	66,5	56,5	78,5
Netto-Nutzungsgrad Methan	%	66,4	55,2	55,1	67,6	52,0	60,4	41,9	44,6	69,7	57,0	41,9	69,7

Anhang

Anlage		8	10	12	15	16	22	23	24	25	Ø	Min	Max
Eigenschaften Substratmix													
NawaRo - Anteil Substratmix	%	98,0	66,2	95,5	94,5	66,7	18,0	22,7	71,5	63,8	66,3	18,0	98,0
Wirtschaftsdüngeranteil Substratmix	%	2,0	33,8	4,5	5,5	33,3	82,0	77,3	8,5	36,2	31,5	2,0	82,0
Reststoffanteil Substratmix	%	2,0	33,8	4,5	5,5	33,4	82,0	77,3	28,5	36,2	33,7	2,0	82,0
Maissilage	t d ⁻¹	22,7	15,4	28,7	2,2	0,7	2,4	3,2	11,7	4,5	10,2	0,7	28,7
Grassilage	t d ⁻¹	5,3	7,4	0,8	-	-	0,5	0,2	3,9	2,2	2,9	0,2	7,4
Kleegrassilage	t d ⁻¹	-	-	-	9,9	-	-	-	-	-	9,9	9,9	9,9
Kleegrassilage + GPS	t d ⁻¹	-	-	-	-	17,1	-	-	-	-	17,1	17,1	17,1
Getreide GPS	t d ⁻¹	1,3	4,1	-	-	-	0,1	-	-	0,8	1,6	0,1	4,1
Grünroggen GPS	t d ⁻¹	-	-	8,2	-	-	-	-	3,0	-	5,6	3,0	8,2
Zuckerrüben	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	0,2	-	1,0	0,5	0,6	0,2	1,0
Kartoffeln	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-	0,3	0,3	0,3
Stroh	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	0,1	0,1	0,1
Pülpe	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-	2,5	2,5	2,5
Biertreber	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	3,2	-	3,2	3,2	3,2
Umsilage	t d ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
CCM / Körnermaisschrot	t d ⁻¹	0,1	0,3	0,3	-	-	0,0	-	-	-	0,2	0,0	0,3
Getreideschrot	t d ⁻¹	-	1,8	-	0,04	0,9	0,2	0,03	2,2	0,5	0,8	0,0	2,2
Rinder-/ Milchviehgülle	t d ⁻¹	0,6	-	-	-	-	14,8	-	2,6	4,9	5,7	0,6	14,8
Schweinegülle	t d ⁻¹	-	10,9	-	-	-	-	11,5	-	-	11,2	10,9	11,5
Rindermist	t d ⁻¹	-	3,8	0,6	-	9,4	0,7	0,1	-	-	2,9	0,1	9,4
Geflügelmist	t d ⁻¹	-	-	1,2	0,7	-	-	-	-	-	1,0	0,7	1,2
mittlerer TS - Gehalt Einsatzstoffe	%	31,2	23,0	32,4	35,8	28,3	14,4	11,1	36,5	24,0	26,3	11,1	36,5
mittlerer oTS - Gehalt in TS Einsatzstoffe	%	95,6	86,0	94,4	87,6	87,7	87,4	86,0	90,1	91,6	89,6	86,0	95,6
mittlerer TS - Gehalt Fermenter	%	8,3	9,7	10,5	15,5	13,5	9,4	6,8	8,0	6,9	9,8	6,8	15,5