LfL
Tier und Technik

Biogasrüben Monitoring

Verfahrenstechnische, gärbiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen: Anlagenmonitoring und Systembewertung

Projektbericht

Projektförderung:	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Förderkennzeichen:	N/15/06
Projektlaufzeit:	01.07.2015 – 30.06.2020
Projektleiter:	Dr. S. Neser
Projektbearbeiter:	Dr. M. Effenberger R. Kissel G. Streicher
Herausgegeben im:	Juni 2020

Biogasrüben Monitoring

Verfahrenstechnische, gärbiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen: Anlagenmonitoring und Systembewertung

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung **13**

1 Darstellung der Ausgangssituation **15**

2 Projektziele **17**

3 Material und Methoden **18**

3.1 Beschreibung der untersuchten Biogasbetriebe 18

3.1.1 Vorstellung von Pilotbetrieb 08 20

3.1.2 Vorstellung von Pilotbetrieb 22 22

3.1.3 Vorstellung von Pilotbetrieb 25 23

3.1.4 Vorstellung von Pilotbetrieb 27 26

3.1.5 Vorstellung von Pilotbetrieb 28 28

3.2 Vorgehen zur Erfassung und Auswertung der Betriebsdaten 30

3.3 Analyse technischer Schwachstellen 31

3.4 Analyse von Umweltwirkungen 31

3.4.1 Analyse mittels der Anwendung „THG-Rechner Biogas“ 32

3.4.2 Alternative Analyse mittels Ökobilanz-Software 33

4 Ergebnisse und Diskussion **34**

4.1 Verlauf des Anlagenbetriebs 34

4.1.1 Betriebsverlauf für PB08 36

4.1.2 Betriebsverlauf für PB22 41

4.1.3 Betriebsverlauf für PB25 45

4.1.4 Betriebsverlauf für PB27 48

4.1.5 Betriebsverlauf für PB28 51

4.2 Rolle und Auswirkung von Zuckerrüben im Einsatzstoffmix 57

4.3 Schwachstellenanalyse und vergleichende Effizienzbewertung 58

4.4 Bewertung von Umweltwirkungen 61

4.4.1 THG-Bilanz und Effizienz der Energiebereitstellung in den Biogasanlagen 62

4.4.2 Vergleichende Lebenszyklusanalyse der Wärmebereitstellung für PB08 67

4.5 Vorläufige Zusammenfassung der Ergebnisse molekularbiologischer Untersuchungen zur Gärbiologie 69

5 Schlussfolgerungen **74**

6 Wissenstransfer und Veröffentlichungen **77**

Literaturverzeichnis **78**

Anhang 80

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1:...Fließbild der Biogasanlage von PB08 (Stand: Mitte 2017) 20
Abb. 2:...Fließbild der Biogasanlage von PB22 (Stand: Juni 2018) 22
Abb. 3:...Fließbild der Biogasanlage von PB25 (Stand: Juni 2018) 24
Abb. 4:...Fließbild der Biogasanlage von PB27 (Stand: Juni 2018) 26
Abb. 5:...Fließbild der Biogasanlage von PB28 (Stand: Juni 2018) 29
Abb. 6:...Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix von PB08 in täglicher Auflösung. 36
Abb. 7:...Anteilige FM aus ZR versus anteilige FM aus anderen Einsatzstoffen am Substratmix von PB08 im Beobachtungszeitraum 11/2017 – 10/2018; Angabe der Korrelationskoeffizienten in der Legende. 37
Abb. 8:...Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix (tägliche Auflösung) sowie der erzeugten Wärmemenge (gleitender Mittelwert über 30 Tage) von PB08 über den Beobachtungszeitraum und in den vorhergegangenen Jahren. 37
Abb. 9:...Gesamte erzeugte Wärme, für Holztrocknung genutzte Wärme sowie Anzahl der in Betrieb befindlichen Motoren des BHKW von PB08 in täglicher Auflösung über den Beobachtungszeitraum. 38
Abb. 10:..Zusammenhang zwischen Einsatzstoffauswahl und saisonaler Flexibilisierung für PB08: Täglicher Eintrag von oTM aus ZR und Maissilage versus (a) Wärmeerzeugung des BHKW bzw. (b) oTM-Raumbelastung der 1. Gärstufe; Angabe der Korrelationskoeffizienten in der Legende. 39
Abb. 11:..In Proben aus den beiden Fermentern von PB08 gemessene FOS/TAC-Werte sowie Konzentrationen an organischen Säuren im Beobachtungszeitraum und im Jahr davor; die rot gestrichelte Linie markiert den Zeitpunkt, ab dem erstmals ZR eingesetzt wurden. 40
Abb. 12:..Verlauf der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe und des oTM-Anteils aus ZR für PB08 im Beobachtungszeitraum. 40
Abb. 13:..Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix von PB22 in täglicher Auflösung. 41
Abb. 14:..Verlauf der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe und des oTM-Anteils aus ZR (tägliche Auflösung) für PB22 im Beobachtungszeitraum. 42
Abb. 15:..Zusammenhang zwischen oTM-Raumbelastung (gleitendes Mittel über zehn Tage) und Wärmeabsatz; Angabe des lin. Korrelationskoeffizienten in der Legende. 43
Abb. 16:..In Proben aus Fermenter 1 (links) und Fermenter 2 (rechts) von PB22 gemessene Konzentrationswerte von OS und FOS/TAC-Werte im Beobachtungszeitraum. 43
Abb. 17:..In Proben aus den Fermentern von PB22 gemessene Konzentration an Propionsäure vs. gleitender Mittelwert der Fermentertemperatur über zehn Tage vor Probenahme; Angabe des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten in der Legende. 45
Abb. 18:..Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix und der mittleren elektrischen BHKW-Leistung von PB25 in monatlicher Auflösung; im Dez. 2016 waren keine Leistungswerte verfügbar. 46
Abb. 19:..Zusammenhang zwischen Einsatzstoffauswahl und saisonaler Flexibilisierung für PB25 auf Basis von Monatsmittelwerten: Anteiliger

Eintrag von oTM aus ZR, Grassilage, Maissilage und Getreide(-GPS) vs. elektrische BHKW-Leistung; für ZR: Angabe des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten in der Legende. 47
Abb. 20:. In Proben aus dem Hauptfermenter von PB25 gemessene Konzentrationswerte von OS und FOS/TAC-Werte im Zeitraum Januar 2015 bis Oktober 2018; Beobachtungszeitraum für die Beurteilung des ZR-Einsatzes farbig hinterlegt. 48
Abb. 21:. Verlauf der Monatsmittelwerte für den FM-Eintrag der einzelnen Substrate und der elektrischen BHKW-Leistung für PB27. 49
Abb. 22:. Verlauf der Konzentrationswerte von OS in Proben aus dem Hauptgärbehälter (links) und dem Festbettreaktor 2 (rechts) von PB27.. 50
Abb. 23:. Verlauf der oTM-Raumbelastung und der elektrischen BHKW-Leistung (jeweils gleitender Mittelwert über 30 d) für PB27. 50
Abb. 24:. Verlauf der TAN-Konzentration in Proben aus dem Hauptfermenter und dem Festbettreaktor 2 von PB27. 51
Abb. 25:. Verlauf des Gesamteintrags an FM bzw. oTM (gleitender Mittelwert über 30 d) und der FM-Anteile der einzelnen Substrate (tägliche Auflösung) von PB28. 52
Abb. 26:. Verlauf der Tagesstromerzeugung und der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe (gleitender Mittelwert über 30 d) für PB28; die grob gestrichelte senkrechte Linie markiert die Inbetriebnahme des neuen BHKW, die waagrechte Linie links bzw. rechts davon den Mittelwert der Tagesstromerzeugung für das alte bzw. das neue BHKW). 53
Abb. 27:. Verlauf der Konzentration von OS und des FOS/TAC-Wertes in Proben aus dem Hauptgärbehälter (links) und des TS-Gehaltes in Proben aus beiden Gärbehältern (rechts) von PB28. 53
Abb. 28:. Modellierte Konzentration an freiem Ammoniak im Gärgemisch des Hauptgärbehälters von PB28 bei 48 °C in Abhängigkeit vom pH-Wert. 54
Abb. 29:. Zusammenhang zwischen den normierten Ränge für den über 30 d vor Probenahme kumulierten FM-Eintrag aus ZR und der Propionsäurekonzentration (links) bzw. zwischen dem FM-Eintrag aus ZR und dem TS-Gehalt (rechts) in Proben aus dem Hauptgärbehälter von PB28. 55
Abb. 30:. Verlauf der Biogasausbeute aus der oTM und der rechnerischen hydraulischen Verweilzeit im Fermentersystem für PB28; waagrechte schwarz gestrichelte Linie: Mittelwert der Biogasausbeute; waagrechte rote Strichpunktlinie: Mittelwert der hydraulischen Verweilzeit; senkrechte rot gestrichelte Linie: Zeitpunkt der Inbetriebnahme des neuen BHKW mit Gasmengenmessung, davor wurde die Biogasausbeute rechnerisch geschätzt. 56
Abb. 31:. Kumulierter mittlerer Anteil der einzelnen Substrate am Gesamteintrag an FM in die Biogasanlagen (ggf. während verschiedener Beobachtungszeiträume). 57
Abb. 32:. Ranking der Biogasanlagen nach dem Effizienzwert für die Biogasproduktion. 60
Abb. 33:. Ranking der Biogasanlagen nach dem Effizienzwert für die Biogasverwertung. 61

Abb. 34:..Aufteilung der CO_2-Äq-Emissionen aus den Verfahrensketten für die Substratbereitstellung und die Biogaserzeugung & -verwertung, unterteilt in direkte und indirekte Quellen. 64
Abb. 35:..Mit zwei verschiedenen Software-Anwendungen berechnete spezifische CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung aus PB08, unterteilt in direkte und indirekte Quellen sowie die Verfahrensketten für die Substratbereitstellung und die Biogaserzeugung & -verwertung. 68

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1: ...SWOT-Analyse des Anbaus von Zuckerrüben für die Biogasproduktion (verändert nach [7]. 16
Tab. 2: ...Übersicht grundlegender Eigenschaften der fünf untersuchten Pilot-Biogasbetriebe (PB) für den Untersuchungszeitraum. 19
Tab. 3: ...Festlegung der Zeiträume für die vergleichende Analyse ausgewählter Umweltwirkungen der Biogasproduktion mit und ohne Einsatz von ZR. 32
Tab. 4: ...Verwendete Emissionsfaktoren für die Referenzsysteme zur Strom- und Wärmeerzeugung aus fossilen Energieträgern; Werte in g/kWh für das GWP100. 33
Tab. 5: ...Übersicht zum zeitlichen Umfang des Anlagen-Monitorings und zu ausgewählten (mittleren) verfahrenstechnischen Kennwerten; falls vorhanden, sind als Referenz Daten aus einem vorhergehenden Monitoring aufgeführt; Kursivdruck: Werte wurden nicht über den gesamten Auswertungszeitraum ermittelt, Kursivdruck in Rot: Werte konnten nicht direkt gemessen werden und wurden daher rechnerisch ermittelt bzw. abgeschätzt. 35
Tab. 6: ...Statistische Kennwerte zu gemessenen Prozesstemperaturen (tägliche Ablesung) und chemischen Indikatoren (Anzahl der Probenahmen = 29) in den beiden Fermentern von PB22 im Beobachtungszeitraum. 44
Tab. 7: ...Anteiliger Eintrag von oTM aus ZR vs. Grassilage, Maissilage, Getreidekorn und Getreidekorn/-GPS: Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizienten auf Basis von Monatsmittelwerten. 47
Tab. 8: ...Kennwerte zu chemischen Prozessindikatoren in allen verfügbaren Proben aus dem Hauptfermenter und dem Festbettreaktor 2 von PB27..... 49
Tab. 9: ...Kennwerte zu chemischen Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptfermenter von PB28. 54
Tab. 10: .Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizienten für einen linearen Zusammenhang zwischen der Propionsäurekonzentration und dem TAN- bzw. Ammoniak-N-Gehalt in Proben aus dem Hauptgärbehälter von PB28. 55
Tab. 11: .Zeitlicher Anteil auf Tagesbasis sowie mittlere und maximale Anteile der FM bzw. oTM aus Zuckerrüben am Gesamteintrag in die Biogasanlagen über den gesamten Beobachtungszeitraum; Angaben in Prozent. 57
Tab. 12: .Charakterisierung der in den Biogasanlagen eingesetzten ZR-Substrate anhand von TS- und oTS-Gehalt: Mittelwerte ± Standardabweichung. .. 58
Tab. 13: .Ergebnis der qualitativen Effizienzbewertung für die Biogasanlagen. 59
Tab. 14: .Zusammenfassung der Ergebnisse aus der quantitativen Effizienzbewertung. 59
Tab. 15: .Veränderungen auf den untersuchten Biogasbetrieben im Zusammenhang mit dem Einsatz von ZR. 61
Tab. 16: .Ergebnis nach „THG-Rechner" für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen (GWP100) der Strombereitstellung aus den Biogasanlagen nach ‚THG-Rechner Biogas'; Werte außer in der letzten Spalte in Gramm je „Kilowattstunde ins öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie". 62
Tab. 17: .Gegenüberstellung der für die Pilotbetriebe berechneten Werte für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen mit Bezug auf die Erzeugungsfläche bzw. den Methanertrag. 65

Tab. 18: .Gegenüberstellung von Mittelwerten des oTM-spezifischen Strombedarfs der Förder- und Rührtechnik sowie der Stromausbeute der Biogasanlagen für Zeiträume mit und ohne ZR-Einsatz. 66
Tab. 19: .Ergebnis nach „THG-Rechner“ für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen (GWP100) der Strom- und Wärmebereitstellung aus den Biogasanlagen nach exergetischer Allokation; Werte in Gramm je Kilowattstunde Nutzenergie. 67
Tab. 20: .Aufteilung der spezifischen CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung aus PB08 gemäß Berechnung mit zwei verschiedenen Software-Anwendungen..... 68

Zusammenfassung

Zuckerrübe (ZR) als Biogassubstrat gilt als gute Alternative zu Mais, da sie ähnliche Methan-Hektarerträge liefern kann, jedoch von der Bevölkerung in der Landschaft im Allgemeinen nicht als störend wahrgenommen wird. Da ZR nicht selbstverträglich ist, kann der Anbau zur Etablierung mehrgliedriger Biogas- und gegebenenfalls Marktfruchtfolgen genutzt werden und damit agrarökologische Vorteile bringen. Während aus betriebswirtschaftlicher Sicht nach wie vor keine allgemeingültige und seriöse Empfehlung zum Einsatz der ZR als Biogassubstrat gegeben werden kann, könnten sich mit zunehmender Bedeutung einer bedarfsorientierten Stromerzeugung mehr Fälle ergeben, in denen die ZR wettbewerbsfähig ist. Das möglicherweise größte wirtschaftliche Risiko besteht hierbei darin, dass erhebliche Energieverluste auftreten können, wenn Lagerung und Aufbereitung nicht sachgerecht erfolgen.

Um den Stand der Technik beim Einsatz von ZR für die Biogasproduktion zu analysieren und empfehlenswerte Entwicklungspfade abzuleiten, wurden an der LfL drei Forschungsprojekte durchgeführt, welche sich mit der Thematik der Aufbereitung und Lagerung von ZR („Biogasrüben Lagerung“, FKZ: N/15/05), den verfahrenstechnischen/gärbiologischen Möglichkeiten und Grenzen der ZR-Vergärung („Biogasrüben Prozessoptimierung“, FKZ: BE/16/02) und – im vorliegenden Fall – dem Monitoring und der Systembewertung von Fallbeispielen für Praxis-Biogasanlagen mit ZR-Einsatz befassten.

Für das Anlagenmonitoring wurde als Ziel formuliert, belastbare Antworten vor allem auf die folgenden, in der Praxis relevanten Fragen zum Einsatz von ZR in Biogasanlagen zu finden: Zu welchem Zweck setzen Anlagenbetreiber ZR ein? Welche baulichen, verfahrenstechnischen und gärbiologischen Limitationen und Risiken sind hierbei zu beachten? Wie gut eignen sich ZR für die Modulation der Biogasproduktion zur Realisierung einer flexiblen Stromeinspeisung und in welchen Anteilen müssen sie zu diesem Zweck eingesetzt werden? Welche Auswirkungen hat der Einsatz von ZR auf die Umweltwirkungen der Biogaskette?

Diese Fragestellungen wurden an fünf landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern mittels der an der LfL entwickelten und bewährten Methoden des intensiven Monitorings und der Stoffstrommodellierung bearbeitet. Die fünf Anlagen variieren sehr deutlich im Hinblick auf Anlagentechnik, BHKW-Leistung und Einsatzstoffe: von der „Gülleanlage“ mit einer installierten elektrischen Leistung von 103 kW bis zur zweiphasig-vierstufigen Kaskade mit Flüssigfütterung und ausschließlichem Einsatz von Energiepflanzen. Gemein haben alle Anlagen eine sehr gut ausgebaute Wärmenutzung. Dementsprechend wurde in drei der fünf Betrieben ZR-Substrat im Zusammenhang mit einer saisonalen, wärmegeführten Flexibilisierung eingesetzt. Die Nutzung von ZR für die intermittierende (Variation der Beschickungsrate im Tagesverlauf) oder selektive Beschickung (gezielte Zugabe eines schnell verfügbaren Substrats zur Abdeckung von Lastspitzen) zum Zwecke der „elektrischen Flexibilisierung“ erfolgte in den Betrieben hingegen nicht.

In drei der fünf beobachteten Biogasanlagen wurden ZR zu einem mittleren FM-Anteil von ca. 7 % und an einzelnen Tagen bis zu 73 % eingesetzt; die zwei übrigen Betriebe realisierten einen deutlich höheren FM-Anteil aus ZR von etwa einem Fünftel. Eindeutige negative Auswirkungen der Fütterung von ZR-Substrat auf die Gärbiologie konnten in keinem Fall festgestellt werden. Im Gegenteil führte der Einsatz von ZR im teilweisen Austausch für Maissilage in zwei Betrieben dazu, dass sich ausgehend von eindeutig

kritischen Werten der chemischen Prozessindikatoren bald nach Beginn der Fütterung von ZR die Gärbiologie stabilisierte. Die Wirkungsmechanismen waren hierbei unterschiedlich – wie auch die jeweiligen Kennwerte und der Einsatzstoffmix der Biogasanlagen – und unter den Bedingungen des Monitorings nicht eindeutig nachzuweisen: als wahrscheinlich kommen der Ausgleich eines Mangels an Spurenelementen und eine Verdünnung des Gärgemisches in Frage. Ein modifizierender Einfluss des ZR-Einsatzes auf die Prozessmikrobiologie war auch anhand molekularbiologischer Analysen nicht zu erkennen. Vielmehr zeigte sich mit dieser Methodik ein deutlicher Einfluss der Prozesstemperatur und des Anteils an tierischen Wirtschaftsdüngern im Einsatzstoffmix.

Die Treibhausgasbilanz der Energiebereitstellung in den untersuchten Biogasbetrieben war deutlich positiv mit dem Anteil an Energiepflanzen korreliert, während ein signifikanter Unterschied zwischen der THG-Intensität von Mais und ZR nicht festgestellt werden konnte. Der Strombedarf für die Förder- und Rührtechnik der Anlagen war in hohem Maße abhängig vom gesamten Einsatzstoffmix und der Verfahrenstechnik, so dass ein systematischer Einfluss des ZR-Einsatzes diesbezüglich nicht erkennbar war. Für den oben erwähnten Spezialfall einer zweiphasig-vierstufigen Anlage war die Energieeffizienz der Biogaskette während des Einsatzes von ZR aufgrund der sehr aufwändigen Aufbereitungs- und Fütterungstechnik allerdings merklich verringert, und folglich erhöhten sich die damit verbundenen Umweltwirkungen. Der Aspekt der Energieeffizienz, unter Einbeziehung der Lagerung und Aufbereitung von ZR-Substraten, verdient demnach in der Praxis besondere Aufmerksamkeit, um negative Umwelteffekte zu vermeiden.

Mit Blick auf die Praxis der Nutzung von ZR zur Biogaserzeugung bleiben zum Abschluss dieses Forschungsprojektes vor allem folgende Fragen offen: Wie kann die Prozesssteuerung beim Einsatz von ZR für die weitergehende biologische Flexibilisierung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen umgesetzt werden? Wie ist es um die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit des Ersatzes von Silomais als intensive Ackerkultur durch Zuckerrübe als eine andere intensive Ackerkultur bestellt?

1 Darstellung der Ausgangssituation

Zuckerrübe (ZR) ist an guten Ackerbaustandorten ertragsstark und wird von der Bevölkerung in der Landschaft im Allgemeinen nicht als störend wahrgenommen, weshalb sie als gute Alternative zum Silomais als Biogassubstrat gilt. Die Ausgangslage für das vorliegende Forschungsprojekt stellte sich so dar, dass der Bayerische Agrarbericht für 2013 die geringste Anbaufläche für ZR in Bayern seit Bestehen der Zuckermarktordnung auswies. Gründe hierfür waren die geringeren Vermarktungsaussichten für Nicht-Quotenzucker und ein relativ hoher Vortrag aus dem Jahr 2012. Im Jahr des Auslaufens der Zuckermarktordnung 2017 lag die Anbaufläche mit rund 71.000 ha um etwa 14.000 ha oder ein knappes Viertel höher als in 2013, und es wurden aufgrund sehr günstiger Witterungsbedingungen rekordverdächtige Erträge erzielt [1]. Damit wurde die im Agrarbericht erwartete Mehrproduktion von 20 % zur Auslastung der Zuckerfabriken noch übertroffen.

Da ZR nicht selbstverträglich sind, kann der Anbau zur Etablierung mehrgliedriger Biogas- und gegebenenfalls Marktfruchtfolgen genutzt werden und damit agrarökologische Vorteile bringen. Der Einsatz von ZR als Biogassubstrat hat sich laut Biogas Forum Bayern etabliert [2], ist im Umfang aber laut bundesweiter Umfragen unter Betreibern in den Jahren 2014, 2015 und 2016 mit rund 2 % Massenanteil am Gesamteintrag gleich geblieben [3],[4]. Ob seither der Einsatz zugenommen hat, lässt sich anhand der verfügbaren Literatur nicht beurteilen.

Während aus betriebswirtschaftlicher Sicht nach wie vor keine allgemeingültige und seriöse Empfehlung zum Einsatz der ZR als Biogassubstrat gegeben werden kann, könnten sich mit zunehmender Bedeutung einer bedarfsorientierten Stromerzeugung mehr Fälle ergeben, in denen die ZR wettbewerbsfähig ist [5]. Insbesondere für die intermittierende (Variation der Beschickungsrate im Tagesverlauf) oder selektive Beschickung (gezielte Zugabe eines schnell verfügbaren Substrats zur Abdeckung von Lastspitzen) zur Modulation der Biogaserzeugung sind ZR sehr gut geeignet. Die LfL hat in der Biogasanlage auf der Forschungsstation Grub (jetzt: Bayerische Staatsgüter Versuchs- und Bildungszentrum für Rinderhaltung – Grub) untersucht, inwieweit durch eine Kombination von bedarfsabhängiger Stromerzeugung („technische Flexibilisierung“) und Modulation der Gasproduktion („biologische Flexibilisierung“) der Strombedarf und die Stromerzeugung auf der Liegenschaft in Deckung gebracht werden können [6]. Die Modulation der Gasproduktion erfolgte vor allem durch den Einsatz von Maissilage und ZR-Brei. Bezüglich des Gasertrags ersetzte hierbei 1 m³ ZR-Brei in etwa 1 t Maissilage, wobei ZR innerhalb weniger Stunden und damit wesentlich schneller als Maissilage umgesetzt wurde.

Als limitierend für den Einsatz von ZR für die Biogasproduktion wirkt die Tatsache, dass bisher kein Standardverfahren zur Einlagerung existiert, welches eine ganzjährige Nutzung bei geringen Lagerverlusten erlaubt. In dem teilweise parallel bearbeiteten Modul 1 des vorliegenden Forschungsvorhabens zur Lagerung und Aufbereitung von ZR konnte hingegen gezeigt werden, dass die ganzjährige Lagerung von ZR-Silage mit relativ geringen Verlusten durchgeführt werden kann, wenn die richtige Methode angewandt wird [7]. Entscheidend war hierbei die Interaktion der Aufbereitung der ZR und der Abdeckung (Luftausschluss). Die geringsten Energieverluste traten bei der Einlagerung von Rübenbrei mit luftdichter Abdeckung auf. Bei der offenen Lagerung ganzer Rüben trat hingegen über zehn Monate ein Energieverlust in Bezug auf den potenziellen Biogasertrag von rund 65 %

auf. Eine Zusammenstellung der Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Risiken der Nutzung von ZR für die Biogaserzeugung gibt die folgende Tabelle.

Tab. 1: SWOT-Analyse des Anbaus von Zuckerrüben für die Biogasproduktion (verändert nach [7].

Stärken	**Schwächen**
Konkurrenzfähige Methanhektarerträge	Geringe Selbstverträglichkeit (20 - 25 % in der Fruchtfolge)
Auflockerung maisbetonter Fruchtfolgen	Saisonal begrenzte Verfügbarkeit
Größeres Erntefenster als bei Silomais	Als Reihenkultur prinzipiell gleiche agrarökologische Problematik wie bei Mais (Bodenerosion, Humuszehrung)
Imagevorteil gegenüber Silomais	Erdanhang und/oder Steinbesatz erfordern Waschen der Rüben
Organische Trockenmasse rasch vergärbar: Eignung für „biologische Flexibilisierung“	Zerkleinerung als zusätzlicher Aufbereitungsschritt erforderlich
Verringerung der Viskosität / Verbesserung der Rührfähigkeit des Gärgemischs	Hohes Risiko für Schaumbildung im Gärbehälter
Externe Zwischenlagerung möglich (Feldrandmieten)	Hoher Wassergehalt bedingt hohe Transportkosten und größere Lagerkapazität für Gärrest

Möglichkeiten	**Risiken**
Hohe Stickstoffeffizienz im Anbau (DüV)	Verfügbarkeit technischer Anlagen zur Aufbereitung / Reinigung regional begrenzt
Züchterische Potentiale für die Optimierung als „Energierüben“	Entwicklungsbedarf für Aufbereitungs- und Konservierungsverfahren

2 Projektziele

Ausgehend von den oben formulierten Erwartungen an ZR als Biogassubstrat und den aktuellen Herausforderungen an Biogasanlagen im Bestand wurden für das vorliegende Projekt die folgenden Fragestellungen formuliert:

- Aus welchen Gründen bzw. zu welchen Zwecken setzen Betreiber in ihren Biogasanlagen ZR ein?
- Wie gestaltet sich die Lernkurve von Anlagenbetreibern beim Einsatz von ZR für die Biogasproduktion?
- Eignen sich ZR für die Modulation der Biogasproduktion („biologische Flexibilisierung“) und in welchen Anteilen müssen sie zu diesem Zweck eingesetzt werden?
- Welche bautechnischen, verfahrenstechnischen und gärbiologischen Limitationen und Risiken treten beim Einsatz von ZR in Biogasanlagen auf? Gibt es hierfür kritische Schwellen?
- Sind herkömmliche Prozessindikatoren und Richtwerte für die Gärbiologie, wie sie in Biogasanlagen mit überwiegendem Einsatz von Stärke betonten Rohstoffen Anwendung finden, auch auf die ZR-Vergärung anwendbar?
- Können gegebenenfalls neue, besser geeignete Prozessindikatoren definiert werden?
- Welche Auswirkungen hat der Einsatz von ZR auf die Umweltwirkungen der Biogaskette?

Diese Fragestellungen wurden mittels der an der LfL entwickelten und bewährten Methoden des intensiven Monitorings von Pilotbetrieben und der Stoffstrommodellierung bearbeitet. Hieraus sollten unmittelbar für die Praxis verwertbare Bewertungsmaßstäbe und Handlungsempfehlungen für die Verfahrenskette der Einlagerung und Vergärung von ZR für die Biogasproduktion abgeleitet werden. Aus Sicht der Technikfolgenabschätzung interessierten die Effekte eines verstärkten Einsatzes von ZR in Biogasanlagen, speziell mit dem Ziel einer flexibleren Energiebereitstellung aus Biogas. Gleichzeitig sollte das Forschungsvorhaben die Kontinuität im Biogas-Monitoring der LfL (seit 2006) sichern und den Kenntnisstand zu aktuellen Entwicklungen in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion erweitern.

Das vorliegende Projekt, welches seinen Fokus auf die praktische Anwendung richtet, ist eng verknüpft mit dem Forschungsvorhaben zur Verfahrenstechnik der Rübenlagerung („Biogasrüben Lagerung“, FKZ: N/15/05) sowie dem vom StMWi geförderten Forschungsprojekt zu den verfahrenstechnischen/gärbiologischen Möglichkeiten und Grenzen der ZR-Vergärung („Biogasrüben Prozessoptimierung“, FKZ: BE/16/02). In der Gesamtschau der Ergebnisse dieser Forschungsprojekte wird sich ein erheblicher Erkenntnisgewinn zum Stand der Praxis und zu empfehlenswerten Entwicklungspfaden für den Einsatz von ZR für die Biogasproduktion ergeben.

3 Material und Methoden

Beim Monitoring von Betrieben in der Praxis lassen sich Versuchsmaterial – das sind die Pilotbetriebe und deren Betriebscharakteristika – und Ergebnisse – das sind die Prozessdaten und Beobachtungen von den Betrieben – nicht streng voneinander trennen. Im nachfolgenden Abschnitt 3.1 werden die im Projekt untersuchten Biogasanlagen („Pilotbetriebe“) textlich und anhand von Fließbildern beschrieben und wichtige Maßnahmen auf den Betrieben im Verlauf des Untersuchungszeitraums dokumentiert.

Im Abschnitt 3.2 wird dargelegt, wie bei der Erfassung der Daten von den Biogasanlagen und bei deren Auswertung vorgegangen wurde. Abschnitte 3.3 bzw. 3.4 beschreiben in knapper Form, welche Methoden für die Analyse technischer Schwachstellen der Biogasanlagen bzw. spezifischer Umweltwirkungen der Energiebereitstellung aus Biogas verwendet wurden.

3.1 Beschreibung der untersuchten Biogasbetriebe

Pilotbetriebe 08, 22 und 25 waren dem Projektnehmer aus vorhergegangenen Untersuchungen bekannt und bereits entsprechend gut mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet. PB 27 und 28 hingegen wurden erstmals von der LfL untersucht und mussten messtechnisch entsprechend nachgerüstet werden, ehe mit dem Monitoring begonnen werden konnte.

Wie die Übersicht in Tab. 2 und die Fließbilder in den folgenden Abschnitten zeigen, sind die fünf Biogasanlagen verfahrenstechnisch sehr unterschiedlich aufgebaut.

Tab. 2: Übersicht grundlegender Eigenschaften der fünf untersuchten Pilot-Biogasbetriebe (PB) für den Untersuchungszeitraum.

	PB08	**PB22**	**PB25**	**PB27**	**PB28**
Jahr der Inbetriebnahme	2004	2009	2006	2004	2009
Einsatzstoffe – pflanzlich*	Maissilage Grassilage Triticale-GPS ZR	Maissilage ZR Getreideschrot Grassilage Sommergerste-GPS	Maissilage Grassilage ZR Sommergerste-GPS CCM Getreideschrot	Maissilage Grassilage ZR CCM Getreideschrot	Maissilage ZR Sommergerste-GPS
Einsatzstoffe – tierisch*	keine	Milchviehgülle Rindermist	Rindergülle	keine	Putenmist Schweine-/Rindergülle
Gärvolumen[1], m³	4.300	1.620[§]	1.385	1.660	2.800
Gärtemperatur[2], °C	42 – 40 – n.t.	53 – 40	(32) – 40 – 40	(30 – 30) – 44 – 42 – 42	48 – 45
Gärrestlagerkapazität, m³ • mit Gaserfassung • offen	 8.200 n.v.	 [1.400][§] 700	 n.v. 1.950	 n.v. 1.500	 4.200 n.v.
BHKW: Nennleistung[3] P_{el}, kW	1.150	103	290	400	1.049
~ Höchstbemessungsleistung, kW	713	98	276	380	490
Wärmenutzung	Wohngebäude (zwei Nahwärmenetze), öffentliches Gebäude, Trocknung	Wohngebäude (Nahwärmenetz), Trocknung	Wohngebäude, Feriendorf (Nahwärmenetz + Hackschnitzel-HW)	Wohngebäude (Nahwärmenetz)	Putenmastställe
Art der Rübenlagerung	Miete im Fahrsilo	Miete im Fahrsilo	Miete am Feldrand, Zwischenlagerung in Halle, Kosilierung mit GPS und Stroh	Miete am Feldrand, Breisilierung in Edelstahlbehälter	Miete im Fahrsilo
Technik Rübenreinigung /-zerkleinerung	Trockenreinigung und Rübenschnitzler	Trockenreinigung und Silostockfräse am Futtermischwagen	Trockenreinigung und Rübenschnitzler-Schaufel	Trockenreinigung und Biomasseschredder	Trockenreinigung und Rübenschnitzler
Einsatzzeitraum von ZR	saisonal: ca. 6 Monate	saisonal: ca. 4 Monate	ganzjährig	ganzjährig	saisonal: ca. 6 Monate

*) in Reihenfolge nach abnehmendem Frischmasseanteil; [§]) wärmegedämmtes Gärrestlager 1 als Nachgärer kategorisiert; [1]) inkl. Hydrolyse/Vorversäuerungsstufen ohne Gaserfassung; [2]) für die aufeinanderfolgenden Gärstufen - Zahlen in Klammern für temperierte Hydrolyse/Vorversäuerungsstufen; [3]) Stand: siehe Fließbilder unten; n.t. = nicht temperiert; n.v. = nicht vorhanden.

3.1.1 Vorstellung von Pilotbetrieb 08

Die in Kooperation mit einem Münchner Planungsbüro konzipierte und überwiegend in Eigenregie errichtete Biogasanlage ist seit dem Jahr 2004 in Betrieb und befindet sich in Oberbayern. Bei der Anlage handelt es sich mittlerweile um eine typische NawaRo-Biogasanlage, die ihren Strom gemäß den Konditionen des EEG 2004 ins Netz einspeist. Bis zum Jahr 2015 war in der Anlage auch Wirtschaftsdünger vergoren worden. Die ursprünglich mit einer elektrischen Leistung von 380 kW in Betrieb genommene Biogasanlage wurde im Laufe der Betriebszeit stetig erweitert und verfügt mittlerweile über eine installierte elektrische Leistung von 1,15 MW.

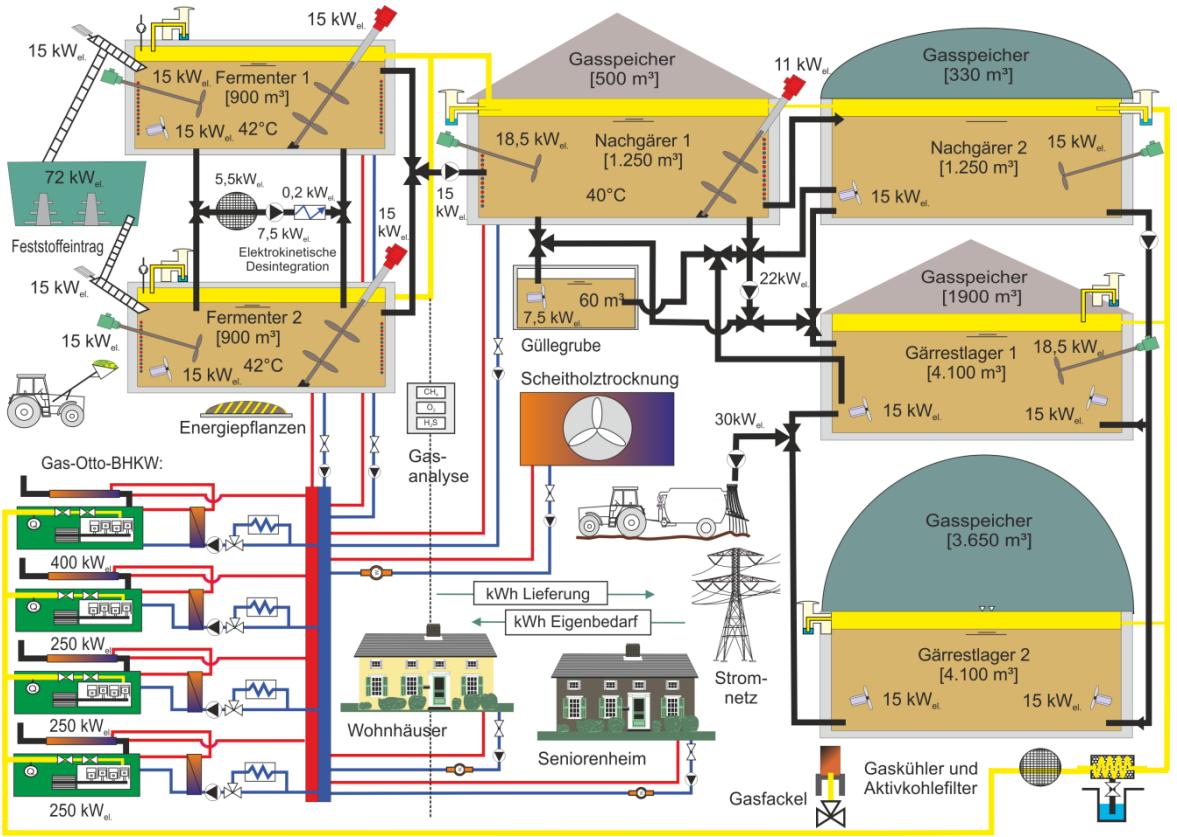

Abb. 1: Fließbild der Biogasanlage von PB08 (Stand: Mitte 2017)

Wie in Abb. 1 dargestellt, verfügt die Anlage über zwei parallel geschaltete, baugleiche Fermenter (Maße: 16 m x 5 m; Arbeitsvolumen: ca. 900 m³). Die beiden Fermenter sind wärmeoptimiert mit Betondecke ausgeführt und werden mithilfe von Wandheizungen auf einer Prozesstemperatur von durchschnittlich 42 °C (mesophiler Temperaturbereich) gehalten. Durchmischt werden beide Behälter mithilfe eines FU betriebenen langsam laufenden Langachsrührwerks in Kombination mit einem Stabmixer. Zur Vermeidung einer Bildung von Sinkschichten wurde in die Fermenter zusätzlich jeweils ein Tauchmotorrührwerk integriert, das in Bodennähe betrieben wird. Ein 50 m³ fassender Zweischnecken-Vertikalmischer beschickt über eine Konstruktion aus Steig- und Stopfschnecken beide Fermenter simultan mit Feststoffen. Die in der Anlage eingesetzten und in einer Miete gelagerten ZR werden vor der Einbringung in den Feststoffvorlagebehälter mithilfe eines Rübenschnitzlers zweimal zerkleinert. Das in der Fahrsiloanlage anfallende Gemenge aus Niederschlagswasser und Silagesickersaft wird in einer Vorgrube (Maße: 4 m x 5 m; Lagervolumen: ca. 60 m³) gesammelt und von dort aus in die Gärbehälter dosiert.

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 Hochspannungsimpulses (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 Nachrüstung 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 Gärrückstand.

Den Fermentern sind zwei gleichgroße Nachgärer (Maße: 19 m x 5 m; Arbeitsvolumen: ca. 1.250 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. Durchmischt wird der erste Nachgärer mithilfe eines Stabmixers und eines Langachsrührwerks. Weitgehend ausgegorenes Gärgemisch kann über einen freien Überlauf aus dem ersten in den zweiten Nachgärer fließen. Nachgärer II besitzt eine EDPM-Gasspeicherhaube und wird nicht beheizt. Da die Behälterwand gedämmt ist, wird trotzdem eine durchschnittliche Prozesstemperatur von 27 °C im Behälter erreicht. Als Rührwerke sind in diesem Behälter ein Tauchmotorrührwerk sowie ein Stabmixer installiert.

Ausgegorener Gärrest wird aus dem Nachgärer II über eine zentrale Pumpstation mit Drehkolbenpumpe in das mit einem Tragluftdach und zwei Tauchmotorrührwerken ausgestattete Gärrestlager I gepumpt (Maße: 30 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 4.100 m³). Das Gärrestlager ist nicht wärmegedämmt, so dass der Gärrest vor einer Ausbringung auf die Felder abkühlen kann. Zur Erfüllung der Vorgaben entsprechend novellierten Düngeverordnung (sechs Monate Mindestlagerkapazität für Gärrest auf eigene Ausbringflächen / neun Monate für Gärrest auf Fremdflächen ohne Abnahmeverträge) wurde gegen Ende des Jahres 2017 ein weiteres Gärrestlager (Maße: 30 m x 6 m; Lagervolumen: ca. 4.100 m³) errichtet, das ebenfalls über die zentrale Pumpstation mit Gärrest aus Nachgärer II befüllt wird. Gärrestlager II ist mit einem Tragluftdach in Form einer Drittelkugel zur Gasspeicherung ausgestattet und wird mithilfe zweier Tauchmotorrührwerke durchmischt.

Im Zuge der Erweiterung wurde die Gasspeicherkapazität der Anlage deutlich erhöht und beträgt nun knapp 4.500 m³. Das erzeugte Biogas wird in einem im Boden verlegten Gasregister und zusätzlich mithilfe einer aktiven Gaskühlung mit Klimagerät entfeuchtet. Um den Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas auf ein Minimum zu senken, wurde neben der bisherigen biologischen Entschwefelung 2017 ein Aktivkohlefilter vor den BHKW installiert.

Bisher wurde das aufbereitete Biogas von drei Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Leistung jeweils 250 kW in Strom und Wärme gewandelt. Im Sommer 2017 wurde ein weiteres Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 400 kW installiert. Grund der Erweiterung war zum einen die Überbauung der installierten Leistung nach den Vorgaben des EEG 2017, um nach Auslauf der über 20 Jahre fixierten Einspeisevergütung technisch dafür vorbereitet zu sein, den produzierten Strom künftig nach dem Ausschreibungsmodell vermarkten zu können. Ein weiterer Grund war die Flexibilisierung der Wärmebereitstellung.

Die nicht für die Prozesswärmebereitstellung benötigte BHKW-Wärme wird zur Beheizung von Wohnhäusern in zwei größeren Nahwärmenetzen, eines nahe gelegenen Seniorenheimes sowie zur Trocknung von Scheitholz und Holzhackschnitzeln verwendet. Da die Wärmenachfrage in den Wintermonaten deutlich höher als die bisher produzierte Wärmemenge der Anlage ist, wird das neu errichtete BHKW dazu verwendet, die realisierte Leistung im Winter von bisher 750 kW auf etwa 1 MW deutlich anzuheben, während im Sommer nur noch eine durchschnittliche Leistung von 500 kW angestrebt wird.

Die Biogasanlage hat ihren Strombedarf seit der Inbetriebnahme selbst gedeckt und den Überschuss ins Stromnetz eingespeist. Seit 2014 ist PB08 Teilnehmer an einem Direktvermarktungspool und stellt Regelenergie in Form von negativer SRL bereit.

3.1.2 Vorstellung von Pilotbetrieb 22

Die von der Firma 4Biogas geplante und errichtete Biogasanlage des Typs NOVA befindet sich in Mittelfranken. Sie ist in einen großen Milchviehbetrieb mit eigener 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).

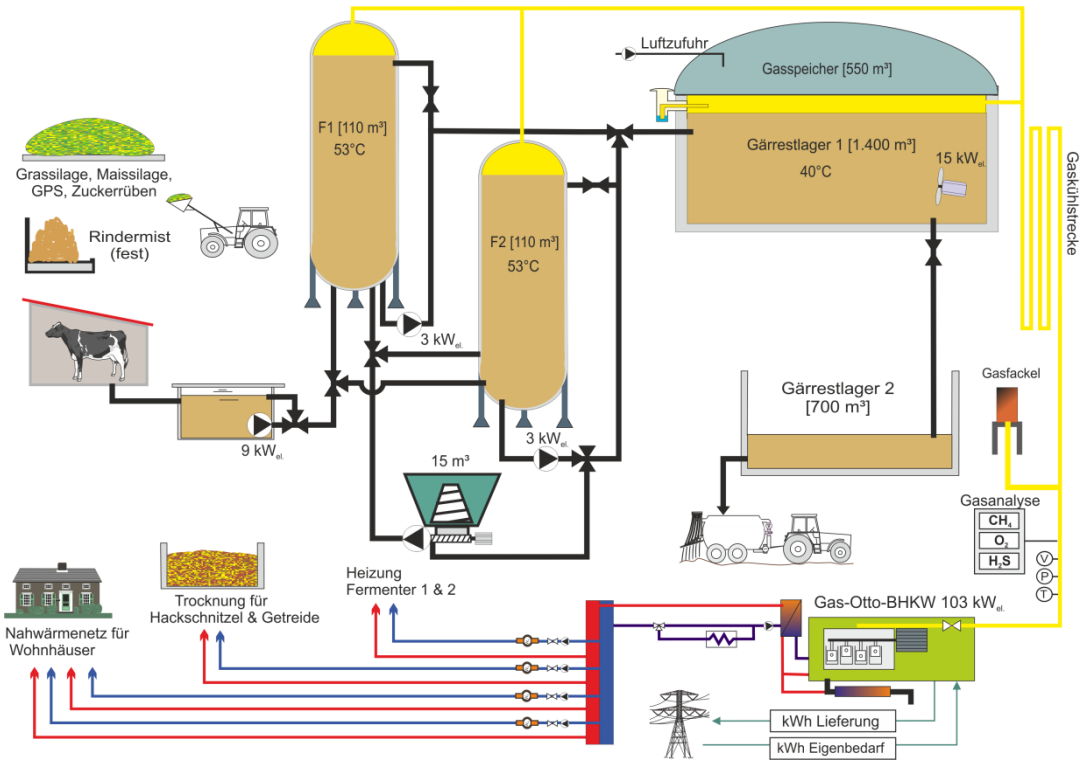

Abb. 2: Fließbild der Biogasanlage von PB22 (Stand: Juni 2018)

Besonderheit dieser Anlage ist die modulare Kompaktbauweise. Dabei wurden die stehenden Fermenter (Maße: 3,5 m x 12 m; Arbeitsvolumen: ca. 110 m³), welche optisch Hochsilos ähneln, als vormontierte Fertigteile aus Edelstahl geliefert und vor Ort zusammengesetzt (Abb. 2). Beide Hochfermenter sind baugleich und im Substratweg parallel geschaltet. Sie sind voll wärmegedämmt ausgeführt und werden mithilfe einer Hohlkammerheizung in der Behälterwand auf einer Gärtemperatur von etwa 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 Rühreinrichtung. Stattdessen wird das Gärgemisch durch kontinuierliches Umpumpen des Behälterinhalts mittels einer Exzenterschneckenpumpe von unten nach oben in Bewegung gehalten und dabei durchmischt.

Die in der Anlage eingesetzten Silagen werden mithilfe eines selbstfahrenden Futtermischwagens aus dem Fahrsilo gefräst, dabei weiter zerkleinert und mithilfe eines Förderbands in einen etwa 15 m³ fassenden Einschnecken-Vertikalmischer eingebracht, der die festen Einsatzstoffe in den Rachen einer Flüssigfütterungsanlage dosiert. Dort vermengt eine Exzenterschneckenpumpe die eindosierten Feststoffe mit Rezirkulat aus dem jeweiligen Gärbehälter, der mit Frischsubstrat beschickt werden soll und pumpt den Substratbrei anschließend in die Fermenter. Ein in die Gärbehälter integriertes sogenanntes „Hydrolyserohr“ wird nach dem Prinzip eines Überlaufs von unten mit Frischsubstrat beschickt und soll versauertes Material nach oben hin in den Gärraum abgeben. Während der Wintermonate wird ein Teil der festen Einsatzstoffe durch Zuckerrüben ersetzt, die einer Miete gelagert und vor der Einbringung in den Feststoffvorlagebehälter mithilfe eines Rübenschnitzlers zweimal zerkleinert werden. Rindergülle, die aus den Stallungen in einer Vor-grube (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. 1.400 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 wärmegedämmt, 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 Prozesstemperatur 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 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.

3.1.3 Vorstellung von Pilotbetrieb 25

Die Biogasanlage auf diesem in Mittelfranken gelegenen Betrieb 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 sogenannten „Ligavator“ zur Flüssigsilierung von Getreidebrei

ausgestattet. Mit dem Anstieg der Getreidepreise wurde die Stromerzeugung aus Getreidekörnern unrentabel, weshalb auf andere nachwachsende Rohstoffe insbesondere Ganzpflanzensilagen umgestellt wurde. Der Ligavator (Lagervolumen: ca. 500 m³) steht daher leer und wurde während des Monitorings auch nicht zur Silierung von Zuckerrübenbrei herangezogen.

Im Gegensatz zu den anderen dargestellten Pilotbetrieben ist Betrieb 25 räumlich nicht vollständig konzentriert. Während die Biogasanlage an der Hofstelle in der Ortschaft errichtet wurde, befindet sich der größte Teil der Fahrsilos und zwei Gärrestlager außerhalb der Ortschaft.

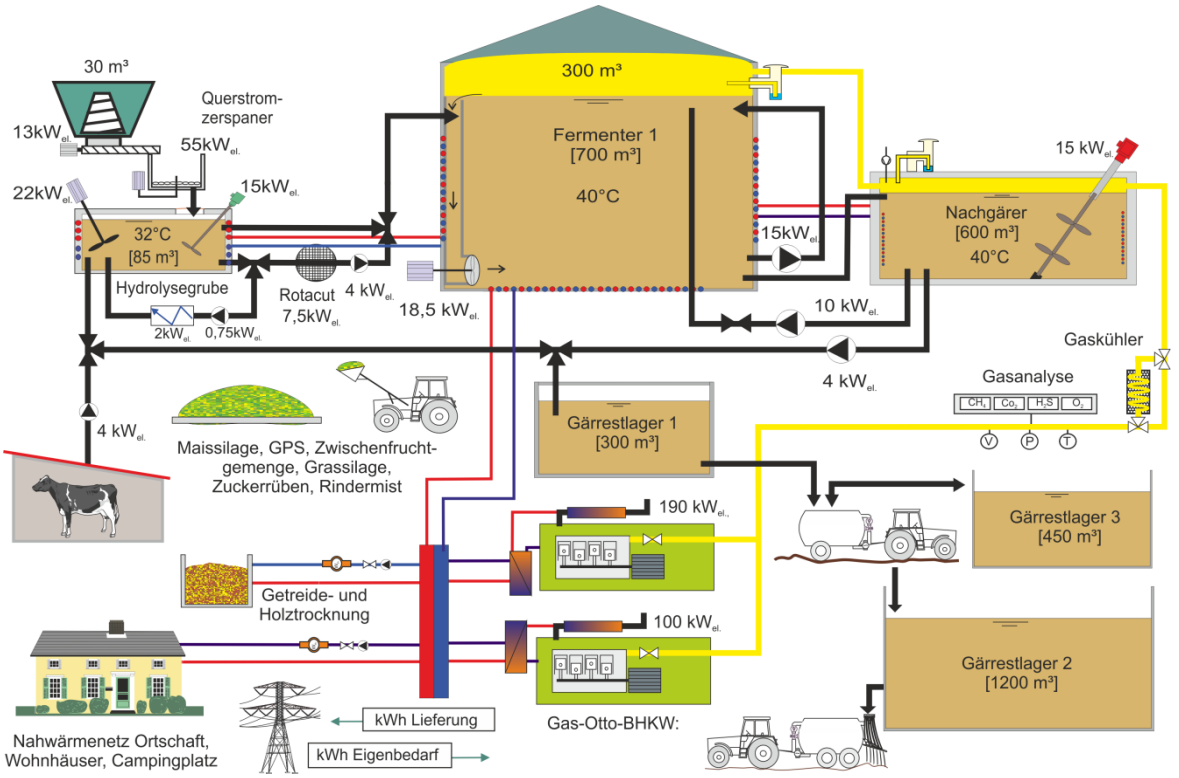

Abb. 3: Fließbild der Biogasanlage von PB25 (Stand: Juni 2018)

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 Vorversauerung der eingesetzten Substrate dient (Abb. 3). Dieser Behälter ist mit Betondecke voll wärmegedämmt ausgeführt und wird mithilfe einer Kombination aus Wand- und Bodenheizung auf einer Prozesstemperatur von etwa 32 °C gehalten.

Ein 30 m³ fassender, runder Edelstahlbehälter mit Austragsflügel beschickt in regelmäßien Abständen einen Querstromzerspaner, der mithilfe einer in einem Stahlbehälter rotierenden Stahlkette nach dem Prinzip eines Mörsers das Material zerfasert und damit die Größe der Substratpartikel deutlich verringert. Der Querstromzerspaner gibt die aufbereiteten Feststoffe an eine Stopfschnecke weiter, die das Material in die Hydrolysegrube einträgt. Die in der Anlage eingesetzten und in einer Miete gelagerten ZR werden vor der Einbringung in den Feststoffvorlagebehälter mithilfe eines Rübenschnitzlers grob zerkleinert. Rindergülle wird aus der Vorgrube mithilfe einer Kreiselpumpe in die Hydrolysegrube gefördert. Eine Exzenterschneckenpumpe dosiert zusätzlich aktives Gärgemisch 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 Exzenterschneckenpumpe kann Hydrolysat entnommen, durch eine Ultraschalldesintegration weiter aufbereitet und anschließend wieder in die Hydrolysegrube zurück gefördert werden.

Eine weitere Exzenterschneckenpumpe entnimmt Hydrolysat über einen saugseitig installierten 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 wärmegedämmte 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 Kombination aus einem Propellerrührwerk, welches in einem Fallschacht 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. Da die Anlage ursprünglich für die Vergärung von Getreidebrei ausgelegt worden war, ist die Leistungsfähigkeit der verbauten Rührtechnik relativ knapp dimensioniert. Mit der Vergärung von Ganzpflanzensilagen kam es daher immer wieder zur Bildung einer Schwimmschicht im Fermenter. Die bereits beschriebenen, nachträglich installierten Querstromzerspaner und Lochscheiben-Nasszerkleinerer konnten durch eine Reduktion der Substratpartikelgröße den Aufwand für das Durchmischen des Behälters deutlich senken und das Problem weitgehend lösen.

Dem Fermenter ist ein kleinerer Nachgärer (Maße: 12 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 600 m³) nachgeschaltet. Der mit Betondecke ausgeführte und voll wärmegedämmte Behälter wird mithilfe einer Edelstahl-Wandheizung auf einer Gärtemperatur von ebenfalls etwa 40 °C gehalten. Über einen freien 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. Um die Belastung der Gärbiologie im Fermenter zu reduzieren, wurde im Jahr 2017 eine Rezirkulationsleitung aus dem Nachgärer in den Fermenter installiert, über die eine Drehkolbenpumpe Gärgemisch aus dem Nachgärer in den Fermenter fördert.

Ausgegorenes Gärgemisch wird mithilfe der gleichen Exzenterschneckenpumpe, 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. Ist das Gärrestlager I voll, wird es mithilfe eines Zapfwellenrührwerks von einem Schlepper aufgerührt und Gärrest mit einem Pumptankwagen entnommen, um diesen in zwei weitere im Außenbereich gelegene Gärrestlager zu transportieren. Gärrestlager II (Maße: 20 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 1.200 m³) und Gärrestlager III (Maße: 12 m x 4 m; Lagervolumen: ca. 450 m³) sind als offene Behälter ausgeführt.

Das in der Anlage erzeugte Biogas wird in einem Gasregister im Boden gekühlt und weitgehend entfeuchtet. Bis zum Jahr 2014 wandelte ein Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 190 kW das Gas zu Strom und Wärme um. Mitte des Jahres 2014 wurde ein weiteres Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 100 kW errichtet und die installierte Leistung damit auf 290 kW angehoben. Ziel der Erweiterung

war weniger eine Flexibilisierung der Stromerzeugung nach den Vorgaben des EEG als vielmehr eine bedarfsgerechte Wärmebereitstellung. Neben der Beheizung der Gärbehälter wird die BHKW-Wärme in einem großen Nahwärmenetz verwertet, an das Ferienhäuser, Wohnhäuser und ein Campingplatz angeschlossen sind. Da die Wärmenachfrage in den Wintermonaten deutlich höher als in den Sommermonaten ist, wird das zusätzliche BHKW seitdem dazu verwendet, die realisierte Leistung im Winter von bisher 190 kW auf maximal 290 kW anzuheben, während im Sommer nur noch eine durchschnittliche elektrische Leistung von 150 kW angestrebt wird. Um auch an kalten Wintertagen eine ausreichende Wärmemenge für das Nahwärmenetz zur Verfügung stellen zu können, ist zusätzlich ein Hackschnitzelheizkessel angeschlossen.

3.1.4 Vorstellung von Pilotbetrieb 27

Diese ebenfalls von der Firma LIPP geplante und errichtete Biogasanlage steht auf einem Marktfruchtbetrieb in Niederbayern und speist seit dem Jahr 2005 Strom in das öffentliche Netz ein. Es werden ausschließlich Energiepflanzen zur Stromerzeugung genutzt. Unter allen Betrieben, die im Rahmen des Projekts begleitet und untersucht werden, weist diese Pilotanlage mit zwei zur Atmosphäre offenen Hydrolysestufen, einem Hauptfermenter und zwei Festbettreaktoren den ungewöhnlichsten und zugleich komplexesten Aufbau auf (Abb. 4). Da alle Behälter in Reihe geschaltet sind, ist die Anlage streng genommen als zweiphasig-fünfstufig zu typisieren.

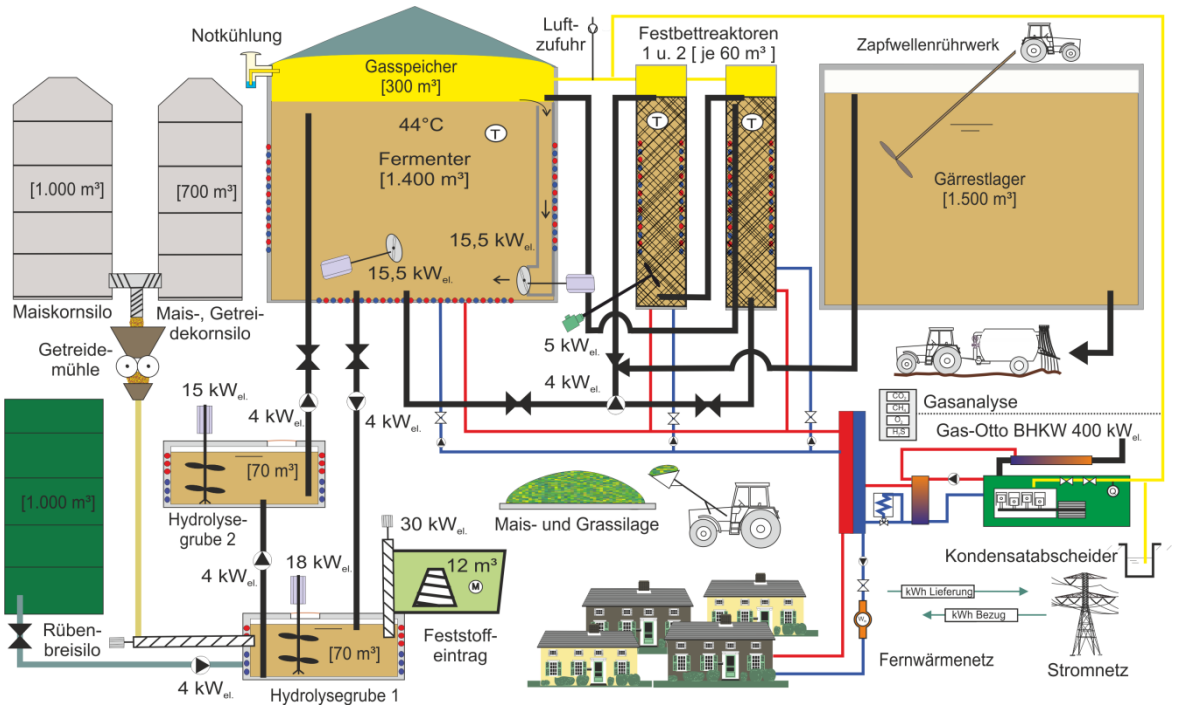

Abb. 4: Fließbild der Biogasanlage von PB27 (Stand: Juni 2018)

Wie Pilotanlage 25 war auch diese Anlage ursprünglich für die Vergärung von Getreideschrot ausgelegt worden und ist dementsprechend mit zwei Ligavatoren (Maße: 10 m x 13 m, Lagervolumen: ca. 1.000 m³) zur Silierung von Getreidebrei ausgestattet. Auch hier wurde die Vergärung von Getreidebrei bereits wenige Jahre nach Inbetriebnahme aus wirtschaftlichen Gründen aufgegeben. Anders als bei PB25 wurde der Getreidebrei aber nicht vollständig durch Ganzpflanzensilagen ersetzt, sondern es wurde einer der beiden Ligavatoren technisch modifiziert, indem anstelle der Entnahmepumpe am Boden des Behälters eine Entnahmeschnecke installiert wurde. Ziel der Maßnahme war es, Maiskörner

im Ganzen silieren zu können (Ganzkornsilage). Zudem wurde ein weiteres Ganzkornsilo (Maße: 8,5 m x 13 m, Lagervolumen: ca. 700 m³) für Mais- oder Getreide errichtet.

Die über ein Konstrukt aus Förderschnecken entnommenen Mais- und Getreidekörner werden in einer ebenfalls nachgerüsteten, elektrisch angetriebenen Walzenmühle geschrotet und mittels weiterer Förderschnecken in die erste Hydrolysegrube (Maße: 6,5 m x 2,5 m, Arbeitsvolumen: ca. 70 m³) eingebracht.

Seit dem Jahr 2013 wird der ursprüngliche zweite Ligavator zur Silierung gemuster Zuckerrüben verwendet. Die Zerkleinerung der trocken gereinigten Rüben erfolgt dabei mithilfe eines mobilen Biomasseschredders. Der Grünguthacker verfügt über einen Rotor mit freischwingenden Schlegeln, welche die Zuckerrüben zerschlagen, anschließend durch ein Recuttersieb drücken und so einen homogenen, pumpfähigen Brei erzeugen. Der Rübenbrei wird dann über ein Förderband in den Trichter einer modifizierten, mobilen Exzenterschneckenpumpe abgegeben, die den Brei von unten in den Ligavator drückt. Nach entsprechender Silierung des Rübenbreis entnimmt eine stationäre Exzenterschneckenpumpe die tägliche Rübenmenge am Boden des Ligavators und gibt diesen in ebenfalls an die erste Hydrolysegrube ab. Zur leichteren Entnahme des silierten Breis wurden die Ligavatoren auf einem betonierten Sockel mit integriertem Trichter errichtet.

Neben dem Getreide- bzw. Maisschrot und Rübenbrei werden aus einem etwa 12 m³ fassenden Einschnecken-Vertikalmischer Mais- und Grassilage in die erste Hydrolysegrube eingebracht. Dort vermengt ein stehendes Paddelrührwerk die genannten Einsatzstoffe mit Rezirkulat aus dem Hauptfermenter. Es kommt zu einer Ansäuerung des Materials, wodurch der pH-Wert des Gemisches sinkt. Der Behälter ist mit Betondecke voll wärmegedämmt ausgeführt und wird mithilfe einer Wandheizung auf einer Prozesstemperatur von etwa 30 °C gehalten. Über eine weitere Exzenterschneckenpumpe wird angesäuertes Material in die zweite Hydrolysegrube eingebracht. Auch dieser Behälter ist mit einer Betondecke voll wärmegedämmt ausgeführt und wird mithilfe einer Wandheizung auf einer Prozesstemperatur von etwa 30 °C gehalten. Ein leistungsfähiger Stabmixer hält das Gemisch homogen. Das Material versauert weiter, wodurch auch der pH-Wert weiter sinkt. Der Hydrolyseprozess läuft in den überfahrbaren Behältern weitgehend anaerob ab, wobei das entstehende Hydrolysegas nicht dem gasführenden System der Biogasanlage zugeführt wird, sondern über eine Öffnung in die Umgebung entweichen kann.

Nach einer Verweilzeit der Einsatzstoffe von wenigen Tagen in beiden Hydrolysebehältern saugt eine Exzenterschneckenpumpe in regelmäßigen Intervallen versauertes Material aus der zweiten Hydrolysegrube und pumpt es in den Hauptfermenter. Der nach dänischer Bauweise (Behälterhöhe ≈ Behälterdurchmesser) dimensionierte, stehende Edelstahlfermenter (Maße: 12 m x 13 m; Arbeitsvolumen: ca. 1.400 m³) ist mit einem Edelstahldach versehen, unter welchem sich ein Gasspeichersack befindet (Lagervolumen: ca. 300 m³). Der voll wärmegedämmte Behälter wird mittels einer Kombination aus Wand- und Bodenheizung mit Kunststoffrohren auf einer Prozesstemperatur von durchschnittlich 44 °C gehalten. Durchrührt wird der Fermenter mithilfe einer Kombination aus einem Propellerrührwerk, welches in einem Fallschacht am Boden des Behälters installiert ist, und eines Stabmixers, der sich ebenfalls in Bodennähe befindet.

Besonderheit dieser Anlage sind die dem Fermenter nachgeschalteten beiden Festbettreaktoren. Die mit einem Festbettbettregister bestehend aus gewellten Kunststoffrohren ausgestatteten, stehenden Hochfermenter (Maße: 3 m x 9 m, Arbeitsvolumen: ca. 60 m³) sind in Reihe geschaltet und werden mithilfe einer

Wandheizung auf 42 °C temperiert. Der erste Behälter wird als „Upflow-Reaktor“ von unten nach oben, der zweite als „Downflow-Reaktor“ von oben nach unten mit Gärgemisch durchströmt. Mithilfe des Festbettregisters soll den methanbildenden Bakterien eine besonders große Besiedelungsfläche zur Verfügung gestellt werden, um so die biologische Aktivität und Abbaurate der zugeführten Biomasse zu steigern. Eine Exzenterschneckenpumpe drückt dazu Gärgemisch, das unten aus dem Hauptfermenter entnommen wird, unten in Festbettreaktor I. Dort sorgt ein kleiner Stabmixer dafür, dass das Gärgemisch homogen gehalten wird und anschließend nach dem Überlaufprinzip langsam das Festbettregister durchsteigt, bis es am oberen Ende des Behälters angekommen ist. Ein freier Überlauf ermöglicht die Übergabe des Gärgemischs an Festbettreaktor II, wobei ein Teil davon in den Hauptfermenter zurückfließt, um auch dort die biologische Aktivität zu steigern. Der andere Teil durchwandert das Festbettregister nach unten.

Gärrest wird über die gleiche Pumpe, die Festbettreaktor I mit Gärgemisch aus dem Hauptfermenter beschickt, in das nicht gasdicht abgedeckte Gärrestlager (Maße: 20 m x 5 m, Arbeitsvolumen: ca. 1.500 m³) gepumpt. Das Gärrestlager ist wie der Fermenter in Edelstahl ausgeführt, verfügt jedoch über keine elektrisch angetriebene, automatisierte Rühreinrichtung. Der Behälter wird mithilfe eines in Bodennähe befestigten und per Schlepper angetriebenen Zapfwellenstabmixers nur vor der Ausbringung des Gärrests auf die Felder aufgerührt.

Kühlung und Entfeuchtung des in der Anlage erzeugten Biogases erfolgen durch eine aktive Gaskühlung mit Klimagerät. Der Gaskühlung wurde ein Aktivkohlefilter nachgeschaltet, um den Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas auf ein Minimum zu reduzieren. Ein Gas-Otto-BHKW mit der elektrischen Leistung von 400 kW wandelt anschließend das Gas in Strom und Wärme um. Die beiden ehemaligen BHKW mit einer elektrischen Leistung von jeweils 170 kW wurden 2014 stillgelegt, stehen aber im Falle längerer Wartungsarbeiten am Haupt-BHKW noch zur Verfügung. Neben der Bereitstellung der Prozesswärme wird die Abwärme des in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms in ein größeres Nahwärmenetz zur Wärmeversorgung von Wohnhäusern eingespeist.

3.1.5 Vorstellung von Pilotbetrieb 28

Die von der Firma Niederlöhner und Quirrenbach (NQ) geplante und mit einem größeren Anteil an Eigenleistung errichtete Biogasanlage wird seit 2009 auf einem großen Putenmasthof in Schwaben betrieben. Es handelt sich um eine „NawaRo-Anlage“ , die zusätzlich den Güllebonus nach EEG 2009 in Anspruch nimmt. Besonderheit der Anlage ist der relativ hohe Einsatzstoffanteil an Putenmist (knapp 30 %), der ausschließlich aus der eigenen Putenhaltung auf Dinkelspelzen anstelle von Stroh als Einstreumaterial stammt. Zudem realisiert die Anlage den höchsten Zuckerrübenanteil aller untersuchten Pilotanlagen.

Wie im Fließschema in Abbildung 5 dargestellt, verfügt die BGA von PB 28 über einen Hauptfermenter (Maße: 18 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 1.400 m³), dem ein gleichgroßer Nachgärer (Maße: 18 m x 6 m; Arbeitsvolumen: ca. 1.400 m³) nachgeschaltet ist. Es handelt sich damit um einen Standard-Aufbau einer Biogasanlage. Beide Gärbehälter sind baugleich und verfügen über eine Betondecke, sind rundum wärmegedämmt und werden mithilfe von Kunststoffrohr-Wandheizungen auf Prozesstemperatur gehalten. Der Fermenter wird zur leichteren Durchmischung aufgrund verbesserter Viskosität mit einer erhöhten Gärtemperatur von etwa 48 °C und damit zwischen dem klassischen mesophilen und thermophilen Temperaturbereich betrieben. Durchmischt werden beide Behälter mithilfe

einer Kombination aus stehendem, langsam drehendem Paddelrührwerk und einem schnell drehenden Stabmixer.

Ein etwa 50 m³ fassender Kratzbodencontainer dosiert die festen Einsatzstoffe mittels zweier Fräswalzen in einen kleinen Trichter mit Trog- und gleichzeitiger Stopfschnecke, die den zu etwa zwei Drittel im Boden versenkten Fermenter beschickt. Die in der Anlage eingesetzten und in einer Miete gelagerten Zuckerrüben werden vor der Einbringung in den Feststoffvorlagebehälter mithilfe eines Rübenschnitzlers zerkleinert. Verwertete Schweinegülle stammt ausschließlich von Fremdbetrieben und wird nach Anlieferung in eine im Boden versenkte Vorgrube (Maße: 8 m x 4 m, Volumen: ca. 200 m³) eingebracht. In einer zweiten, baugleichen Vorgrube (Maße: 8 m x 4 m, Volumen: ca. 200 m³) wird das in der Fahrsiloanlage anfallende Gemenge aus Regenwasser und Silagesickersaft aufgefangen.

Mithilfe einer zentral installierten, leistungsstarken Drehkolbenpumpe werden sowohl Schweinegülle aus Vorgrube I als auch Sickersaft-Regenwasser-Gemenge aus Vorgrube II in den Fermenter gepumpt. Die gleiche Pumpe wird für die Beförderung des Gärgemischs vom Fermenter in den Nachgärer und des ausgegorenen Gärrests vom Nachgärer in das erste Gärrestlager verwendet. Zudem kann mit der Pumpe auch aus dem Nachgärer oder Gärrestlager I zur Verdünnung des Gärgemischs in den Fermenter rezirkuliert werden.

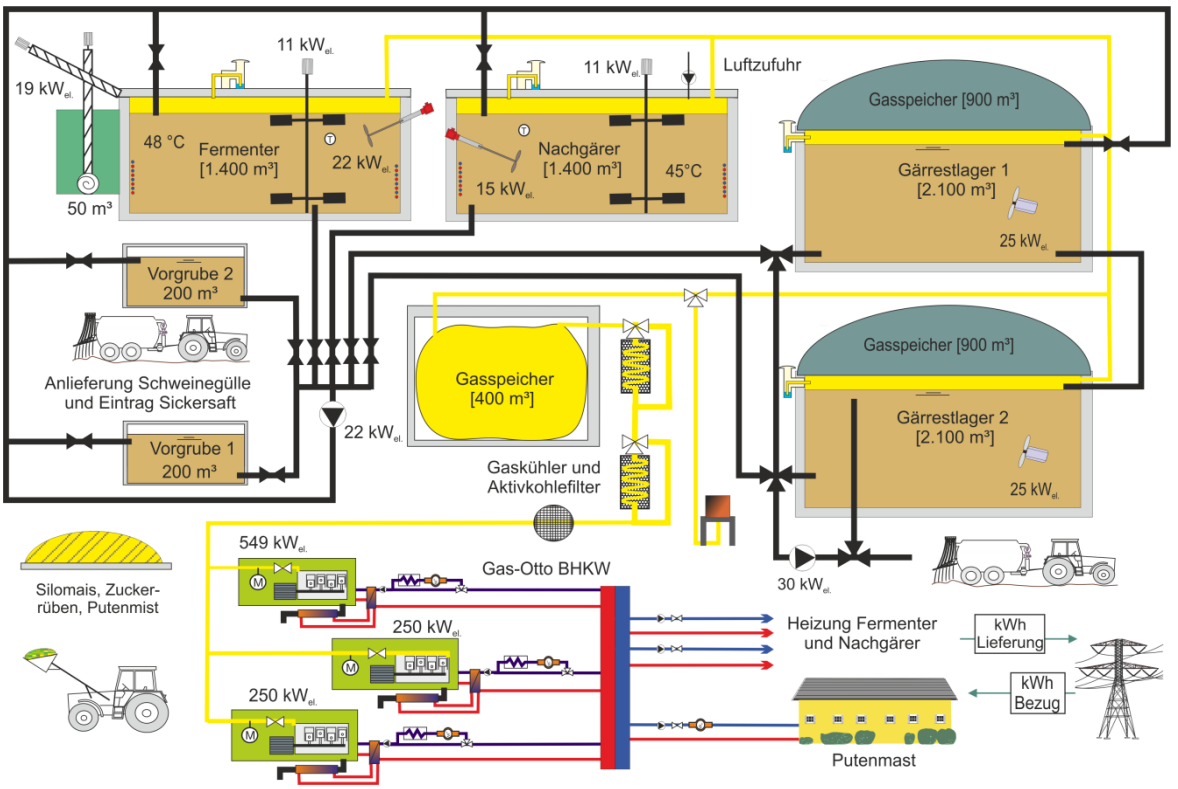

Abb. 5: Fließbild der Biogasanlage von PB28 (Stand: Juni 2018)

Wie Fermenter und Nachgärer sind auch die beiden Gärrestlager (Maße: 22 m x 6 m, Fassungsvermögen: ca. 2.100 m³) zu etwa zwei Drittel im Boden versenkt, aber anstelle der Betondecke mit einem Tragluftdach zur Gasspeicherung (Lagervolumen: ca. 900 m³) ausgeführt. Die Gärrestlager sind über einen freien Überlauf miteinander verbunden. Zusätzlich kann Gärrest aus dem ersten Gärrestlager mit einer weiteren leistungsstarken

Drehkolbenpumpe in das zweite Gärrestlager gepumpt werden. Diese Pumpe wird auch zur Befüllung der Gärrestausbringfässer über eine Fassfüllstation verwendet.

Da beide Gärrestlager erst einige Jahre nach Inbetriebnahme der Anlage errichtet wurden, erfolgte die Gaslagerung bis dato in einem separaten Betonbehälter (Maße: 12 m x 6 m) mit integriertem Gasspeichersack (Lagervolumen: ca. 600 m³). Dieser Behälter ist nach wie vor in das Gasnetz integriert, wodurch die aktuelle Gaslagerkapazität der Anlage in Summe etwa 2.400 m³ beträgt. Kühlung und Entfeuchtung des erzeugten Gases erfolgen mittels eines Klimageräts. Um den Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas auf ein Minimum zu senken und dementsprechend Korrosionsschäden am BHKW vorzubeugen, ist der Gaskühlung ein Aktivkohlefilter nachgeschaltet.

Bisher wurde das erzeugte Biogas in zwei Gas-Otto-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von jeweils 250 kW in Strom und Wärme umgewandelt. In September 2017 wurde zusätzlich ein neues BHKW mit einer elektrischen Leistung von 549 kW in Betrieb genommen. Hauptgrund für die Leistungserweiterung war die im EEG 2012 garantierte Flexibilitätsprämie sowie das Alter der vorhandenen Gasmotoren. Seitdem wird das neue BHKW in Grundlast betrieben. Die bisherigen Motoren sind derzeit stillgelegt, stehen aber für eine bedarfsgerechte Stromproduktion oder Ausfälle des Haupt-BHKW zur Verfügung.

Trotz des ausgelagerten Standorts der Anlage kann ein hoher Anteil der BHKW-Wärme effektiv genutzt werden. Neben der Bereitstellung der für den Gärprozess erforderlichen Wärmemenge werden die am Standort der Biogasanlage befindlichen großen Putenmastställe mit Wärme versorgt.

3.2 Vorgehen zur Erfassung und Auswertung der Betriebsdaten

Zur fortlaufenden Gewinnung der Betriebsdaten wurden bis Herbst 2016 die benötigten Messgeräte an den zwei neu ins Monitoring aufgenommenen BGA installiert. An beiden Anlagen fehlten Geräte zur Biogasmengenmessung sowie zur Erfassung des Strombedarfs wichtiger Einzelkomponenten. Ebenso mussten Gastemperaturfühler und Druckmessumformer installiert werden, ein Gasanalysator konnte nur an PB27 nachgerüstet werden. Bei der Beschaffung von Messtechnik wurde auf Systeme zurückgegriffen, die sich in den Vorläuferprojekten bewährt hatten. Zähler zur Erfassung der extern genutzten Wärmemengen waren auf allen Anlagen vorhanden. Die weitergeführten BGA waren messtechnisch bereits vollständig ausgestattet und es mussten lediglich einige defekte Sensoren in den Gasanalysatoren ausgetauscht werden.

Nach Abschluss der messtechnischen Nachrüstung wurde Anfang Oktober 2016 – zum Zeitpunkt der Zuckerrübenernte – mit der Datenerfassung auf den Neuanlagen begonnen. Die Datenerfassung bestand im Wesentlichen aus folgenden Punkten:

1. Probenahmen: einmal monatliche Beprobung aller Einsatzstoffe und Gärbehälterinhalte;
2. Automatische Datenaufzeichnung: zweimal tägliches Loggen aller automatisch erfassbaren Kennwerte zum Anlagenbetrieb;
3. Manuelle Aufzeichnungen im Betriebstagebuch: einmal tägliche Dokumentation aller Einsatzstoffmengen, Zählerstände und Störungen im Anlagenbetrieb durch den Betreiber

Die einmalige Erhebung der Basisdaten zur technischen Ausstattung und Dimensionierung der Biogasanlagen (Inventarisierung) erfolgte im Winter 2016. Außerdem wurde mit jedem

Betreiber in einem Gespräch erörtert, aus welchen Gründen er sich für den Einsatz von Rüben zur Biogasproduktion entschieden hatte.

3.3 Analyse technischer Schwachstellen

Mittels der an der LfL entwickelten Web-Anwendung „Biogas Doc“ wurden die Biogasanlagen hinsichtlich der technischen Effizienz bewertet und auf Schwachstellen untersucht. Hierbei wurde derselbe Bewertungsmaßstab verwendet wie im Rahmen des jüngsten bundesweiten Biogas-Messprogramms („BMP III“), welcher den aktuellen Stand der Biogastechnik in der Praxis abbildet [8].

Das Ergebnis der Bewertung ist in einen qualitativen und quantitativen Aspekt unterteilt. Die qualitative Bewertung mittels der vier Effizienzklassen „sehr gut“/ „gut“/ „ausreichend“/ „ungenügend“ macht Schwachstellen erkennbar und ist wie folgt zu interpretieren:

- „Sehr gut“: Hervorragende Bewertung ⇒ praktisch keine Verbesserung möglich;
- „Gut“: Gute Bewertung ⇒ keine Schwachstelle, aber Verbesserung möglich;
- „Ausreichend“: Ausreichende/durchschnittliche Bewertung ⇒ Schwachstelle vorhanden, Verbesserung empfohlen;
- „Ungenügend“: Ungenügende Bewertung ⇒ schwerwiegender Mangel vorhanden, Verbesserung dringend erforderlich.

Für die quantitative Bewertung wird ein Effizienzwert zwischen 0 und 100 berechnet. Anhand dieses Effizienzwertes können unterschiedliche Anlagen aufgereiht werden oder es kann eine einzelne Anlage in verschiedenen Stadien evaluiert werden. Die methodischen Grundlagen des „Biogas Doc“ wurden an anderer Stelle ausführlich beschrieben [9],[10].

3.4 Analyse von Umweltwirkungen

Welche Veränderungen bei den Umweltwirkungen einer Biogasanlage durch den Einsatz von ZR im Einzelfall auftreten, wird im Wesentlichen von den Antworten auf folgende Fragen abhängen:

- Welche Einsatzstoffe werden gegebenenfalls durch ZR ersetzt?
- Bedingt der Einsatz von ZR signifikante bauliche Maßnahmen an der Biogasanlage und Veränderungen des Prozessenergiebedarfs?
- Gehen mit dem Einsatz von ZR Veränderungen bei der Verwertung des erzeugten Biogases einher: Wird also beispielsweise angestrebt, durch Modulation der Gasproduktionsrate die Stromerzeugung mehr am Bedarf zu orientieren, und hat dies Auswirkungen auf den Wärmeabsatz?

Die erste Frage stellt auf die Substratbereitstellung ab, welche die Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Biogasketten entscheidend prägt, sofern nennenswerte Mengen an Anbaubiomasse („Energiepflanzen“) zum Hauptzweck der Biogaserzeugung angebaut werden. Da es sich bei ZR um eine in konventionell wirtschaftenden Betrieben mit hoher Intensität erzeugte Reihenkultur handelt, lässt sich im besten Fall zumindest keine nennenswerte Verschlechterung der Ökobilanz erwarten, wenn die ZR andere Reihenkulturen ersetzt. Agrarökologische Verbesserungen könnten sich dann ergeben, wenn der Anbau von ZR zur Aufweitung der betrieblichen Fruchtfolge genutzt wird. Um dies in einer Ökobilanz abzubilden, müsste eine vergleichende betriebliche Bilanzierung der Fruchtfolgen durchgeführt werden. Der entsprechende konnte im vorliegenden Projekt allerdings nicht geleistet werden.

Der zweitgenannte Aspekt bezieht sich auf signifikante Veränderungen an der Anlage und im Betriebsablauf, wie die Schaffung einer zusätzlichen Lagermöglichkeit und zusätzliche Prozesse wie die Reinigung und Zerkleinerung der Rüben. Dies kann im Rahmen des Anlagenmonitorings evaluiert werden, sofern ein entsprechender Referenzzustand ohne ZR-Einsatz charakterisiert werden kann. Gleiches gilt für den letztgenannten Aspekt.

Die Betrachtung der Umweltwirkungen erfolgte auf der Basis von THG-Bilanzen der Strom- und Wärmebereitstellung aus Biogas und der Energieeffizienz. Zum Zwecke einer internen Evaluierung der THG-Bilanz wurden, wie im Folgenden beschrieben, zwei alternative Methoden angewandt.

3.4.1 Analyse mittels der Anwendung „THG-Rechner Biogas“

Um einschätzen zu können, ob der Einsatz von ZR erkennbare Auswirkungen auf die Umweltwirkungen der Biogasketten hatte, wurde mittels der von der LfL entwickelten Anwendung „THG-Rechner Biogas“ eine Analyse der Umweltwirkungen „globale Erwärmung“ und „kumulierter Energieaufwand“ vorgenommen. Hierfür wurde die MS®Excel-Version des THG-Rechners verwendet (Für eine ausführliche Beschreibung der Anwendung siehe: [11]).

Die Vorgehensweise bei dieser vereinfachten Analyse wurde in Abhängigkeit vom Umfang der verfügbaren Zeitreihen angepasst. Für die Betriebe PB08, PB22 und PB25 wurden zum Vergleich Zeiträume aus dem vorhergehenden Monitoring ohne Einsatz von ZR ausgewertet. Auf den Betrieben PB27 und 28 hingegen konnte als Referenz kein ausreichend langer Zeitraum gänzlich ohne ZR-Einsatz identifiziert werden, so dass nur eine Bilanzierung für die aktuelle Beobachtungsperiode erfolgte (Tab. 3).

Tab. 3: Festlegung der Zeiträume für die vergleichende Analyse ausgewählter Umweltwirkungen der Biogasproduktion mit und ohne Einsatz von ZR.

	PB08	**PB22**	**PB25**	**PB27**	**PB28**
Referenzzustand gänzlich ohne ZR-Einsatz	2014	2014	03 – 12/2014	n.v.	n.v.
Aktueller Beobachtungszeitraum mit (zeitweisem) ZR-Einsatz	11/2017 – 10/2018	01/2015 – 12/2017	12/2015 – 12/2017	01/2017 – 12/2018	01/2016 – 10/2018

n.v.: nicht verfügbar.

Für die Berechnung der vermiedenen THG-Emissionen der Strom- bzw. Wärmeerzeugung nach der Methode der Systemraumerweiterung wurden die Werte aus der „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“ nach Umweltbundesamt verwendet, wie in Tab. 4 aufgeführt. Gegenüber deren konventioneller Lagerung vermiedene THG-Emissionen durch Verwertung tierischer Wirtschaftsdünger wurden in der Bilanz nicht berücksichtigt. - Begründung: Die tierischen Wirtschaftsdünger gehen ohne „THG-Rucksack“ in die Bilanz ein und der Anteil dieser Substrate in den betrachteten Biogasanlagen fällt sehr unterschiedlich aus; somit ergäben sich erhebliche Verzerrungen beim Vergleich der Anlagen. Unberücksichtigt blieben zudem Veränderungen im Humus-C-Gehalt der bewirtschafteten Flächen sowie Effekte einer direkten oder indirekten Landnutzungsänderung.

Tab. 4: Verwendete Emissionsfaktoren für die Referenzsysteme zur Strom- und Wärmeerzeugung aus fossilen Energieträgern; Werte in g/kWh für das GWP100.

	Strom	Wärme	Quelle
_2014	778	308	[12]
_aktuell	738	289	[13]

Für die Allokation nach Exergiegehalt wurde eine Wärmeauskopplung auf einem Temperaturniveau von 56 K über Umgebungstemperatur (15 °C) angenommen. Der Exergieanteil ergibt sich dann aus: $1 - (344\ K/288\ K) \approx 0{,}163$; der entsprechende Allokationsfaktor errechnet sich als Anteil des Exergiegehaltes der abgesetzten Wärmemenge am gesamten Exergieoutput des BHKW.

3.4.2 Alternative Analyse mittels Ökobilanz-Software

Für PB08 sind aus vorhergehenden Projekten umfangreichere Daten zum Pflanzenbau verfügbar. Zum Zwecke einer internen Evaluierung der Methodik wurde daher für diesen Betrieb alternativ zur Analyse mit dem „THG-Rechner“ eine Bilanzierung in höherem Detailgrad mit der Ökobilanz-Software „GaBi 9“ (thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen) vorgenommen. Die Allokation der CO_2-Äq-Emissionen auf Strom und Wärme nach Exergiegehalt erfolgte hierbei nach derselben Methode wie obenstehend beschrieben. Für den Vergleich der Ergebnisse ist festzuhalten, dass die Abschätzung der Emissionen aus der Gärstrecke und dem BHKW auf den beiden alternativen Rechenwegen im Wesentlichen nach dem gleichen Ansatz auf Basis des gemessenen Biogasertrags geschätzt wird.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird für die einzelnen Biogasanlagen anhand der aufgenommenen Zeitreihen gängiger verfahrenstechnischer Kennwerte und gärbiologischer Prozessindikatoren der Betriebsverlauf dokumentiert. Sofern es zu nennenswerten Störungen kam, werden deren Ursachen und die Maßnahmen zur Abhilfe diskutiert.

Anschließend werden die Besonderheiten, die beim Einsatz von Zuckerrüben beobachtet wurden, in der Gesamtschau der untersuchten Betriebe vorgestellt und diskutiert. Ein weiterer gesonderter Abschnitt befasst sich mit der Frage, welche Folgen der Einsatz von Zuckerrüben auf die Umweltwirkungen der Biogasproduktion hat.

4.1 Verlauf des Anlagenbetriebs

Der Vorstellung und Diskussion der Beobachtungen an den einzelnen Pilotbetrieben vorangestellt ist mit Tab. 5 auf der folgenden Seite eine Übersicht zu ausgewählten verfahrenstechnischen Kennwerten. Für PB08, PB22 und PB25 wurden in diese Übersicht auch Daten aus einem vorhergehenden Monitoring zum Vergleich aufgenommen. Weitere Kennwerte finden sich im Anhang.

Tab. 5: Übersicht zum zeitlichen Umfang des Anlagen-Monitorings und zu ausgewählten (mittleren) verfahrenstechnischen Kennwerten; falls vorhanden, sind als Referenz Daten aus einem vorhergehenden Monitoring aufgeführt; Kursivdruck: Werte wurden nicht über den gesamten Auswertungszeitraum ermittelt, Kursivdruck in Rot: Werte konnten nicht direkt gemessen werden und wurden daher rechnerisch ermittelt bzw. abgeschätzt.

		PB08_2014	**PB08_aktuell**	**PB22_2014**	**PB22_aktuell**	**PB25_2014**	**PB25_aktuell**	**PB27**	**PB28**
Auswertungszeitraum	d	365	352	365	1095	365	700	730	1029
davon Tage mit tatsächl. ZR-Einsatz	d	0	137	53	253	0	279	679	522
Gesamter FM-Eintrag	t/d	30,0	20,7	18,9	22,4	13,5	17,0	11,5	32,5
Gesamter oTM-Eintrag	t/d	9,0	6,5	2,2	2,8	2,6	4,3	5,2	10,6
Frischwasserzugabe	m³/d	1,3	0,1	-	-	-	-	-	-
oTM-Raumbelastung Fermentersystem	kg/(m³ d)	2,1	1,5	1,4	1,8	1,9	3,1	3,1	3,8
Hydraul. Verweilzeit Fermentersystem	d	143	208	86	72	103	82	147	86
CH_4-Gehalt im Biogas	%	51,3	49,7	51,6	*51,1*	58,9	59,1	53,1	*50,3*
H_2S-Gehalt im Biogas	ppm	40	37	212	*291*	116	117	n.v.	n.v.
Gasproduktionsrate	m³/d	8.729	9.197	1.275	1.261	1.959	2.301	4.240	6.409
Methanproduktionsrate	m³/d	4.469	4.575	658	645	1.154	1.360	2.252	*3.224*
Methanproduktivität Fermentersystem	m³/(m³ d)	1,0	1,1	0,41	0,40	0,83	1,0	1,3	*1,2*
Gasausbeute (Normbed.) aus FM	m³/t	291	444	67	56	146	136	370	197
Methanausbeute (Normbed.) aus FM	m³/t	149	221	35	29	86	80	197	*99*
Gasausbeute (Normbed.) aus oTM	m³/t	967	1.419	571	445	756	537	808	604
Methanausbeute (Normbed.) aus oTM	m³/t	495	706	257	227	445	318	429	*304*
Stromeinspeisung	kWh/d	15.232	16.798	2.449	2.357	4.198	4.792	9.025	12.122
Stromerzeugung	kWh/d	16.504	18.391	2.449	2.357	4.198	4.792	9.025	12.122
Brutto-Stromausbeute aus FM	kWh/t	507	811	129	105	312	282	788	373
Brutto-Stromausbeute aus oTM	kWh/t	1.687	2.591	1.097	831	1.619	1.119	1.721	1.142
Verstromungsfaktor Biogas	kWh/m³	1,75	1,83	1,92	1,92	2,14	2,08	1,92	1,92
Installierte elektr. Leistung	kW	750	1150	103	103	190	290	400	799
Stromkennzahl	1	1,16	1,05	1,26	1,26	1,21	1,23	1,02	1,00
Elektr. Höchstbemessungsleistung	kW	750	713	103	98	190	276	380	490
Mittlere erreichte elektr. Leistung	kW	688	700	102	98	175	200	376	505
Elektr. Nutzungsgrad	%	37,0	40,3	37,3	36,7	36,5	35,3	40,2	37,7
Mittlere elektr. Auslastung (Höchstbemessungsleistung)	%	92	98	99	100	92	72	99	103
Anteiliger Stromeigenbedarf	%	7,7	8,7	9,4	11,1	15,8	17,2	*10,2*	*7,4*
Anteiliger Wärmeeigenbedarf	%	*14,7*	*14,7*	21,8	*21,8*	12,1	*13,2*	*15,0*	*15,0*

4.1.1 Betriebsverlauf für PB08

Während des Beobachtungszeitraums von 353 Tagen wurden ZR in PB08 vom Spätherbst bis in den Frühling hinein an insgesamt 137 Tagen gefüttert: bezogen auf den zeitlichen Umfang lag der Anteil von ZR damit bei knapp 40 %. Während der FM-Anteil von ZR im Mittel über den Beobachtungszeitraum lediglich 7,0 % ausmachte, erreichte diese Anlage auf Tagesbasis mit maximal 73 % den im Vergleich höchsten realisierten ZR-Anteil (Vergleiche Tab. 11).

Die Anlage wird seit mehreren Jahren ausschließlich mit Energiepflanzen beschickt, was wiederholt die Zugabe größerer Mengen an Wasser zur Verdünnung des Gärgemisches erfordert. Diesbezüglich fällt auf, dass während des ZR-Einsatzes wegen deren hohen Wassergehalts kaum zusätzliches Wasser zugegeben werden musste (Vergleiche Abb. 6 und Anhang).

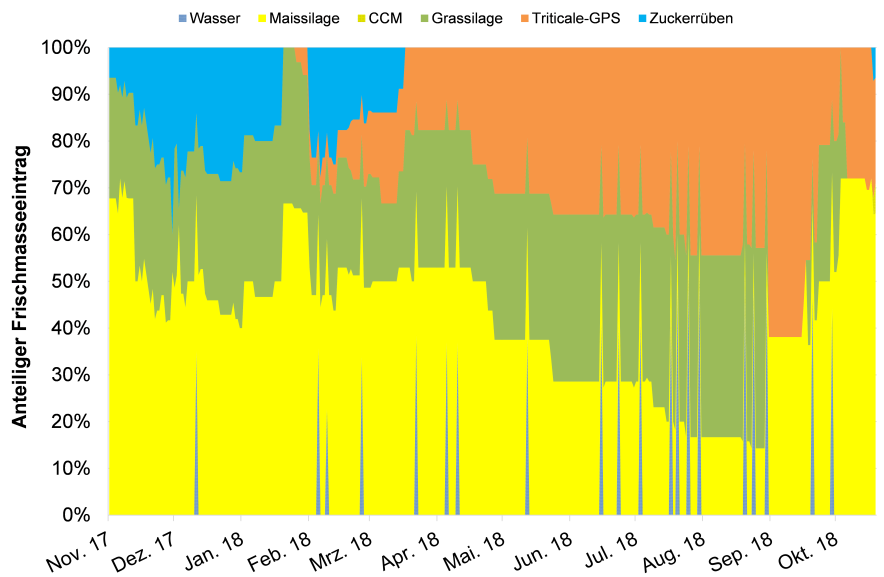

Abb. 6: Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix von PB08 in täglicher Auflösung.

Die nähere Betrachtung der Substratauswahl auf Tagesbasis lässt erkennen, dass der Einsatz von ZR deutlich negativ mit demjenigen von Maissilage und kaum mit demjenigen von Grassilage korrelierte: im Spätherbst und Winter wurden ZR also vornehmlich im Austausch mit Maissilage eingesetzt (Abb. 6, Abb. 7). Zwischen ZR und Triticale-GPS war hingegen keine Abhängigkeit der Anteile am FM-Eintrag erkennbar.

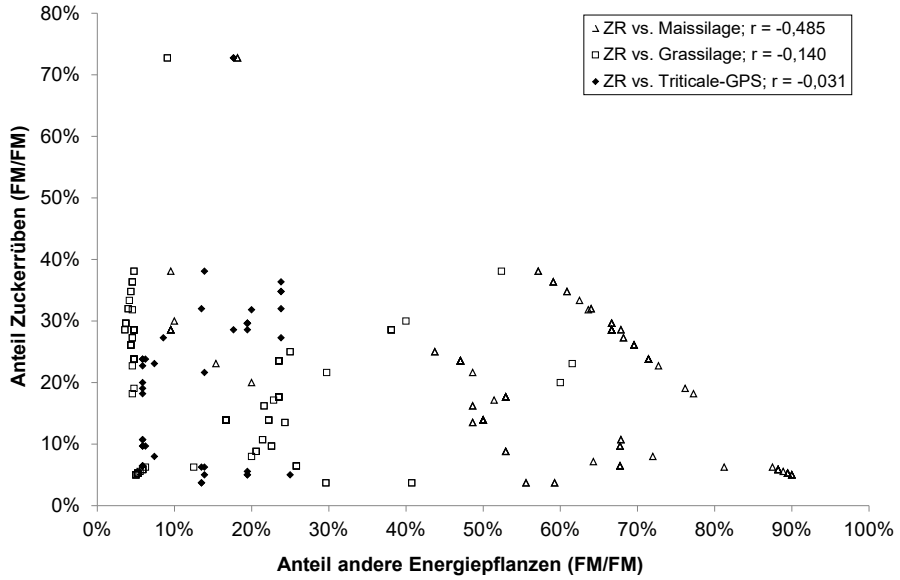

Abb. 7: Anteilige FM aus ZR versus anteilige FM aus anderen Einsatzstoffen am Substratmix von PB08 im Beobachtungszeitraum 11/2017 – 10/2018; Angabe der Korrelationskoeffizienten in der Legende.

Der Betreiber dieser Biogasanlage gab an, Zuckerrüben ab Winter 2017/18 zur saisonalen Fütterung einzusetzen, um den während der Wintermonate deutlich gesteigerten Wärmebedarf der angeschlossenen Abnehmer zu decken. Im Gegenzug sollte die BHKW-Leistung während der Sommermonate mit geringer Wärmenachfrage gedrosselt werden. Die Umstellung auf diese Wärme geführte, saisonale Flexibilisierung kann man in Abb. 8 klar erkennen.

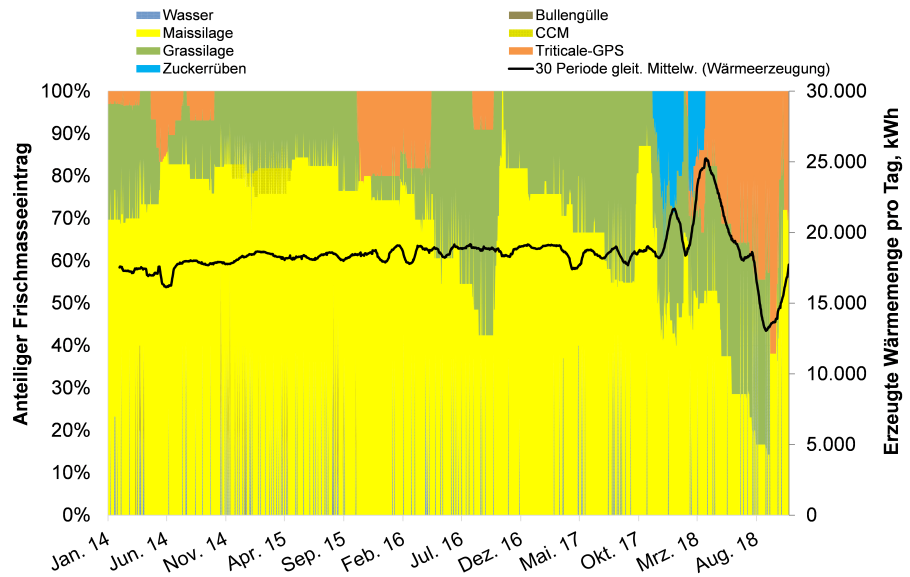

Abb. 8: Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix (tägliche Auflösung) sowie der erzeugten Wärmemenge (gleitender Mittelwert über 30 Tage) von PB08 über den Beobachtungszeitraum und in den vorhergegangenen Jahren.

Die relative Spreizung zwischen dem winterlichen Maximum und dem sommerlichen Minimum der täglichen Wärmeerzeugung beträgt etwa zweieinhalb. Die mittlere elektrische

Gesamtleistung des BHKW variierte entsprechend von 413 bis 1029 kW, wobei zwei bis vier Motoren in Betrieb waren (Abb. 9). Daten zum Wärmeabsatz auf Tagesbasis sind für die Anlage nur für die Holztrocknung vor Ort verfügbar, nicht für die Heizwärme zur internen und externen Nutzung. In Abb. 9 wurde deshalb die auf Basis der Stromerzeugung abgeschätzte gesamte BHKW-Wärme der Wärmenutzung zur Holztrocknung gegenüber gestellt: an 80 % der Tage im Beobachtungszeitraum wurden für diese zwischen etwa einem Viertel und der Hälfte der gesamten BHKW-Wärme genutzt.

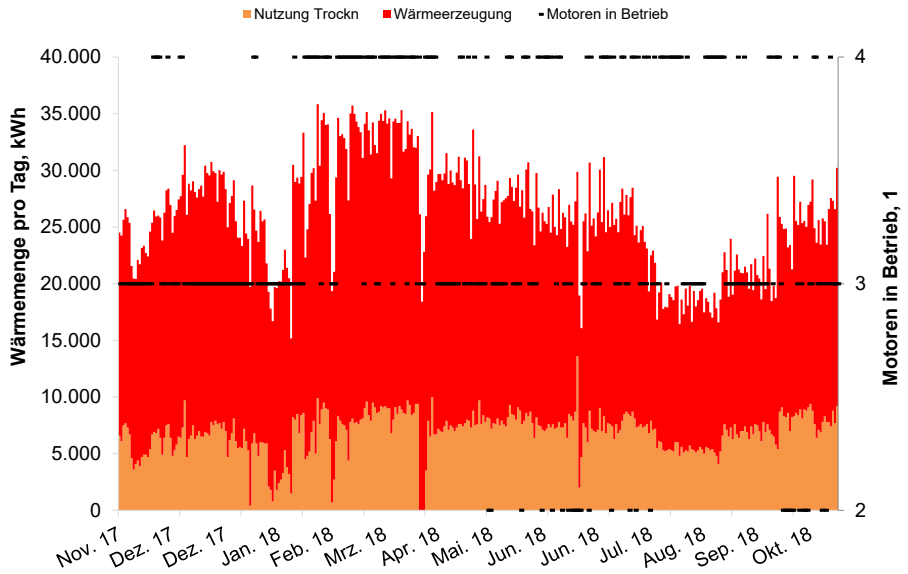

Abb. 9: Gesamte erzeugte Wärme, für Holztrocknung genutzte Wärme sowie Anzahl der in Betrieb befindlichen Motoren des BHKW von PB08 in täglicher Auflösung über den Beobachtungszeitraum.

Um zu prüfen, in welchem Maße Zuckerrüben gezielt dazu eingesetzt wurden, die Biogasproduktion entsprechend dem Heizwärmebedarf zu modulieren, sollen folgende Hypothesen gelten:

(1) Es zeigt sich eine positive Korrelation zwischen der Eintragsrate von ZR und der Wärmeerzeugung;
(2) Es zeigt sich eine positive Korrelation zwischen der Eintragsrate von oTM aus ZR und der oTM-Raumbelastung der Anlage als Steuergröße für die Biogasrate;
(3) Diese Korrelationen sind für ZR jeweils stärker ausgeprägt, als für die übrigen Einsatzstoffe.

Wie in Abb. 10 dargestellt, ist die Korrelation der ZR-Eintragsrate mit der Wärmeerzeugung absolut gesehen nur schwach positiv ausgeprägt, mit der Raumbelastung sogar schwach negativ; hingegen zeigt sich jeweils eine deutliche positive Korrelation für die Eintragsrate von Maissilage. Demnach können die obigen Hypothesen in dieser Form nicht bestätigt werden. Offenbar wurde ZR zwar, wie obenstehend bereits festgestellt, als Ersatz für Maissilage eingesetzt, die Anlagenleistung aber wurde hauptsächlich durch die Eintragsrate von Maissilage moduliert. Der Einsatz von Grassilage erfolgte unabhängig von der Anlagenleistung (nicht dargestellt).

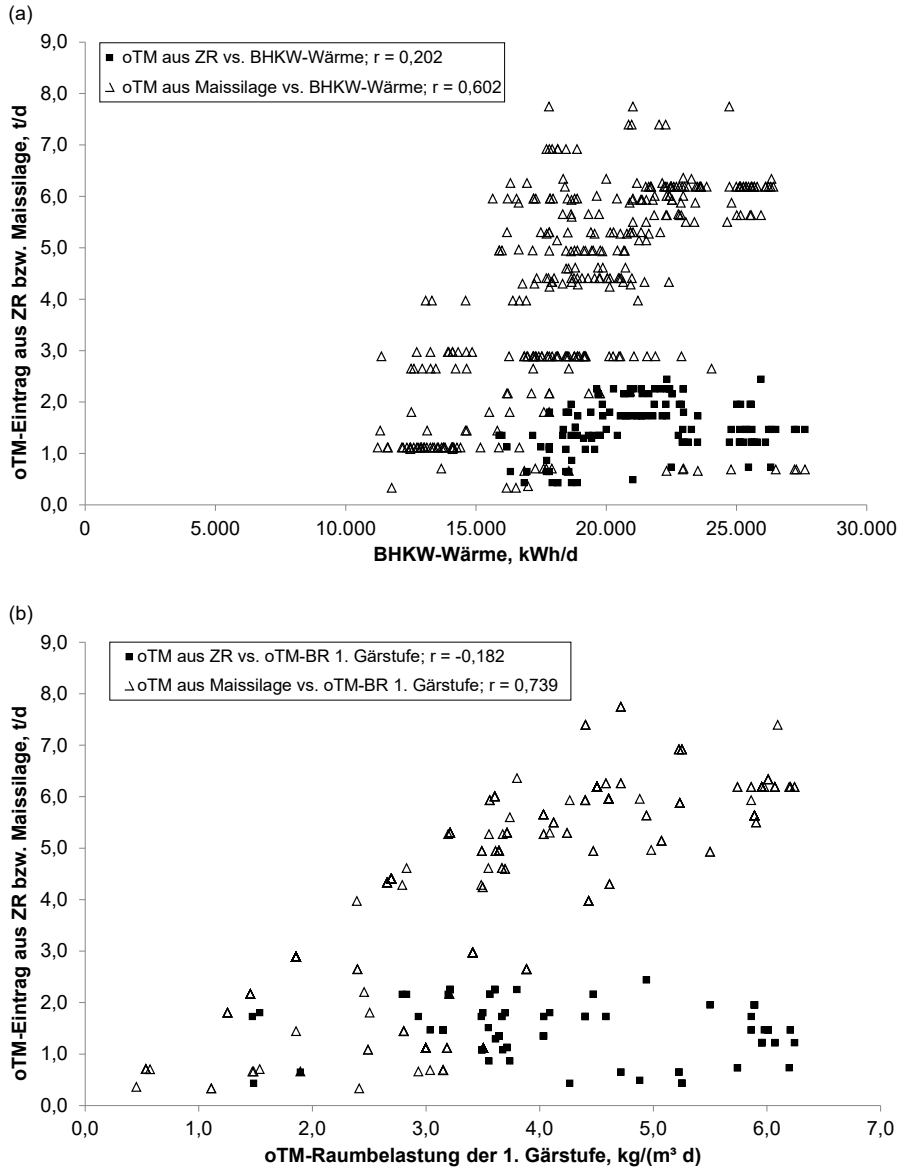

Abb. 10: Zusammenhang zwischen Einsatzstoffauswahl und saisonaler Flexibilisierung für PB08: Täglicher Eintrag von oTM aus ZR und Maissilage versus (a) Wärmeerzeugung des BHKW bzw. (b) oTM-Raumbelastung der 1. Gärstufe; Angabe der Korrelationskoeffizienten in der Legende.

Für die Beurteilung der Gärbiologie wurde der zeitliche Untersuchungsrahmen ausgeweitet. Der Blick auf die Summenparameter organische Säuren („Essigsäureäquivalent“) und FOS/TAC in Proben aus den beiden Hauptgärbehältern zeigt im Jahr vor Beginn des Einsatzes von ZR, als die Anlage bei im Wesentlichen gleichbleibender Raumbelastung nur mit Mais- und Grassilage beschickt wurde (Vgl. Abb. 8), erkennbaren Stress auf der Gärbiologie: in Proben aus den beiden Hauptgärbehältern lagen die gemessenen FOS/TAC Werte teilweise deutlich über der gängigen Warnschwelle von 0,3 und die Konzentration an organischen Säuren (OS) war leicht erhöht (Warnschwelle: 4.000 mg/L; Abb. 11).

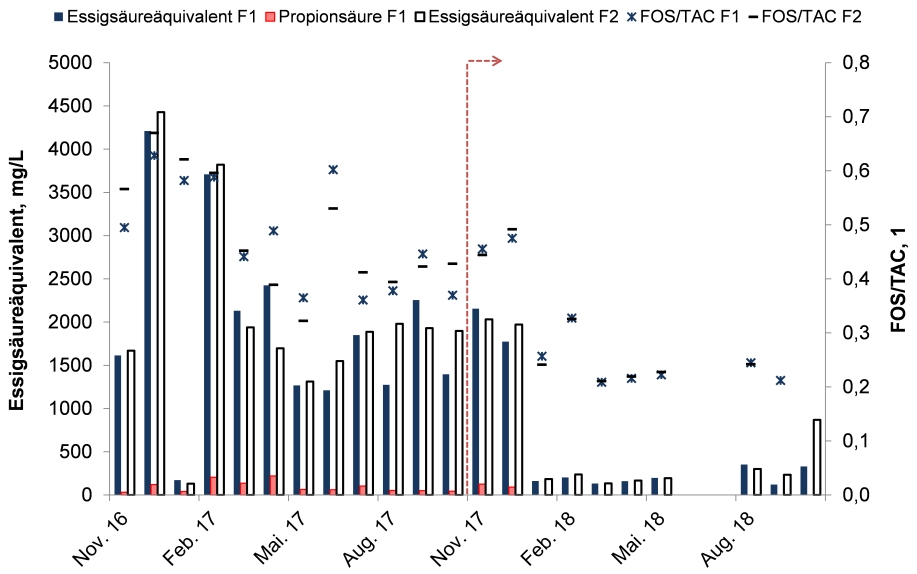

Abb. 11: In Proben aus den beiden Fermentern von PB08 gemessene FOS/TAC-Werte sowie Konzentrationen an organischen Säuren im Beobachtungszeitraum und im Jahr davor; die rot gestrichelte Linie markiert den Zeitpunkt, ab dem erstmals ZR eingesetzt wurden.

Zwei Monate nach Beginn des ZR-Einsatzes war das Niveau der OS-Konzentration um etwa den Faktor 10 gesunken, Propionsäure war nicht mehr nachweisbar (in Abb. 11 nur für Fermenter 1 dargestellt) und auch die FOS/TAC-Werte deuteten auf eine nicht annähernd ausgelastete Gärbiologie hin. Dieser deutliche Rückgang der Prozessindikatoren auf ein völlig unkritisches Niveau fällt mit dem Maximum der Raumbelastung im Februar und März 2018 im Zuge der Wärme geführten Betriebsweise der Anlage zusammen (Abb. 12).

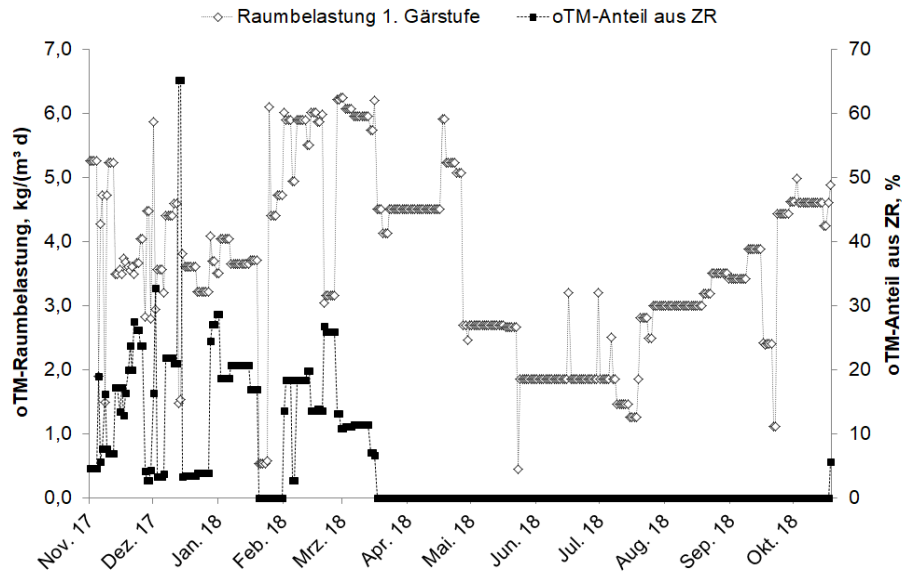

Abb. 12: Verlauf der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe und des oTM-Anteils aus ZR für PB08 im Beobachtungszeitraum.

Der Befund für die gärbiologischen Prozessindikatoren lässt sich also allein auf Basis der oTM-Raumbelastung nicht erklären. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass sich aufgrund der einseitigen, Mais betonten Fütterung von PB08 im Jahr vor dem

Beobachtungszeitraum mit ZR-Einsatz ein Mangel an Spurenelementen / Mikronährstoffen im Gärgemisch entwickelt hat. Dieser äußert sich typischer Weise in einer schleichenden Hemmung der syntrophen Methanbildung, erkennbar an steigenden Konzentrationen organischer Säuren [14]. Zuckerrübe weist als Ackerkultur einen insgesamt höheren und teilweise abweichenden Bedarf an Spurenelementen im Vergleich zu Mais auf [15]. Mit dem Einsatz von ZR und dem zusätzlichen Eintrag von restlichem Erdanhang könnte der Mangel an Mikronährstoffen im Gärgemisch aufgefüllt und damit die Hemmwirkung auf den anaeroben Abbauprozess aufgehoben worden sein.

PB08 war bereits Teilnehmer an mehreren vorhergehenden Messprogrammen, so dass umfangreiche Zeitreihen für den Betrieb ohne Einsatz von ZR verfügbar sind. Allerdings wurde die Anlage über die Jahre schrittweise ausgebaut: die installierte elektrische BHKW-Leistung wurde von 690 kW Anfang 2014 auf aktuell 1.150 kW gesteigert; das Fassungsvolumen des Fermentersystems blieb in diesem Zeitraum zwar gleich, jedoch wurde die Behälterkapazität mit Anschluss an die Gaserfassung durch Neubau eines zweiten Gärrestlagers von 8.400 auf 12.500 m³ vergrößert. Es ist folglich nicht möglich, die Effekte des ZR-Einsatzes unter *ceteris paribus* Bedingungen zu beurteilen.

4.1.2 Betriebsverlauf für PB22

Während des Beobachtungszeitraums von 1095 Tagen wurden ZR in PB22 jeweils im Winter 2014/'15, 2016/'17 und 2017/'18 eingesetzt, nicht jedoch im Winter 2015/'16 (Abb. 13). Offensichtlich wurden in dieser Anlage ZR im anteiligen Austausch mit Maissilage eingesetzt.

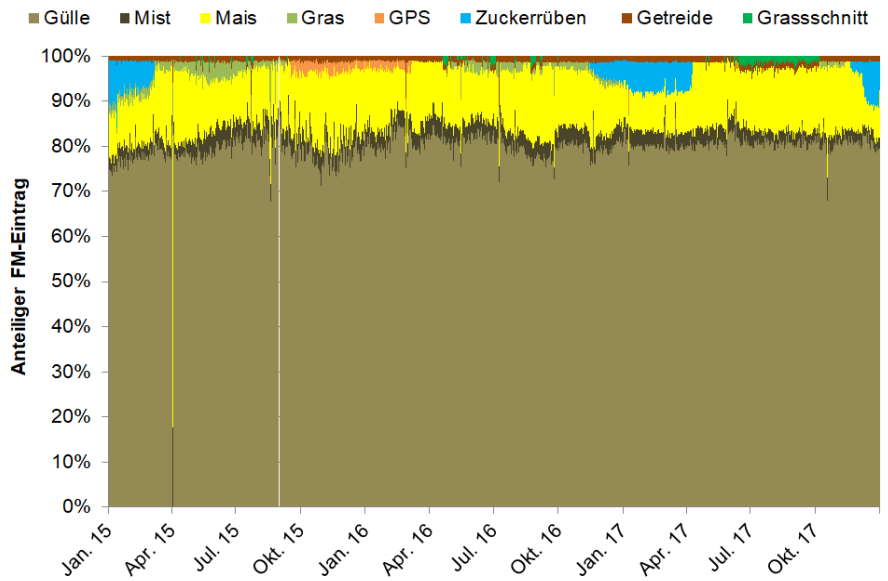

Abb. 13: Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix von PB22 in täglicher Auflösung.

Insgesamt wurden ZR an 253 Tagen, also in weniger als einem Viertel der Zeit gefüttert. Sowohl bezogen auf den zeitlichen als auch auf den mengenmäßigen Umfang war damit der Anteil von ZR bei PB22 im Vergleich der fünf untersuchten Anlagen mit Abstand am niedrigsten (Vergleiche auch Tab. 11). Allerdings handelt es sich bei PB22 um eine sogenannte „Gülleanlage", bei welcher mehr als 80 % der eingesetzten FM aus Gülle und Mist von Rindern bestehen.

Das Verfahrenskonzept setzt auf eine Minimierung des Bedarfs an Stellfläche für die Biogasanlage, indem die Fermenter ähnlich einem Hochsilo und mit kurzer Verweilzeit dimensioniert werden. Die eigentliche „Ausgärung“ erfolgt im nachgeschalteten Gärrestlager 1 mit Gaserfassung. Dieses Gärrestlager stellt für die Typisierung einen Grenzfall dar, weil es wärmegedämmt ist und die Temperatur im Gärgemisch im Jahresmittel ca. 40 °C beträgt: dies sind eher Eigenschaften eines Nachgärbehälters. Im Folgenden werden daher die verfahrenstechnischen Kennwerte gegebenenfalls mit und ohne Einbezug des Fassungsvolumens dieses Behälters angegeben.

Die kompakten Hochfermenter werden mit einer oTM-Raumbelastung auf einem Niveau von etwa 10 bis 15 kg/(m³ d) betrieben. Während der Verlauf der Raumbelastung im Allgemeinen keine saisonale Abhängigkeit erkennen lässt, sind die „Höcker“ im Spätsommer 2016 und 2017 auffällig (Abb. 14).

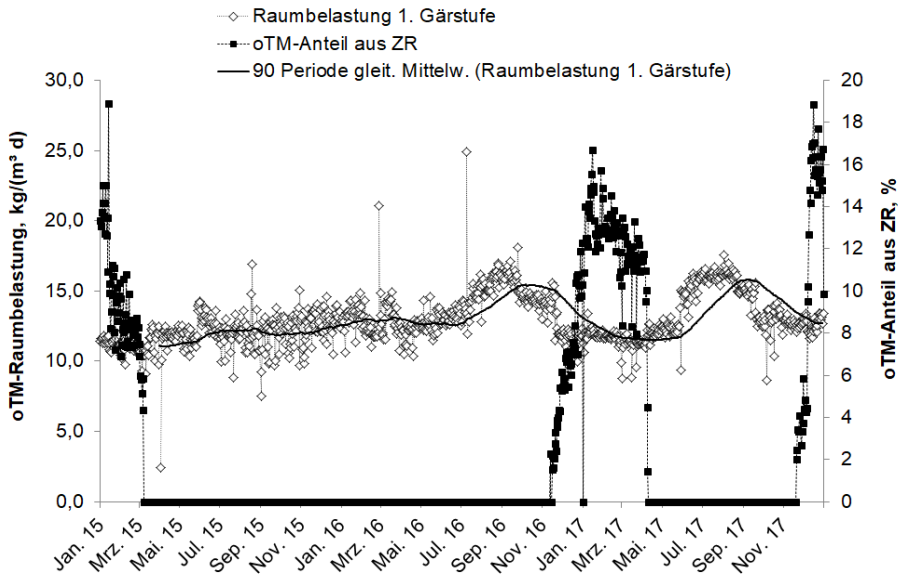

Abb. 14: Verlauf der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe und des oTM-Anteils aus ZR (tägliche Auflösung) für PB22 im Beobachtungszeitraum.

Es ist davon auszugehen, dass hiermit dem höheren Wärmeabsatz im Hinblick auf die bevorstehende kältere Jahreszeit begegnet werden sollte. Da die Kompaktfermenter mit etwa zehn Tagen eine sehr kurze Verweilzeit aufweisen, muss deren Raumbelastung relativ stark erhöht werden, um die gesamte Kaskade mit oTS zu beladen. Eine Korrelation der Raumbelastung mit dem Wärmeabsatz war jedoch nicht erkennbar (Abb. 15).

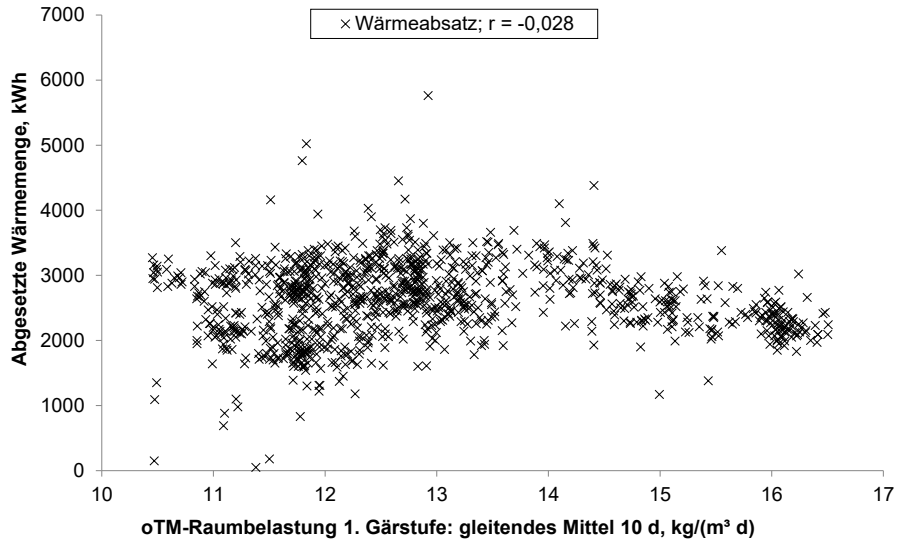

Abb. 15: Zusammenhang zwischen oTM-Raumbelastung (gleitendes Mittel über zehn Tage) und Wärmeabsatz; Angabe des lin. Korrelationskoeffizienten in der Legende.

Angesichts der kurzen Verweilzeit in den Hochfermentern nannte der Betreiber von PB22 als Grund für den Einsatz von ZR, dass es sich hierbei um ein rasch abbaubares Substrat handle. Allerdings erscheint das Verfahrenskonzept in dieser Hinsicht nicht stringent, da 80 % der eingesetzten Frischmasse aus Rindergülle und –mist bestehen (Vergleiche Abb. 31) – beides Einsatzstoffe mit hohen Anteilen an „schwer“ abbaubarer oTS. Für eine „Gülleanlage“ ebenfalls ungewöhnlich ist die Tatsache, dass zur Ergänzung von „Spurenelementen“ durchgängig ein Gärhilfsstoff eingesetzt wurde.

Obwohl beide Kompaktfermenter parallel betrieben, d. h. gleich beschickt wurden, wiesen die chemischen Prozessindikatoren zeitweise deutliche Unterschiede in der Belastung der Gärbiologie aus. In Proben aus Fermenter 2 traten im Mai 2016 und Juni 2018 deutliche Sprünge bei den Konzentrationswerten der OS auf; in Proben aus Fermenter 1 waren diese zwar parallel erkennbar, jedoch deutlich schwächer ausgeprägt (Abb. 16). Insgesamt waren die Medianwerte der Konzentration flüchtiger OS in Proben aus F2 wesentlich höher als in Proben aus F1 – insbesondere für *iso*-Buttersäure (Tab. 6).

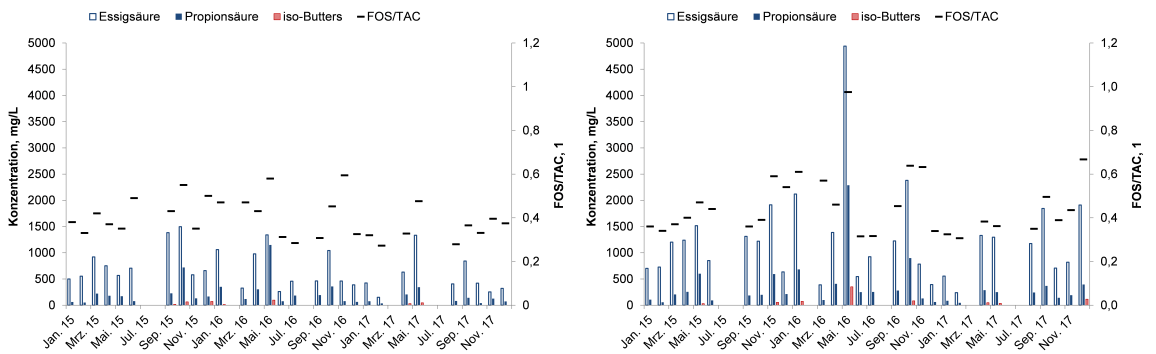

Abb. 16: In Proben aus Fermenter 1 (links) und Fermenter 2 (rechts) von PB22 gemessene Konzentrationswerte von OS und FOS/TAC-Werte im Beobachtungszeitraum.

Dieser Unterschied zwischen den beiden Fermentern war im Übrigen bereits während eines vorhergehenden Forschungsprojekts aufgefallen [16]. Eine mögliche Ursache könnte in der Temperatursteuerung liegen. Wie Tab. 6 zeigt, lag zwar die mittlere Temperatur in F2 nur geringfügig höher als in F1, sie schwankte jedoch stärker und insbesondere überschritt die gemessene Prozesstemperatur in F2 wesentlich häufiger den Wert von 55 °C. Dieser Temperaturwert wurde in der Literatur als Schwelle beschrieben, bei deren Überschreiten typischer Weise eine deutliche Verschiebung in der Zusammensetzung der Mikroorganismenpopulation auftritt, was zu einem vorübergehenden Einbruch der syntrophen Methanbildung und damit einer Anreicherung von OS führt [17].

Tab. 6: Statistische Kennwerte zu gemessenen Prozesstemperaturen (tägliche Ablesung) und chemischen Indikatoren (Anzahl der Probenahmen = 29) in den beiden Fermentern von PB22 im Beobachtungszeitraum.

	Fermenter 1	**Fermenter 2**
Mittlere Temperatur, °C	53,8	54,2
Standardabweichung der Temp., °C	0,6	0,8
Überschreitungshäufigkeit für 55 °C, 1	0,07	0,26
Medianwert FOS/TAC, 1	0,37	0,40
Medianwert Essigsäure-Konz., mg/L	567	979
Medianwert Propionsäure-Konz., mg/L	142	244
Anteil der Proben mit Nachweis von iso-Buttersäure, 1	7/29	8/29
Medianwert iso-Buttersäure, mg/L	45	64
Medianwert TS-Gehalt, %	9,0	9,2

Aufgrund der lediglich einmal monatlichen Probenahme ist eine verlässliche statistische Prüfung des direkten Einflusses der Fermentertemperatur auf die Prozessindikatoren nicht möglich. Betrachtet man die gemessene Konzentration von Propionsäure in Proben aus den beiden Gärbehältern gegenüber dem gleitenden Mittelwert der Fermentertemperatur über zehn Tage vor Probename, so deutet sich in F2 im Gegensatz zu F1 zumindest eine schwache positive Korrelation zwischen diesen beiden Größen an (Abb. 17).

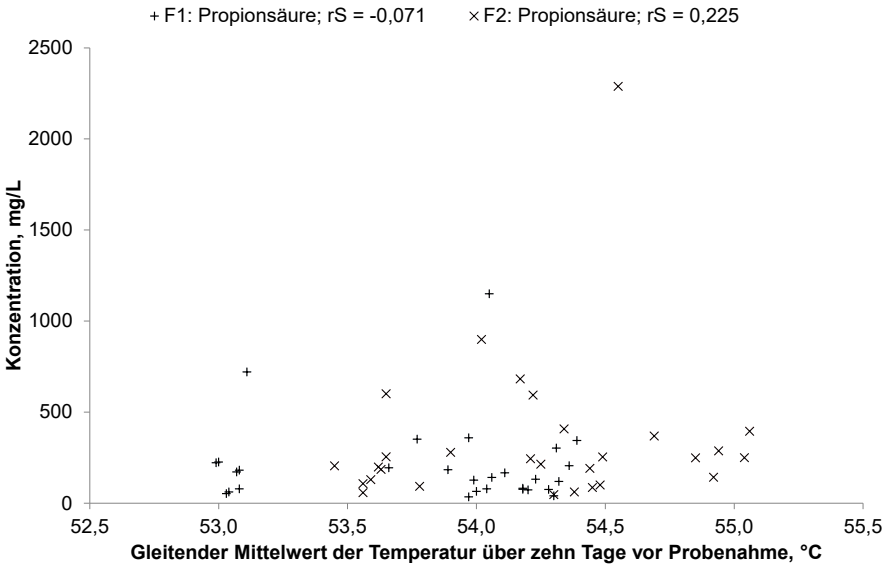

Abb. 17: In Proben aus den Fermentern von PB22 gemessene Konzentration an Propionsäure vs. gleitender Mittelwert der Fermentertemperatur über zehn Tage vor Probenahme; Angabe des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten in der Legende.

Ursache für die (leichte) Hemmung der syntrophen Methanbildung in den Hochfermentern könnte auch sein, dass die kontinuierliche hydraulische Durchmischung der Hochfermenter zu intensiv ist und deshalb die Syntrophie der Wasserstoff bildenden und verwertenden Mikroorganismen-Gesellschaften stört. Mit dieser Hypothese lassen sich allerdings nicht die Unterschiede zwischen den beiden Fermentern erklären. Eventuelle Auswirkungen des Einsatzes von ZR auf die Gärbiologie von PB22 sind in Anbetracht des geringen FM-Anteils aus ZR und der Tatsache, dass zusätzlich Spurenelemente supplementiert wurden, weder zu erwarten noch verlässlich überprüfbar.

Für PB22 stehen Zeitreihen aus einer vorhergehenden Teilnahme am Biogas-Monitoring der LfL zur Verfügung [16]. Der ZR-Anteil an der eingetragenen Frischmasse wurde zwar gegenüber damals in etwa verdoppelt, ist jedoch absolut gesehen auf sehr niedrigem Niveau (Vergleiche Abb. 31). Eventuelle Effekte des ZR-Einsatzes auf einzelne verfahrenstechnische Kennwerte sind daher im Monitoring nicht erkennbar. Bemerkenswert ist allerdings die laut „Biogas Doc" gegenüber dem Ergebnis für 2014 deutlich verringerte relative Biogasausbeute (Vergleiche Abschnitt 4.3): diese nahm von 123 % („sehr gut") auf 97 % („ausreichend") ab. Hierfür lassen sich zwei wahrscheinliche Ursachen anführen. Zum einen wurde die tägliche FM-Zufuhr in die Anlage im Mittel um etwa 19 % erhöht; die mittlere hydraulische Verweilzeit im Fermentersytem errechnete sich für den jüngsten Beobachtungszeitraum somit zu lediglich 73 d – ohne Berücksichtigung der Gärrestentnahme aus „Gärrestlager 1". Gleichzeitig erhöhte sich die oTM-Raumbelastung des Fermentersystems um knapp 29 % auf 1,8 kg/(m³ d). Offenbar war mit diesen Kennwerten in der Anlage kein vollständiger Abbau der organischen Substanz mehr gewährleistet. Zu dem verringerten Abbaugrad trug möglicherweise die oben beschriebene Beeinträchtigung der Gärbiologie in Fermenter 2 bei.

4.1.3 Betriebsverlauf für PB25

Während des Beobachtungszeitraums von 700 Tagen wurden ZR in PB25 an insgesamt 279 Tagen eingesetzt, was einem zeitlichen Anteil von 40 % entspricht (Vergleiche Tab.

11). Im Unterschied zu PB08, welche etwa denselben zeitlichen Anteil mit ZR-Einsatz aufwies, wurden ZR in PB25 in veränderlichen Anteilen allerdings während 20 von 23 Monaten eingesetzt: lediglich im Mai und September 2016 sowie im August 2017 wurden überhaupt keine ZR gefüttert (Abb. 18). Am Gülleanteil von durchgängig 32 bis 35 % ist erkennbar, dass PB25 den „Güllebonus“ realisiert.

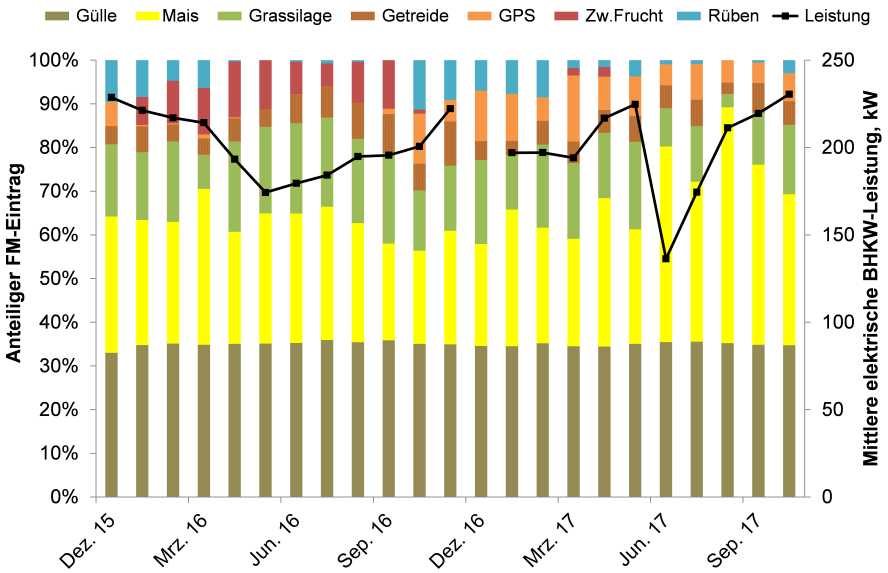

Abb. 18: Verlauf der FM-Anteile der einzelnen Substrate am Einsatzstoffmix und der mittleren elektrischen BHKW-Leistung von PB25 in monatlicher Auflösung; im Dez. 2016 waren keine Leistungswerte verfügbar.

Der Eintrag von ZR war während der kalten Jahreszeit jeweils wesentlich höher als in den Sommermonaten. Dies deckt sich mit der Aussage des Betreibers von PB25, dieses Substrat im Zuge einer saisonalen, Wärme geführten Flexibilisierung einzusetzen. Die verringerte Leistungsabgabe des BHKW in den Sommermonaten ist bei PB25 allerdings weniger deutlich ausgeprägt als bei PB08. Da für die Anlage keine Zeitreihen zum Wärmeabsatz verfügbar sind, wird die elektrische BHKW-Leistung betrachtet, um die Betriebsstrategie nachzuvollziehen: diese variierte im Monatsmittel von 136 bis 231 kW.

Für die Überprüfung des gezielten Einsatzes von Zuckerrüben sollen die folgenden Hypothesen gelten:

(1) Es zeigt sich eine positive Korrelation zwischen dem oTM-Eintrag aus ZR und der elektrischen BHKW-Leistung;
(2) Diese Korrelation ist für ZR stärker ausgeprägt, als für die übrigen Einsatzstoffe, die in veränderlichen Anteilen gefüttert werden.

In Abb. 19 zeigt sich tatsächlich eine stärkere positive Korrelation nach (1) für ZR als für Maissilage, Grassilage oder Getreidekorn/-GPS. Was den gezielten Austausch eines bestimmten Substrats durch ZR betrifft, so kann allenfalls für Getreidekorn eine sehr schwache negative und für Getreide-GPS eine schwache positive Korrelation festgestellt werden (Tab. 7). Zusammenfassend kann damit konstatiert werden, dass in PB25 vorrangig ZR gezielt dafür eingesetzt wurden, um die BHKW-Leistung saisonal zu erhöhen und dass während dieser Phasen vor allem Getreidekorn eingespart wurde.

Tab. 7: Anteiliger Eintrag von oTM aus ZR vs. Grassilage, Maissilage, Getreidekorn und Getreidekorn/-GPS: Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizienten auf Basis von Monatsmittelwerten.

	Maissilage	Grassilage	Getreide	GPS
anteiliger oTM-Eintrag aus ZR vs.	-0,047	0	-0,21	0,37

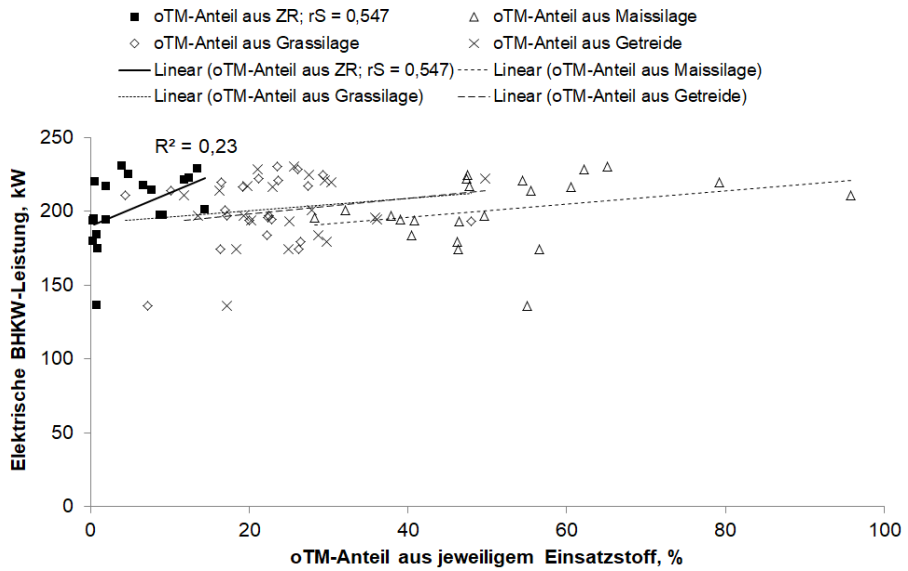

Abb. 19: Zusammenhang zwischen Einsatzstoffauswahl und saisonaler Flexibilisierung für PB25 auf Basis von Monatsmittelwerten: Anteiliger Eintrag von oTM aus ZR, Grassilage, Maissilage und Getreide(-GPS) vs. elektrische BHKW-Leistung; für ZR: Angabe des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten in der Legende.

Das Vergärungsverfahren dieser Biogasanlage ist wegen der Hydrolysegrube als zweiphasig-vierstufig zu charakterisieren (Vergleiche Abb. 3). Das Verfahren wurde ursprünglich auf die Vergärung von Getreidebrei ausgelegt und die Hydrolysegrube war zur Atmosphäre hin offen ausgeführt. Da dies aus Sicht des Immissionsschutzes bedenklich ist, wurde der Behälter im Mai 2015 an die Gaserfassung angeschlossen.

Die mittlere oTM-Raumbelastung der Biogasanlage von PB25 trifft mit 6,0 kg/(m³ d) für den Hauptfermenter bzw. 3,0 kg/(m³ d) für das gesamte Fermentationsvolumen in etwa das durchschnittliche Niveau der Anlagen im bundesweiten Biogas-Messprogramm III [8]. Die Werte der chemischen Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptfermenter waren im Wesentlichen unauffällig (Abb. 20). Die einzige Ausnahme bildete eine deutlich erhöhte Essigsäurekonzentration in der Probe vom August 2017: diese war vermutlich eine Folge der Umstellung auf eine Rezirkulation von Gärgemisch aus dem Nachgärbehälter in den Hauptgärer im Vormonat.

Für die Konzentration an OS in Proben aus dem Hauptfermenter war auch keine Abhängigkeit von der Raumbelastung erkennbar. Die Vorvergärungsstufe hat hier offenbar einen ausgleichenden Effekt, so dass die Variation in der Substratauswahl bei PB25 gärbiologisch überhaupt kein Problem darstellte. Mit zu berücksichtigen ist dabei freilich der Gülleanteil von etwa einem Drittel, für den man typischer Weise keine zweiphasige Verfahrensführung vorsehen würde.

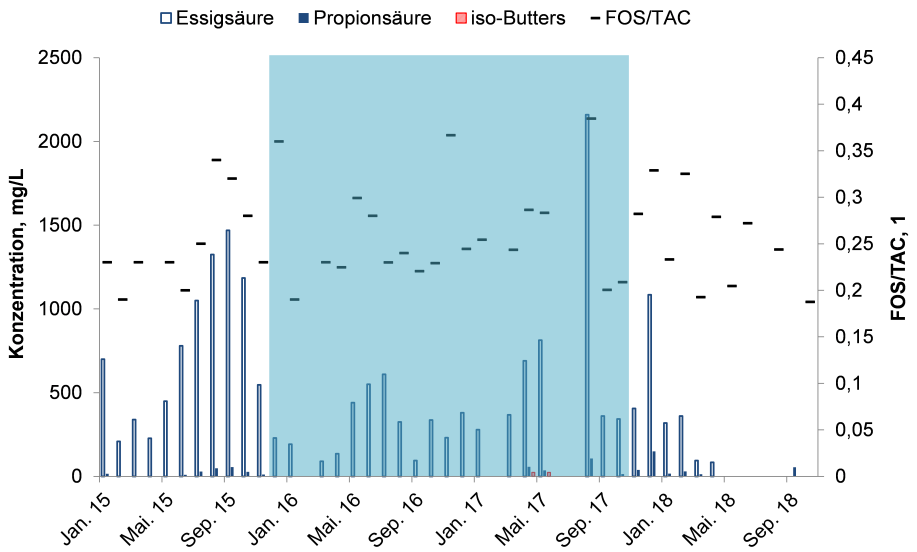

Abb. 20: In Proben aus dem Hauptfermenter von PB25 gemessene Konzentrationswerte von OS und FOS/TAC-Werte im Zeitraum Januar 2015 bis Oktober 2018; Beobachtungszeitraum für die Beurteilung des ZR-Einsatzes farbig hinterlegt.

Gesicherte Aussagen zu Effekten des ZR-Einsatzes auf einzelne verfahrenstechnische Kennwerte können für die Biogasanlage von PB25 auf der verfügbaren Datenbasis nicht getroffen werden: wie bei PB22 liegen zwar Zeitreihen aus einem vorhergehenden Monitoring vor, die Unterschiede im Einsatzstoffmix sind jedoch gering (Abb. 31).

4.1.4 Betriebsverlauf für PB27

Der zeitliche Anteil der ZR-Fütterung war mit 679 von 730 Tagen für PB27 von den untersuchten Anlagen mit Abstand der höchste. Im Vergleich zu PB28 war für PB27 der mittlere FM-Anteil mit 23 % etwas höher, der mittlere oTS-Anteil von ZR jedoch nur knapp halb so hoch (Vergleiche Tab. 11). Dies liegt darin begründet, dass PB27 – im Gegensatz zu den übrigen Anlagen – die Rüben nicht im Ganzen lagert, sondern einen Zuckerrübenbrei erzeugt und einlagert (Vergleiche Tab. 2 und Tab. 12).

Verfahrenstechnisch entspricht das Grundkonzept der Anlage von PB27 demjenigen von PB25, da es vom selben Anbieter stammt; allerdings weist der Hauptgärbehälter (HG) das doppelte Arbeitsvolumen auf und diesem sind zwei Hydrolysegruben in Reihe vorgeschaltet. Die beiden Festbettreaktoren (FB) zur „Nachgärung“ sind für eine landwirtschaftliche Biogasanlage außergewöhnlich und können in dieser Bauform nur betrieben werden, da mit Mais- und Weizenkörnern sowie ZR zu etwa 70 % sehr faserarme Einsatzstoffe als Suspension eingetragen werden (Vergleiche Abb. 31). Da zudem überhaupt keine Gülle eingesetzt wird, ist eine zweiphasige Verfahrensführung hier erforderlich, um eine „Versäuerung“, d. h. die Hemmung der syntrophen Methanbildung durch zu hohe Konzentrationen an flüchtigen OS im Hauptgärbehälter zu verhindern.

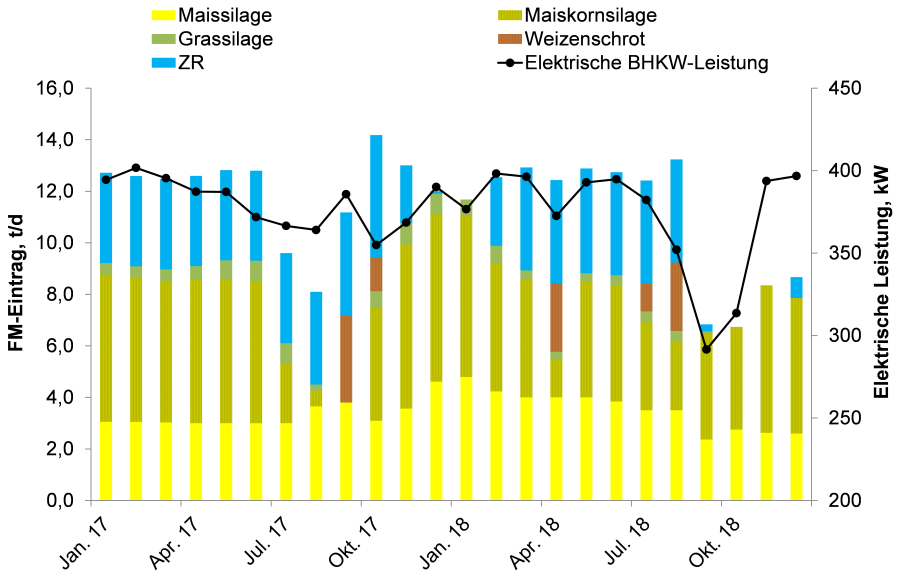

Abb. 21: Verlauf der Monatsmittelwerte für den FM-Eintrag der einzelnen Substrate und der elektrischen BHKW-Leistung für PB27.

Der Betreiber gab an, dass in der Vergangenheit aufgrund eines zu hohen Stickstoffeintrags häufig gärbiologische Probleme aufgetreten seien (Vergleichsdaten aus dieser Zeit sind für die Anlage nicht verfügbar). Mit der Verwertung von ZR wollte er solche Probleme abmildern bzw. vermeiden. Dieses Kalkül scheint zunächst aufgegangen zu sein, da die Konzentrationswerte für OS als gängige Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptfermenter und dem Festbettreaktor 2 bis in den Herbst 2018 durchgängig stabile Verhältnisse zeigten (Tab. 8; Festbettreaktor 1 wurde nicht beprobt).

Tab. 8: Kennwerte zu chemischen Prozessindikatoren in allen verfügbaren Proben aus dem Hauptfermenter und dem Festbettreaktor 2 von PB27.

	Hauptfermenter	**Festbettreaktor 2**
Anzahl der Probenahmen, 1	23	22
Essigsäure: Medianwert, mg/L	372	138
~: MIN / MAX, mg/L	259 / 787	61 / 679
Propionsäure: Medianwert, mg/L	62	0
~: MIN / MAX, mg/L	37 / 618	n.n. / 2.686
pH: Medianwert, 1	8,1	8,2
TAN: Medianwert, mg/L	5.348	5.481
~: MIN / MAX, mg/L	3.855 / 5.667	3. 920 / 5.890
FOS/TAC: Medianwert, 1	0,24	0,22

n.n.: nicht nachweisbar.

Zum Ende des Sommers 2018 kam es dann allerdings zu einer Anreicherung der OS und zu einem ungünstigen Verhältnis zwischen Essig- und Propionsäure. Daraufhin wurde die Fütterung deutlich reduziert und die Zuckerrübe ab Oktober 2018 ganz aus der Futtermischung herausgenommen. Der Anteil von Maiskornsilage an der gesamten

Eintragsmenge verdreifachte sich dadurch auf 60 %. Ein weiterer starker Anstieg des Gehalts an OS konnte dennoch zunächst nicht verhindert werden. Die letzten Analysen der Gärbehälterproben ergaben, dass die Propionsäuregehalte im Oktober 2018 sowohl im Hauptfermenter als auch im Festbettreaktor 2 auf rund 2.400 mg/l angestiegen waren. Da die Beprobung im Oktober 2018 beendet wurde, kann anhand des Säurespektrums eine Verbesserung der Verhältnisse nicht nachgewiesen werden (Abb. 22).

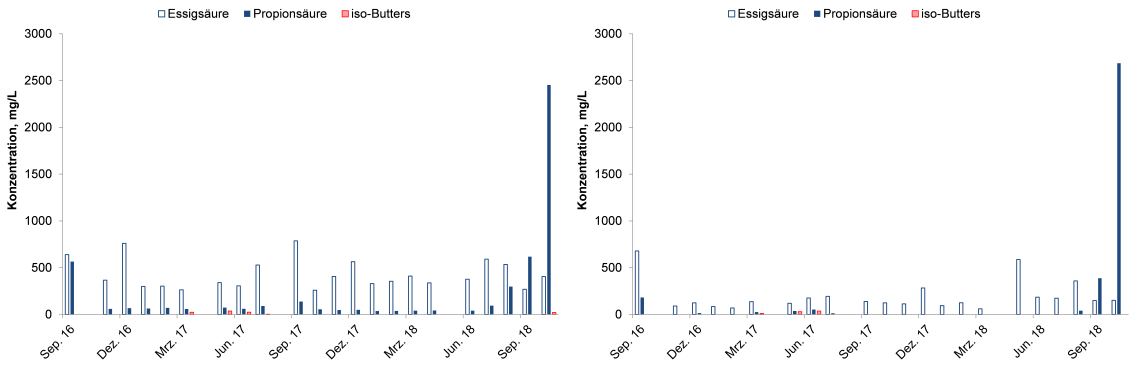

Abb. 22: Verlauf der Konzentrationswerte von OS in Proben aus dem Hauptgärbehälter (links) und dem Festbettreaktor 2 (rechts) von PB27.

Anhand der bis Ende Dezember vorliegenden Leistungsdaten des BHKW ist jedoch davon auszugehen, dass sich das biologische System wieder erholte: in Abb. 23 ist im November 2018 ein rascher Anstieg der elektrischen BHKW-Leistung auf das Ausgangsniveau zu erkennen. Da gleichzeitig die Raumbelastung nur ca. 80 % derjenigen vor dem Leistungseinbruch betrug, muss in dieser Phase im Gärgemisch vorhandene Biomasse mobilisiert worden sein, welche aufgrund der Prozesshemmung vorher nicht abgebaut werden konnte.

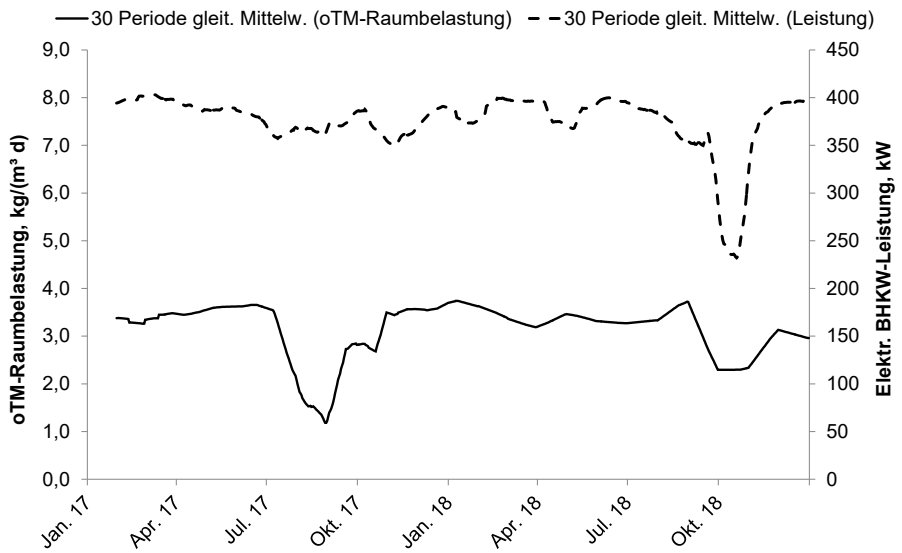

Abb. 23: Verlauf der oTM-Raumbelastung und der elektrischen BHKW-Leistung (jeweils gleitender Mittelwert über 30 d) für PB27.

Aus den gemessenen TAN-Werten in Proben aus dem HG berechnet sich bei einem pH-Wert von 8,1 und einer Prozesstemperatur von 44 °C ein Schwankungsbereich für die

Konzentration von Ammoniak im Gärgemisch von etwa 800 bis 1.200 mg/L. Auf diesem Niveau ist für eine nicht an erhöhte TAN-Konzentrationen angepasste Biozönose in der Regel mit einer erheblichen Hemmwirkung durch freien Ammoniak zu rechnen – welche wiederum zur Anreicherung von Propionsäure und anderen OS führt. Die hier vorliegende Biozönose ist aufgrund des langjährigen Betriebes mit Rohprotein betonter Fütterung an erhöhte TAN-Werte gut adaptiert. Da sich der TAN-Gehalt im August 2018, als die Gasproduktion zu sinken begann, auf einem für diese Anlage vergleichsweise niedrigen Niveau befand, ist eine Ammoniak bedingte Hemmung als alleinige Ursache für die Prozessdepression auszuschließen. Die genaue Ursache für die beobachtete Prozesshemmung kann also anhand der verfügbaren Daten nicht geklärt werden.

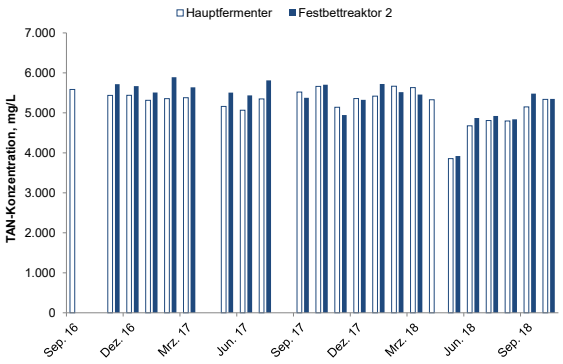

Abb. 24: Verlauf der TAN-Konzentration in Proben aus dem Hauptfermenter und dem Festbettreaktor 2 von PB27.

Da für PB27 keine Zeitreihen für einen Betrieb gänzlich ohne Einsatz von ZR vorliegen, können keine Aussagen zu den Effekten des ZR-Einsatzes auf verschiedene verfahrenstechnische Kennwerte getroffen werden. Im Anlagenvergleich fällt der hohe elektrische Energiebedarf für den Substrateintrag und das Rühren auf. Dieser resultiert in erster Linie aus der verfahrenstechnisch aufwändigen Gärkaskade. Zudem installierte der Betreiber während des Beobachtungszeitraums temporär eine Anlage zur Flüssigfütterung, wodurch der Strombedarf von Dezember 2017 bis August 2018 deutlich gesteigert wurde.

4.1.5 Betriebsverlauf für PB28

In PB28 wurden ZR während des Beobachtungszeitraums an etwa der Hälfte der Tage eingesetzt: jeweils in den Herbst- und Wintermonaten, wobei ZR quasi eins zu eins Maissilage ersetzten (Abb. 25). Der kumulierte FM-Anteil lag mit 21 % auf ähnlich hohem Niveau wie für PB27: damit erzielte PB28 insgesamt den höchsten kumulierten oTM-Anteil aus ZR, da die Rüben hier nicht wie in PB27 als Brei eingesetzt wurden (Vergleiche Tab. 11).

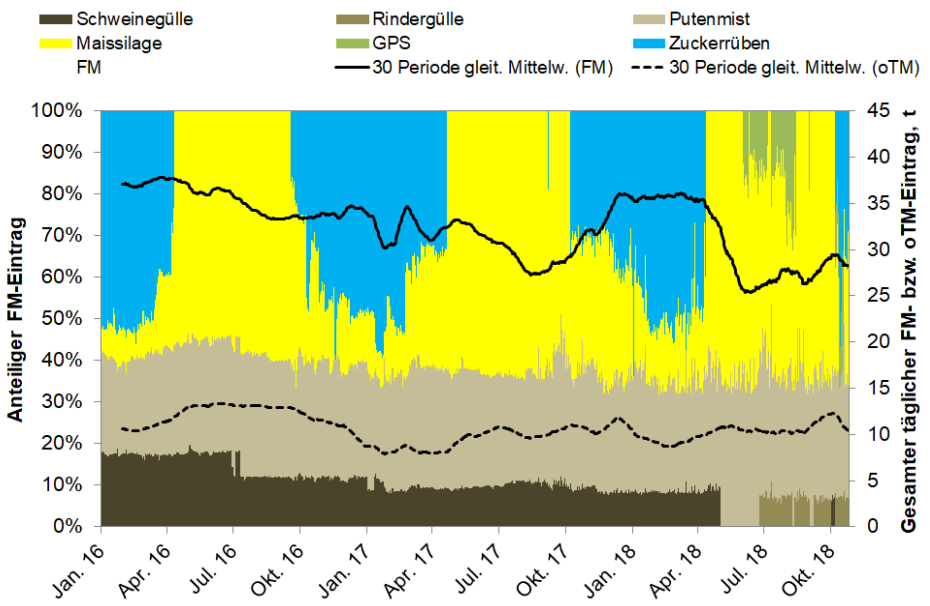

Abb. 25: Verlauf des Gesamteintrags an FM bzw. oTM (gleitender Mittelwert über 30 d) und der FM-Anteile der einzelnen Substrate (tägliche Auflösung) von PB28.

PB28 verwertete als einzige Anlage in diesem Vergleich Festmist als ein Hauptsubstrat: etwa 28 % der FM stammen aus Putenmist vom eigenen Mastbetrieb. Des Weiteren wurde im ersten halben Jahr der Beobachtung Schweinegülle mit einem FM-Anteil von 18 % eingesetzt. Im weiteren Verlauf wurde dieser Anteil auf ca. 10 % verringert und ab Juli 2018 wurde dann auf dem gleichen Niveau Rindergülle anstelle von Schweinegülle verwertet (Vergleiche Abb. 25). Laut Betreiber war es in der Vergangenheit durch die stickstoffreichen Einsatzstoffe Putenmist und Schweinegülle immer wieder zur Prozesshemmung durch Ammoniak gekommen. Dem sollte durch die Verwendung von Zuckerrüben begegnet werden, da diese vergleichsweise sehr arm an Rohprotein sind und durch ihren hohen Wassergehalt einen Verdünnungseffekt bewirken.

Verwertungsseitig realisiert der Betrieb die Flexibilitätsprämie und nutzt die erzeugte Wärme zur Beheizung der betriebseigenen Putenmastställe. Da Zeitreihen zur tatsächlichen Wärmenutzung nicht verfügbar sind, kann eine eventuelle Flexbilisierung nur anhand der Stromeinspeisung überprüft werden. Diesbezüglich deutet sich in Abb. 26 an, dass nach Installation des neuen BHKW ab Oktober 2017 in gewissem Umfang eine saisonale Flexibilisierung erfolgte: gegenüber dem Mittelwert für den Zeitraum Oktober 2017 bis Oktober 2018 von ca. 12.600 kWh war die tägliche Stromerzeugung in den Herbst- und Wintermonaten im Mittel um etwa 11 % höher und im Sommer um knapp 9 % niedriger.

Die oTM-Raumbelastung (Monatsmittel) für diese Biogasanlage ist für eine klassische Rührkesselkaskade mit einem Medianwert von 7,5 kg/(m³ d) vergleichsweise sehr hoch und wurde stark variiert: bis April 2017 von etwa 5,6 bis 9,6 kg/(m³ d), im weiteren Verlauf von etwa 6,2 bis 8,8 kg/(m³ d). Im Oktober 2016 reagierte der Betreiber auf die alarmierenden Werte einzelner gärbiologischer Prozessindikatoren mit einer stufenweisen Rücknahme der Fütterung. Die Gasbildungsrate brach jedoch erst im Januar 2017 ein, woraufhin die Fütterung noch weiter zurückgenommen wurde (Vergleiche Abb. 26 und Abb. 27). Dass daraufhin die Stromproduktion bei gleichbleibend niedriger Fütterungsrate schon bald wieder das Ausgangsniveau erreichte, lässt darauf schließen, dass aus den vorhergehenden Monaten noch eine große Menge Biomasse in den Gärbehältern gespeichert war, welche nun sukzessive umgesetzt wurde. Diese Vermutung wird gestützt durch die starke Abnahme

des TS-Gehaltes im Hauptgärbehälter (HG) von über 18 % in den Proben von August und September 2016 auf etwa 14,5 % in den Proben von November 2016 bis März 2017 (Abb. 27 rechts).

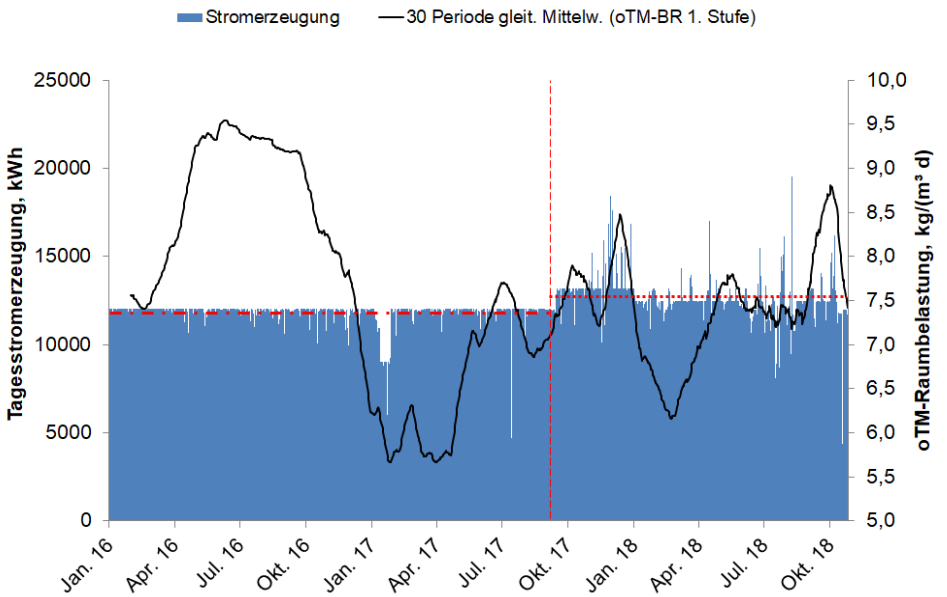

Abb. 26: Verlauf der Tagesstromerzeugung und der oTM-Raumbelastung der ersten Gärstufe (gleitender Mittelwert über 30 d) für PB28; die grob gestrichelte senkrechte Linie markiert die Inbetriebnahme des neuen BHKW, die waagrechte Linie links bzw. rechts davon den Mittelwert der Tagesstromerzeugung für das alte bzw. das neue BHKW).

Die gebräuchlichen gärbiologischen Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptgärbehälter von PB28 zeigten über den gesamten Beobachtungszeitraum ein sehr dynamisches Verhalten: Jeweils im späten Frühjahr und Sommer stieg die gemessene Konzentration von Propionsäure auf sehr hohe Werte an – begleitet vom Auftreten von iso-Buttersäure; jeweils im Herbst ging Propionsäure dann schlagartig zurück und war in den Proben aus den Wintermonaten vereinzelt nicht mehr nachweisbar – ebenso wie iso-Buttersäure (Vergleiche Abb. 27 links). Der Verlauf des TS-Gehaltes in Proben aus dem HG folgte tendenziell demjenigen der Propionsäure.

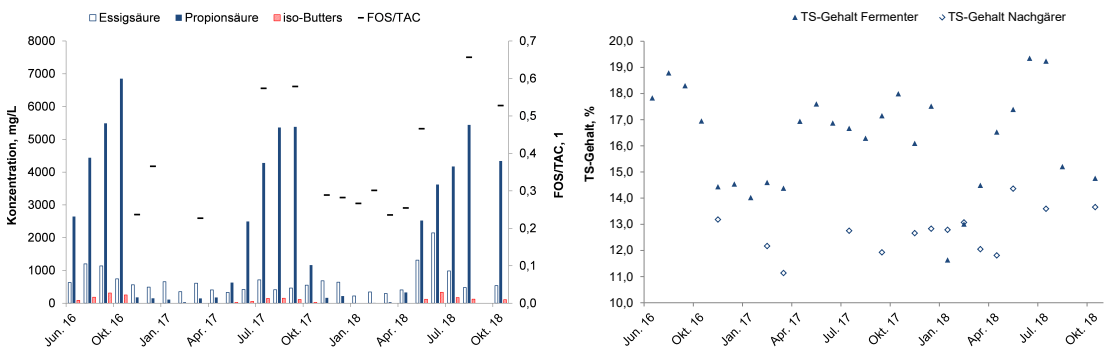

Abb. 27: Verlauf der Konzentration von OS und des FOS/TAC-Wertes in Proben aus dem Hauptgärbehälter (links) und des TS-Gehaltes in Proben aus beiden Gärbehältern (rechts) von PB28.

Konzentrationswerte von Propionsäure im oberen vierstelligen Bereich und das Auftreten von iso-Buttersäure zeigen typischer Weise eine starke Hemmung der syntrophen Methanbildung an – insbesondere bei gleichzeitig geringen bis moderaten Konzentrationen an Essigsäure. Zugleich wirkt Propionsäure oberhalb einer Konzentrationsschwelle von ca. 4.000 mg/L selbst stark hemmend auf den Abbauprozess [18].

Als mögliche Ursache für eine Hemmung kommt freies Ammoniak in Frage, da der Stickstoffeintrag in die Anlage hoch ist und die Prozesstemperatur im Hauptgärbehälter mit 48 °C am Übergang zum thermophilen Regime liegt. Als Schwelle für die beginnende Hemmwirkung auf eine nicht spezifisch an hohe TAN-Werte angepasste Biozönose gilt nach [19] eine Konzentration von ca. 0,7 g/L Ammoniak. Laut [14] können auch schon deutlich niedrigere Ammoniakkonzentrationen den Gärprozess hemmen. Wie Abb. 28 zeigt, lag die modellierte Ammoniakkonzentration im Hauptgärbehälter für die überwiegende Mehrzahl der Proben über 0,7 g/L.

Tab. 9: Kennwerte zu chemischen Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptfermenter von PB28.

	Minimum	**Median**	**Maximum**
pH, 1	7,8	8,1	8,3
TAN, mg/L	3.100	3.682	5.067
Ammoniak-N, mg/L*	488	1.025	1.492

*) berechnete Werte; n.n.: nicht nachweisbar.

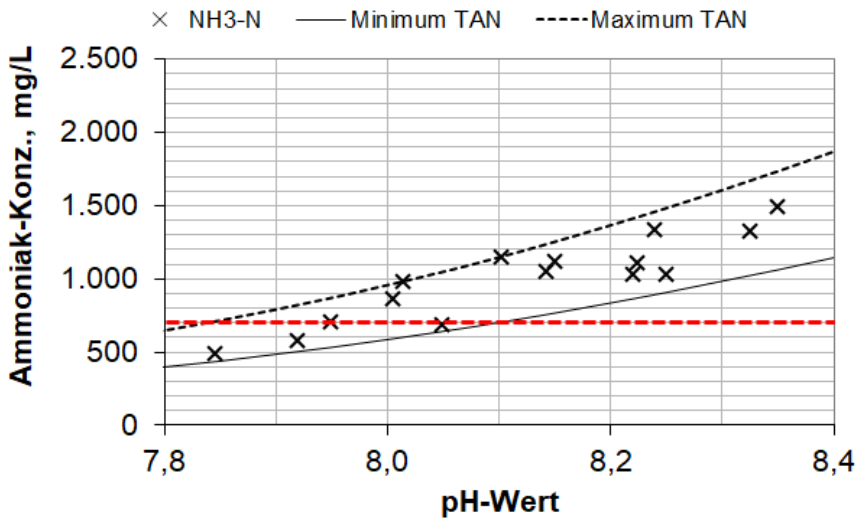

Abb. 28: Modellierte Konzentration an freiem Ammoniak im Gärgemisch des Hauptgärbehälters von PB28 bei 48 °C in Abhängigkeit vom pH-Wert.

Es ist zu bedenken, dass der Eintrag von Stickstoff in die Anlage hauptsächlich mit dem Putenmist erfolgt, dessen Eintragsrate über die Jahre wenig variiert (Vergleiche Abb. 25). Es ist daher anzunehmen, dass die Biozönose sehr gut an erhöhte TAN-Werte angepasst ist. Tatsächlich lässt sich auf Basis der verfügbaren chemischen Analysendaten keine signifikante Korrelation zwischen der TAN- bzw. NH_3-N-Konzentration und der

Propionsäurekonzentration erkennen (Tab. 10). Dies spricht gegen die Hypothese einer primär Ammoniak-bedingten Hemmung des Gärprozesses.

Tab. 10: Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizienten für einen linearen Zusammenhang zwischen der Propionsäurekonzentration und dem TAN- bzw. Ammoniak-N-Gehalt in Proben aus dem Hauptgärbehälter von PB28.

	TAN	**NH_3-N**
Propionsäure	0,11	0,36

Sehr auffällig ist hingegen, dass Phasen mit gärbiologischer Stabilisierung mit dem Einsatz von ZR zusammen zu fallen scheinen (Vergleiche Abb. 25 und Abb. 27). Betrachtet man die eingetragene Frischmasse an ZR gegenüber der beobachteten Propionsäurekonzentration in Proben aus dem Hauptgärbehälter, so zeigt sich eine sehr deutliche negative Korrelation des Niveaus der Propionsäurekonzentration mit der kumulierten eingetragenen FM aus ZR (Abb. 29 links). Deutlich negativ korreliert mit der eingetragenen FM aus ZR ist zudem der TS-Gehalt im HG (Abb. 29 rechts).

Es kann somit klar dokumentiert werden, dass während der Phasen mit ZR-Einsatz der Stress auf die Gärbiologie rasch abnahm. Anschließend, ungefähr nach Ablauf einer hydraulischen Verweilzeit im Hauptgärbehälter, nachdem die ZR wieder durch Maissilage ersetzt worden waren, baute sich die Stresssituation wieder auf und der TS-Gehalt stieg wieder deutlich an. Während eine zweifelsfreie Zuordnung von Ursache und Wirkung auf Grundlage der verfügbaren Daten aus dem Monitoring nicht möglich ist, lassen die oben ausgeführten Beobachtungen doch folgende Wirkungsketten plausibel erscheinen.

Wie oben erwähnt ist die Raumbelastung der Anlage für eine Rührkesselkaskade auf sehr hohem Niveau und die Hauptsubstrate Putenmist und Maissilage weisen hohe TS-Gehalte auf (Vergleiche Anhang). Indem ein Großteil der Maissilage vorübergehend durch ZR ersetzt wurde, kamen mehr Wasser und wesentlich weniger Rohfaser in die Anlage. Mit sinkendem TS-Gehalt wurden die Durchmischung und damit der Stoffaustausch im Hauptgärer deutlich verbessert: die Umsetzungsrate stieg, möglicherweise lokal erhöhte Konzentrationen von OS und Ammoniak wurden verdünnt, Propionsäure wurde abgebaut. Nach Rückkehr zum Fütterungsregime aus etwa 60 % Maissilage und 30 % Putenmist lief die Anlage dann rasch wieder in die Überlastung.

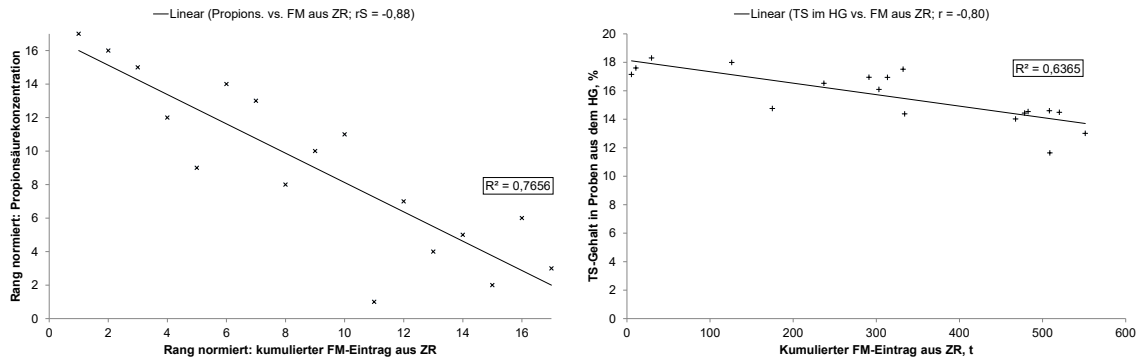

Abb. 29: Zusammenhang zwischen den normierten Ränge für den über 30 d vor Probenahme kumulierten FM-Eintrag aus ZR und der Propionsäurekonzentration (links) bzw. zwischen dem FM-Eintrag aus ZR und dem TS-Gehalt (rechts) in Proben aus dem Hauptgärbehälter von PB28.

Hauptursache für die vom Betreiber beklagten prozessbiologischen Störungen scheint somit weniger der hohe Stickstoffeintrag in die Anlage zu sein, sondern hauptsächlich die zu hohe oTM-Raumbelastung der Fermenterkaskade und ein daraus resultierender sehr unruhiger Anlagenbetrieb. Letzterer wird nochmals deutlich, wenn man die Verläufe der rechnerischen hydraulischen Verweilzeit und der (geschätzten) Biogasausbeute in Abb. 30 betrachtet. Im Winter war diese bei Fütterung von Schweinegülle (höchster Anteil in 2016) und ZR jeweils am kürzesten, im Sommer und Herbst bei Fütterung von 60 % Maissilage am längsten. Die Biogasausbeute aus der zugeführten oTM ging im Frühjahr 2016 mit steigender Raumbelastung stetig zurück (Vergleiche Abb. 25) und stieg dann im Zuge der deutlich verringerten Raumbelastung ab Oktober 2016 wieder an; das höchste Niveau erreichte diese dann jeweils während der Phasen mit ZR-Einsatz in den Wintermonaten.

Um Prozessstörungen zukünftig möglichst zu vermeiden, sollte das Niveau der oTM-Raumbelastung der Anlage insgesamt gesenkt und verstetigt sowie durch eine modifizierte Substratauswahl der TS-Gehalt im Gärgemisch verringert werden. Mit dem teilweisen Ersatz von Maissilage durch Roggen-GPS wurde dies im Sommer 2018 bereits ansatzweise versucht, zeitigte allerdings in Bezug auf den gärbiologischen Stress noch keinen eindeutigen Erfolg (Vergleiche Abb. 25 und Abb. 27).

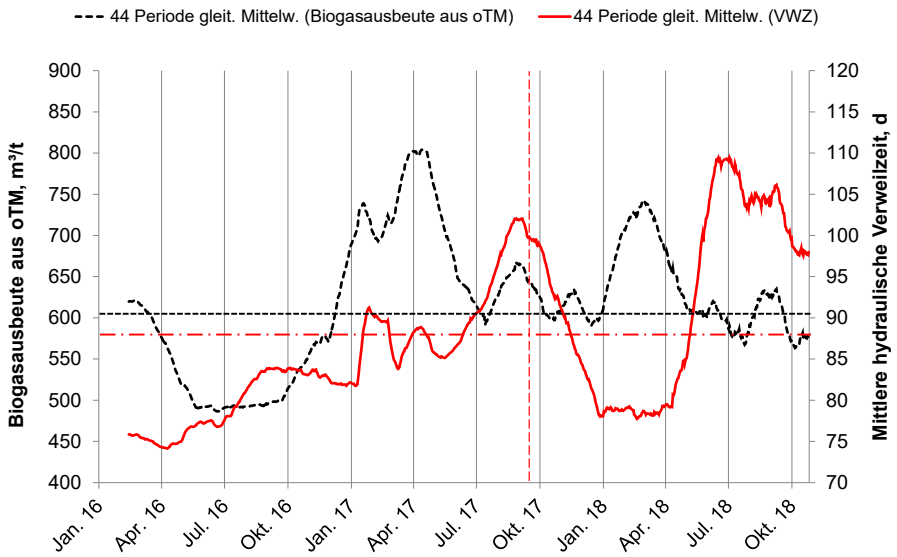

Abb. 30: Verlauf der Biogasausbeute aus der oTM und der rechnerischen hydraulischen Verweilzeit im Fermentersystem für PB28; waagrechte schwarz gestrichelte Linie: Mittelwert der Biogasausbeute; waagrechte rote Strichpunktlinie: Mittelwert der hydraulischen Verweilzeit; senkrechte rot gestrichelte Linie: Zeitpunkt der Inbetriebnahme des neuen BHKW mit Gasmengenmessung, davor wurde die Biogasausbeute rechnerisch geschätzt.

4.2 Rolle und Auswirkung von Zuckerrüben im Einsatzstoffmix

In Tab. 11 und Abb. 31 wurde zusammengefasst, welche Anteile am Gesamteintrag von FM bzw. oTM in die Biogasanlagen während des jeweiligen Beobachtungszeitraums aus ZR stammten. Die Anlagen unterschieden sich teilweise erheblich im Hinblick auf den zeitlichen Umfang des Einsatzes von ZR und noch wesentlich deutlicher in Bezug auf den Massenanteil von ZR im Einsatzstoffmix. Während Zuckerrübe in PB28 zeitweise Maissilage als Hauptsubstrat ablöste, wurde diese in PB22 und PB25 nur zu einem vergleichsweise kleinen Anteil gefüttert. PB27 mit seinem speziellen zweiphasig-mehrstufigen Anlagenkonzept verwertete einen extrem Kohlenhydrat betonten Einsatzstoffmix und erreichte im Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum den höchsten Anteil an ZR bezogen auf den FM-Eintrag, da ZR-Brei eingesetzt wurde. Den mit deutlichem Abstand höchsten oTM-Anteil am Einsatzstoffmix realisierte hingegen PB28.

Tab. 11: Zeitlicher Anteil auf Tagesbasis sowie mittlere und maximale Anteile der FM bzw. oTM aus Zuckerrüben am Gesamteintrag in die Biogasanlagen über den gesamten Beobachtungszeitraum; Angaben in Prozent.

	PB08	PB22	PB25	PB27	PB28
Zeitlicher Anteil	39	23	40	78	51
Mittl. FM-Anteil	7,0	1,3	4,1	23	21
Max. FM-Anteil	73	14	37	51	64
Mittl. oTM-Anteil	5,4	6,9	3,8	7,3	15
Max. oTM-Anteil	65	19	37	26	59

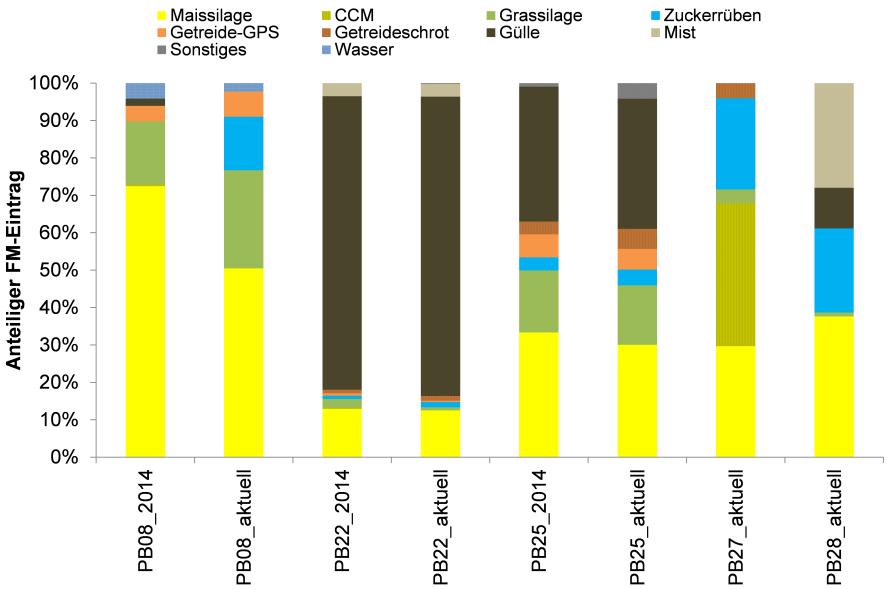

Abb. 31: Kumulierter mittlerer Anteil der einzelnen Substrate am Gesamteintrag an FM in die Biogasanlagen (ggf. während verschiedener Beobachtungszeiträume).

In keinem der untersuchten Betriebe wurden ZR für die intermittierende (Variation der Beschickungsrate im Tagesverlauf) oder selektive Beschickung (gezielte Zugabe eines schnell verfügbaren Substrats zur Abdeckung von Lastspitzen) genutzt, wie es eingangs als

besondere Stärke dieses Einsatzstoffes betont wurde (Vergleiche Tab. 1). In drei von fünf Betrieben wurden ZR aber im Zuge einer saisonalen, Wärme geführten Flexibilisierung eingesetzt: PB08, 25 und 28 (Vergleiche Tab. 15).

Die Untersuchungsergebnisse der ZR-Substrate zeigen Schwankungen beim oTS-Anteil, die auf einen unterschiedlichen Gehalt der Proben an flüchtigen organischen Substanzen und dementsprechend mögliche betriebliche Unterschiede in der Stabilität der Substrate während der Lagerung hinweisen. Bezüglich der Lagerung und Aufbereitung von ZR-Substraten wird auf den Abschlussberichts des entsprechenden Forschungsprojekts verwiesen [7].

Tab. 12: Charakterisierung der in den Biogasanlagen eingesetzten ZR-Substrate anhand von TS- und oTS-Gehalt: Mittelwerte ± Standardabweichung.

	PB08	**PB22**	**PB25**	**PB27**	**PB28**
Aggregatzustand der eingesetzten ZR	ganze Rüben	ganze Rüben	ganze Rüben	Rübenbrei	ganze Rüben
n	3	8	12	14	11
TS-Gehalt in FM, %	24,3	23,3	23,7	15,9	23,8
oTS-Anteil an TS, %	93,9	84,1	90,7	83,1	84,8
oTS-Gehalt in FM, %	22,9	19,7	21,7	12,3	20,5
n	-	5	9	-	9
Zuckeranteil an TS, %	n.v.	49,5	59,4	n.v.	52,2

Wie in Abschnitt 4.1 ausführlich beschrieben, konnten in keinem Fall eindeutige negative Auswirkungen von ZR auf die Gärbiologie festgestellt werden. – Im Gegenteil: In PB08 und PB28 führte der Einsatz von ZR im teilweisen Austausch für Maissilage dazu, dass sich ausgehend von eindeutig kritischen Werten der chemischen Prozessindikatoren bald nach Beginn der Fütterung von ZR die Gärbiologie stabilisierte. Die Wirkungsmechanismen waren hierbei unterschiedlich – wie auch die jeweiligen Kennwerte und der Einsatzstoffmix der Biogasanlagen – und unter den Bedingungen eines Monitorings in der Praxis nicht eindeutig nachzuweisen.

4.3 Schwachstellenanalyse und vergleichende Effizienzbewertung

Wie Tab. 13 zeigt, fällt das Ergebnis der Schwachstellenanalyse für die fünf Biogasanlagen, von denen PB08, 22 und 25 zusätzlich in einem früheren Betriebszustand bewertet wurden, überwiegend günstig bis sehr günstig aus. Zur besseren Einordnung in den Stand der Technik wurden den Ergebnissen für die hier untersuchten Anlagen in Tab. 14 die Medianwerte für die Anlagen im Biogas-Messprogramm III (BMP III) gegenübergestellt. Auffälligster Unterschied ist die im Medianwert deutlich bessere Bewertung der Anlagen im Biogasrüben-Monitoring für die Kategorie der Biogasverwertung. Eine tiefergehende Diskussion kann an dieser Stelle nicht erfolgen, da der Abschlussbericht zum BMP III noch nicht veröffentlicht wurde.

Tab. 13: Ergebnis der qualitativen Effizienzbewertung für die Biogasanlagen.

	RBY*	MPR	BP	URCGU	MUR	BV	Insges.
PB08_2014	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	gut
PB08_aktuell	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
PB22_2014	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend
PB22_aktuell	gut	ungenügend	ungenügend	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend
PB25_2014	sehr gut	ausreichend	gut	gut	sehr gut	gut	gut
PB25_aktuell	gut	ausreichend	ausreichend	ungenügend	sehr gut	gut	gut
PB27	gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut
PB28	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut

*) RBY: Relative Biogasausbeute; MPR: Methanproduktivität; BP: Biogasproduktion; URCGU: BHKW-Leistungsausnutzung; MUR: Methan-Nutzungsgrad; BV: Biogasverwertung.

Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der quantitativen Effizienzbewertung.

	RBY*	MPR	BP	URCGU	MUR	BV	Insges.
	%	m³/(m³ d)	1	%	%	1	1
PB08_2014	144	1,0	87,4	92	64	73,3	72,8
PB08_aktuell	137	1,1	86,5	99	68	74,5	74,1
PB22_2014	122	0,40	37,5	99	58	74,5	37,5
PB22_aktuell	98	0,41	25,1	100	73	81	26
PB25_2014	120	0,83	72,2	92	70	73,3	70,3
PB25_aktuell	98	1,0	50	72	66	62,5	50,1
PB27	118	1,3	68,7	99	61	74,3	67,2
PB28	105	1,2	59,1	100	54	50	62,2
Medianwerte							
aktuelle Stichprobe (n = 8)	119	1,0	63,9	99	65	73,8	64,7
BMP III [8] (n = 61)	127	0,95	51,8	89,9	56	52,0	41

*) RBY: Relative Biogasausbeute; MPR: Methanproduktivität; BP: Biogasproduktion; URCGU: BHKW-Leistungsausnutzung; MUR: Methan-Nutzungsgrad; BV: Biogasverwertung.

Eine deutliche Schwachstelle gibt der „Biogas Doc“ am häufigsten für die Methanproduktivität aus (Tab. 13). Der Bewertungsmaßstab wurde hierbei so definiert, dass ein gewisses Effizienzniveau der Nutzung des Fermentationsvolumens erreicht werden sollte, um den baulichen Aufwand zu rechtfertigen. Gleichzeitig wird dieses Kriterium für die Bewertung geringer gewichtet als die relative Biogasausbeute, da die Bereitstellung von Fermentationsvolumen bei landwirtschaftlichen Anlagen ein nachrangiger Kostenfaktor ist.

Im speziellen Fall von PB22 ergibt sich die „ungenügende“ Methanproduktivität daraus, dass der nominal als „Gärrestlager 1“ bezeichnete Behälter für die Bewertung als Nachgärer klassifiziert wurde (Vergleiche Abb. 2). Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass dieser Behälter wärmegedämmt ist und die Prozesstemperatur etwa 40 °C beträgt. Da die Gaserträge aus der ersten Gärstufe und diesem Behälter nicht getrennt erfasst werden können, muss das Füllvolumen von „Gärrestlager 1“ dem Fermentersystem zugerechnet werden. Dieser Befund weist auf die Tatsache hin, dass diese nominal einstufige „Kompaktanlage“ de facto eine zweistufige Gärkaskade darstellt. Die Besonderheit dieses Konzepts liegt damit nicht in einer vermeintlich hohen Produktivität der Hochfermenter, sondern in deren geringem Platzbedarf. Insgesamt erhielt PB22 die im Vergleich schlechteste Bewertung für die Kategorie „Biogasproduktion“ (

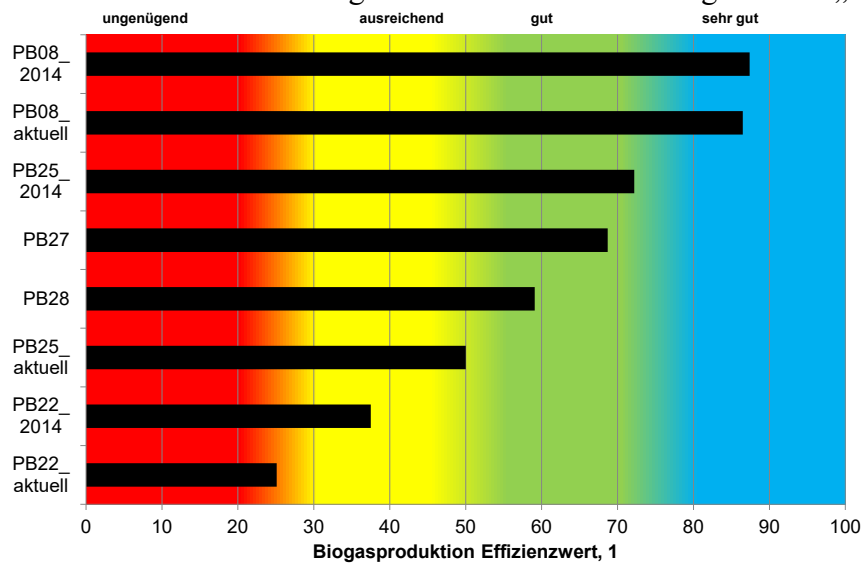

Abb. 32) und somit auch einen klaren Nachteil in der Gesamtbewertung (Tab. 14), während die Anlage zugleich in der Kategorie „Biogasverwertung“ das beste Ergebnis erzielte (Abb. 33).

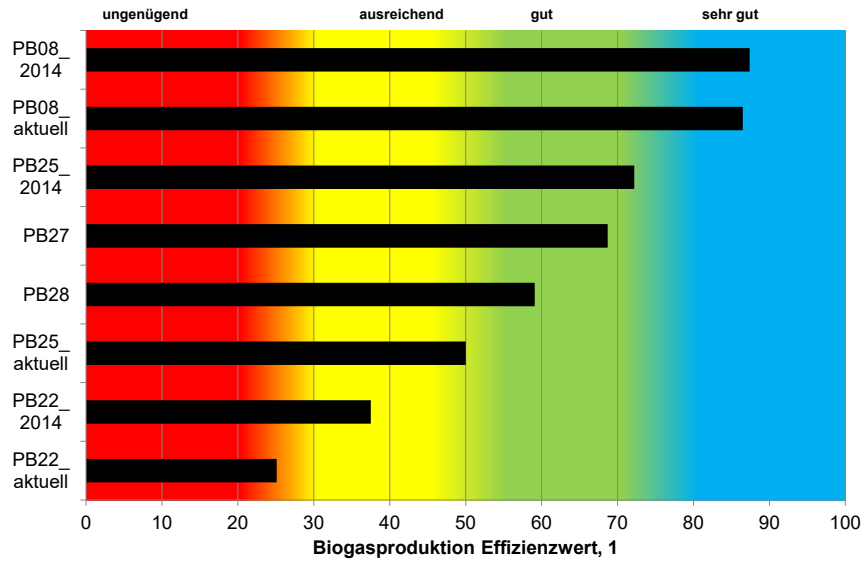

Abb. 32: Ranking der Biogasanlagen nach dem Effizienzwert für die Biogasproduktion.

In der Kategorie „Biogasverwertung“ sticht als einziges Ergebnis die „ungenügende“ Leistungsausnutzung von PB25_aktuell ins Auge (Tab. 13). Diese resultiert aus der Erhöhung der elektrischen Bemessungsleistung von 190 auf 276 kW mit dem Ziel einer saisonalen, Wärme geführten Flexibilisierung (Vergleiche 4.1.3). Dieses Ziel wurde im Wesentlichen erreicht: der Wärmeabsatz wurde entsprechend erhöht und der Methan-Nutzungsgrad auf sehr hohem Niveau praktisch konstant gehalten. Vor diesem Hintergrund stellt der Befund für die Ausnutzung der elektrischen Höchstbemessungsleistung keine wirkliche Schwachstelle dar. Die mit der Erhöhung der Wärmeleistung einhergehende deutliche Steigerung (ca. + 63 %) der oTM-Raumbelastung von PB25 führte allerdings zu einem deutlichen Rückgang (ca. - 18 %) der relativen Biogasausbeute, so dass die Anlage im aktuellen Status gemeinsam mit PB22 diesbezüglich den unteren Rand der Verteilung für die vorliegende Stichprobe markiert (Vergleiche Tab. 14).

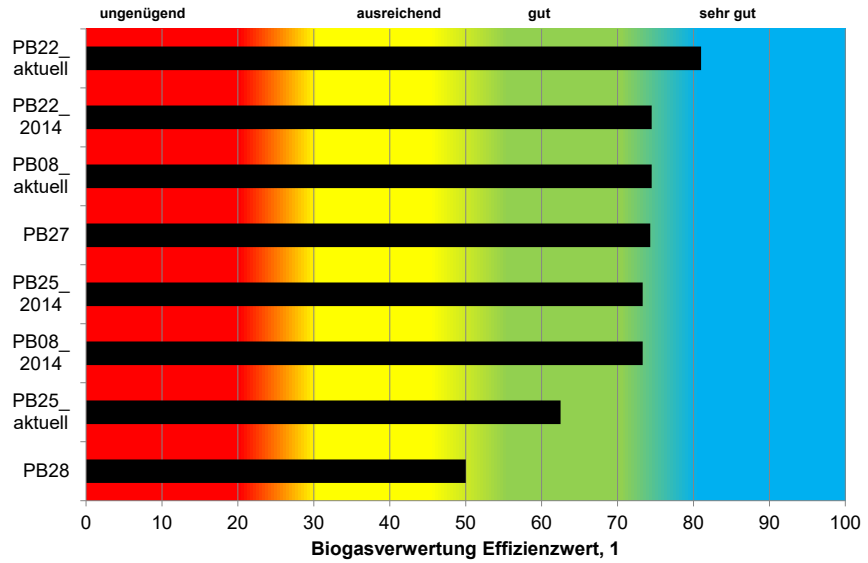

Abb. 33: Ranking der Biogasanlagen nach dem Effizienzwert für die Biogasverwertung.

4.4 Bewertung von Umweltwirkungen

Um für das vorliegende Projekt die Möglichkeiten zur Analyse der ökologischen Effekte des ZR-Einsatzes zu evaluieren, wurde in Tab. 15 zusammengefasst, welche Veränderungen auf den untersuchten Pilotbetrieben in einen Zusammenhang mit dem Einsatz von ZR gebracht werden können. Die Diskussion möglicher Effekte des Einsatzes von ZR auf die Umweltwirkungen fokussiert sich demnach auf folgende Aspekte:

- Unterschiede in der THG-Intensität der Erzeugung von Energiepflanzen bei teilweisem Ersatz von Mais und Getreidekorn durch ZR;
- Prozessenergiebedarf für das Reinigen, Zerkleinern und Fördern der ZR;
- Änderungen bei der Energieeffizienz und den spezifischen THG-Emissionen der Energiebereitstellung in Folge der saisonalen, Wärme geführten Flexibilisierung der Biogasverwertung.

Tab. 15: Veränderungen auf den untersuchten Biogasbetrieben im Zusammenhang mit dem Einsatz von ZR.

Aspekt	PB08	PB22	PB25	PB27	PB28

Durch ZR vornehmlich ersetzter Einsatzstoff	Mais-GPS	Mais-GPS	Getreidekorn	Maiskornsilage	Mais-GPS
Bauliche Maßnahmen	keine	keine	keine	keine	keine
Zusätzliche Prozesse und Maschinen	Trockenreinigung, Schnitzeln	Trockenreinigung, Schnitzeln	Trockenreinigung, Schnitzeln, Ko-Silierung	Trockenreinigung, Schreddern, Pumpen	Trockenreinigung, Schnitzeln
Änderungen bei der Verwertung des Biogases	saisonal Wärme geführt	nicht erkennbar	saisonal Wärme geführt	nicht erkennbar	(saisonal Wärme geführt)

4.4.1 THG-Bilanz und Effizienz der Energiebereitstellung in den Biogasanlagen

Mit dem „THG-Rechner Biogas“ errechnen sich für die Stromerzeugung in den betrachteten Biogasanlagen spezifische CO_2-Äq-Emissionen in einer Spanne von 290 bis 535 g/kWh (Medianwert: 423 g/kWh). Gegenüber der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern in den jeweiligen Referenzsystemen ergibt sich damit für die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas in allen Fällen eine erhebliche Vermeidung von THG-Emissionen in einer Spanne von 414 bis 715 g/kWh (Medianwert: 589 g/kWh), was einer Verringerung von 56 bis 97 % gegenüber dem jeweiligen substituierten Strommix entspricht (Tab. 16). Die Anlagenvarianten mit den höchsten (PB25_2014) und den niedrigsten (PB22_2014) spezifischen Brutto-CO_2-Äq-Emissionen trennt diesbezüglich ein Faktor von ca. 1,7. Gleichzeitig liegt Strom aus Biogas, wenn dieser wie in den hier betrachteten Anlagen überwiegend oder gar ausschließlich aus eigens angebauten Energiepflanzen erzeugt wird, im Niveau der spezifischen TGH-Emissionen etwa um den Faktor 10 über dem anderer erneuerbarer Energieträger [20].

Tab. 16: Ergebnis nach „THG-Rechner“ für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen (GWP100) der Strombereitstellung aus den Biogasanlagen nach ‚THG-Rechner Biogas‘; Werte außer in der letzten Spalte in Gramm je „Kilowattstunde ins öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie“.

	Vorkette EP	Erzeugung EP	Vorkette BGA	Gärstrecke & BHKW	Brutto-Emiss.	Substit. Wärme*	Substit. Strom*	Netto-Emiss.	Verring., %
PB08_2014	55	233	3	133	424	242	778	-597	-77
PB08_aktuell	54	216	3	134	407	251	738	-582	-79
PB22_2014	32	75	56	127	290	183	778	-671	-86
PB22_aktuell	34	79	66	127	306	283	738	-715	-97
PB25_2014	59	134	92	220	505	347	778	-620	-80
PB25_aktuell	66	150	100	219	535	261	738	-464	-63
PB27	45	156	61	211	473	148	738	-414	-56

PB28	37	110	45	230	422	128	738	-445	-60
Medianwerte	50	142	58	172	423			-589	-78

*) substituierter Mix aus fossilen Energieträgern.

Betrachtet man die Aufteilung der CO_2-Äq-Emissionen auf indirekte („Vorketten“) und direkte Quellen sowie die Verfahrensketten der Substratbereitstellung und der Biogaserzeugung & -verwertung, so fällt auf den ersten Blick ein grundlegender Unterschied zwischen PB08 gegenüber den übrigen Anlagen auf (Abb. 34). Dieser rührt daher, dass diese Anlage als einzige eine Überschusseinspeisung betreibt und somit keine Emissionen aus dem Bezug von Netzstrom anzurechnen sind. Die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen für den deutschen Strommix wurden für 2018 mit 474 g/kWh angegeben und lagen damit um etwa 12 % über dem Medianwert für die spezifischen Brutto-Emissionen der hier betrachteten Anlagen. Für PB08 sind somit die direkten CO_2-Äq-Emissionen aus der Erzeugung von Energiepflanzen die dominierende Emissionsquelle – zumal die Anlage in 2014 nur eine sehr geringe Menge an Gülle und seit 2016 ausschließlich Energiepflanzen einsetzte (Vergleiche Abb. 8).

Wie sich in Tab. 16 andeutet, sind die Emissionen aus der Substratbereitstellung positiv korreliert mit dem Anteil an Energiepflanzen. Ob hierbei der Ersatz von Mais und Getreidekorn durch ZR einen erkennbaren Einfluss auf die THG-Intensität der Substratbereitstellung hat, ist wesentlich komplizierter zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden für die untersuchten Betriebe die CO_2-Äq-Emissionen aus der Bereitstellung der häufigsten Energiepflanzen mit Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche bzw. den jeweiligen Methanertrag mit dem THG-Rechner ausgewertet. Der Vergleich der in

Tab. 17 aufgelisteten Stichproben für die THG-Intensität von Mais-GPS und Zuckerrüben im t-Test ergibt, dass die flächenspezifischen CO_2-Äq-Emissionen von ZR mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % höher als diejenigen für Mais sind; für die auf den Methanertrag bezogene THG-Intensität kann hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kulturen festgestellt werden. Somit kann die Aussage nicht gestützt werden, dass sich die THG-Intensität der Stromerzeugung aus Biogas signifikant verändert, wenn als Substrat Mais durch ZR ersetzt wird. Gleichzeitig kann dieses Ergebnis keine Allgemeingültigkeit beanspruchen, da der vorgenommene Vergleich in hohem Maße von den betrieblichen Daten zu Standortbedingungen, Düngeaufwand und Erträgen abhängen, welche mit dem „THG-Rechner“ relativ grob modelliert wurden.

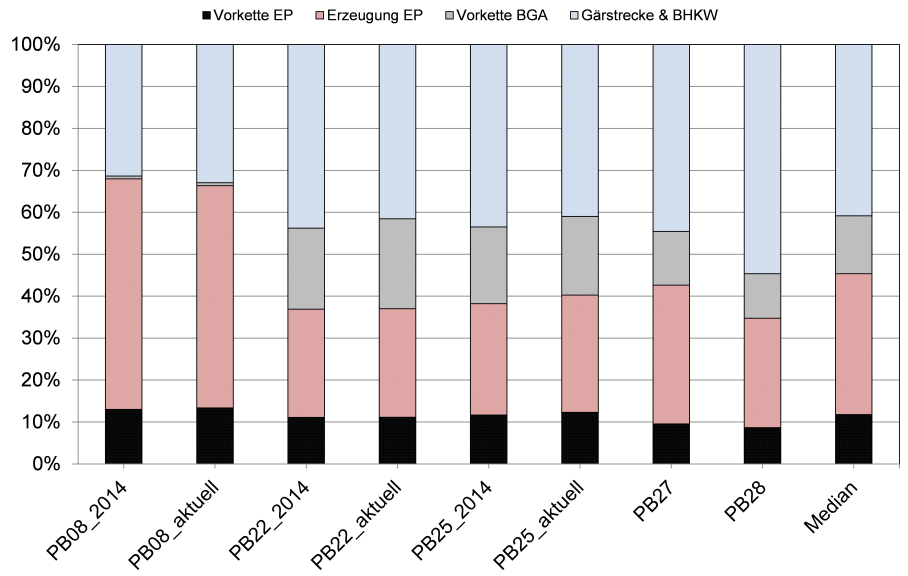

Abb. 34: Aufteilung der CO_2-Äq-Emissionen aus den Verfahrensketten für die Substratbereitstellung und die Biogaserzeugung & -verwertung, unterteilt in direkte und indirekte Quellen.

Tab. 17: Gegenüberstellung der für die Pilotbetriebe berechneten Werte für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen mit Bezug auf die Erzeugungsfläche bzw. den Methanertrag.

	Mais-GPS	**Zuckerrüben**	**Mais-GPS**	**Zuckerrüben**
CO_2-Äq in kg	**je Hektar Anbaufläche**		**je Kubikmeter Methanertrag**	
PB08_2014	6331	-	1,630	-
PB08_aktuell	6342	7960	1,633	1,424
PB22_2014	3592	-	0,925	-
PB22_aktuell	3590	4519	0,924	0,808
PB25_2014	3565	-	0,918	-
PB25_aktuell	3564	4486	0,918	0,802
PB27	4887	6140	1,258	1,098
PB28	4371		1,125	1,125
Mittelwert	4530	5720	1,025	1,098

Bezüglich des Prozessenergiebedarfs für das Reinigen, Zerkleinern und Fördern der ZR ist die Datenbasis sehr schmal. Für Tab. 18 wurden die verfügbaren Daten zum Strombedarf der Eintrags-, Förder- und Rührtechnik im Verhältnis zum FM-Eintrag ausgewertet. Für PB28 sind separate Messwerte zum Strombedarf nur für die Rührwerke und das BHKW verfügbar. Die Rührwerke in den Gärbehältern von PB28 hatten über den Beobachtungszeitraum einen Anteil von ca. 14 % am gesamten Strombedarf der Biogasanlage. Nochmals ungefähr den gleichen Strombedarf verursachte das Rühren der zwei Gärrestlager mit Gaserfassung, während der Anteil des BHKW bei ca. 38 % lag. Damit wurde ca. ein Drittel des Stromeigenbedarfs von der Fördertechnik und übrigen Verbrauchern verursacht.

Im Vergleich der Zeiträume mit und ohne ZR-Einsatz war der für das Rühren der Gärbehälter Strombedarf bei ZR-Einsatz je Tonne eingetragene Frischmasse (FM) im Mittel um etwa 11 % niedriger, je Tonne organische Trockenmasse (oTM) jedoch um 22 % höher. Dies erscheint vor dem Hintergrund des beobachteten Zusammenhangs zwischen ZR-Eintrag und TS-Gehalt im Gärgemisch plausibel (Vergleiche Abb. 29). Hochgerechnet auf den gesamten spezifischen Strombedarf von PB28 betragen diese Veränderungen jedoch nur wenige Prozent, womit kein signifikanter Einfluss des Einsatzes von ZR auf den Strombedarf und die damit verbundenen Umweltwirkungen festgestellt werden kann.

Tab. 18: Gegenüberstellung von Mittelwerten des oTM-spezifischen Strombedarfs der Förder- und Rührtechnik sowie der Stromausbeute der Biogasanlagen für Zeiträume mit und ohne ZR-Einsatz.

	PB25		**PB27**		**PB28**	
	ohne ZR	**mit ZR**	**ohne ZR**	**mit ZR**	**ohne ZR**	**mit ZR**
je Tonne oTM	kWh					
Substrataufbereitung	13,9	13,5	8,3	4,4	-	-
Substrateintrag	39,4	36,3	60,8	74,3	-	-
Pumpen	4,2	4,1	0,3	3,1	-	-
Rührwerke Gärbehälter	77,0	63,9	27,9	43,2	11,3	13,8
Summe Förder- und Rührtechnik	134,5	117,8	97,3	125,0	-	-
~ je Tonne FM	35,0	28,5	53,0	55,1	-	-
Stromausbeute	1.141	1.009	1.650	1.736	1.063	1.230
Anteil am gesamten Stromeigenbedarf, %	66	66	66	71	(13)	(16)

*) FM: gesamter Frischmasseeintrag in die Biogasanlage.

Im Falle von PB25 lag in den Zeiträumen mit ZR-Einsatz der spezifische Strombedarf für die Aufbereitung und Förderung der Substrate um ca. 6 % und für das Rühren um ca. 17 % niedriger; während des Einsatzes von ZR war der spezifische Strombedarf der Aufbereitungs-, Förder- und Rührtechnik somit um ca. 12 % je Tonne oTM bzw. um 19 % je Tonne FM geringer. Der Anteil der Förder- und Rührtechnik am Gesamtstrombedarf von PB25 machte jedoch unabhängig vom ZR-Einsatz etwa zwei Drittel aus, da die Stromausbeute je Tonne oTM aus dem Einsatzstoff mit ZR um ca. 12 % geringer ausfiel. Unter dem Strich veränderte sich die Prozesseffizienz also nicht.

In PB27 veränderte sich der spezifische Strombedarf der aufwändigen Aufbereitungs- und Fördertechnik für die Flüssigfütterung bezogen auf die FM durch den ZR-Einsatz kaum, bezogen auf die oTM hingegen nahm dieser um ca. 28 % zu. Auffällig war hierbei der um 55 % erhöhte Aufwand an Rührenergie. Da gleichzeitig die Stromausbeute im Mittel nur um ca. 5 % höher lag, kann für diese Anlage konstatiert werden, dass während des Einsatzes von ZR die Prozesseffizienz merklich verringert war.

Es bleibt die Frage zu diskutieren, inwieweit Veränderungen beim Methan-Nutzungsgrad und den damit verbundenen Umweltwirkungen auf den Einsatz von ZR zurückgeführt werden können. Wie in Abschnitt 4.1 dargelegt, konnte nur für PB25 nachgewiesen werden, dass vorrangig ZR gezielt dafür eingesetzt wurden, um eine saisonale, Wärme geführte Flexibilisierung der BHKW-Leistung vorzunehmen. Vergleicht man den Betriebszustand in 2014 mit der aktuellen Auswertung, so erhöhten sich laut Tab. 19 in diesem Betrieb die spezifischen THG-Emissionen der Wärmebereitstellung in CO_2-Äq (GWP100) nach exergetischer Allokation von 67 auf 75 g/kWh (+ 10 %), für die eingespeiste elektrische Energie von 414 auf 459 g/kWh (+ 11 %). Nach der zwischenzeitlichen Erweiterung des BHKW um einen neuen Motor verringerten sich die elektrische Arbeitsausnutzung und somit auch der mittlere elektrische Nutzungsgrad; gleichzeitig setzte der Betrieb zwar absolut mehr Wärme ab, der genutzte Anteil nahm jedoch aufgrund der höheren

Wärmeerzeugung des erweiterten BHKW deutlich ab. Insgesamt errechnen sich für PB25 im aktuellen Status deutlich stärkere Umweltwirkungen der Energiebereitstellung, die allerdings nicht auf den Einsatz der ZR zurückzuführen sind, sondern auf eine verringerte Effizienz der Biogasanlage und des BHKW (Vergleiche auch Abschnitt 4.3).

Tab. 19: Ergebnis nach „THG-Rechner" für die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen (GWP100) der Strom- und Wärmebereitstellung aus den Biogasanlagen nach exergetischer Allokation; Werte in Gramm je Kilowattstunde Nutzenergie.

	Abgesetzte Wärme	**Veränderung, %**	**Eingespeiste Elektrizität**	**Veränderung, %**
PB08_2014	60		367	
PB08_aktuell	57	-5 %	351	-4 %
PB22_2014	42		260	
PB22_aktuell	42	=	259	≈
PB25_2014	67		414	
PB25_aktuell	75	+10 %	459	+11 %
PB27	70		432	
PB28	63		390	
Medianwerte	60		378	

Für PB08 wurde gegenüber 2014 eine leichte Verringerung der spezifischen THG-Emissionen sowohl für die Wärme- als auch für die Strombereitstellung errechnet, da die Effizienz der Biogasverwertung durch den Ausbau der Wärmenutzung und eine effizienteres BHKW weiter gesteigert werden konnte. Ein besseres Ergebnis ist mit dem sehr emissionsintensiven Substratmix in diesem Betrieb praktisch nicht mehr möglich. PB22 konnte den Wärmeabsatz stark erhöhen, wodurch der Allokationsfaktor für die Wärme deutlich von 10,4 auf 15,3 % steigt; gleichzeitig sank die eingespeiste Strommenge um ca. 4 %. Unterm Strich ergeben sich für PB22 gleichbleibende spezifische THG-Emissionen für die Wärme- und Strombereitstellung.

4.4.2 Vergleichende Lebenszyklusanalyse der Wärmebereitstellung für PB08

Der in Abb. 35 dargestellte Vergleich der Ergebnisse für die THG-Bilanz von PB08 zeigt zunächst, dass laut „THG-Rechner" die spezifischen CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung um etwa ein Drittel höher berechnet werden, als mit „GaBi ts". Der Unterschied beruht im Wesentlichen auf den laut THG-Rechner deutlich höheren Emissionen aus der Bereitstellung der Energiepflanzen.

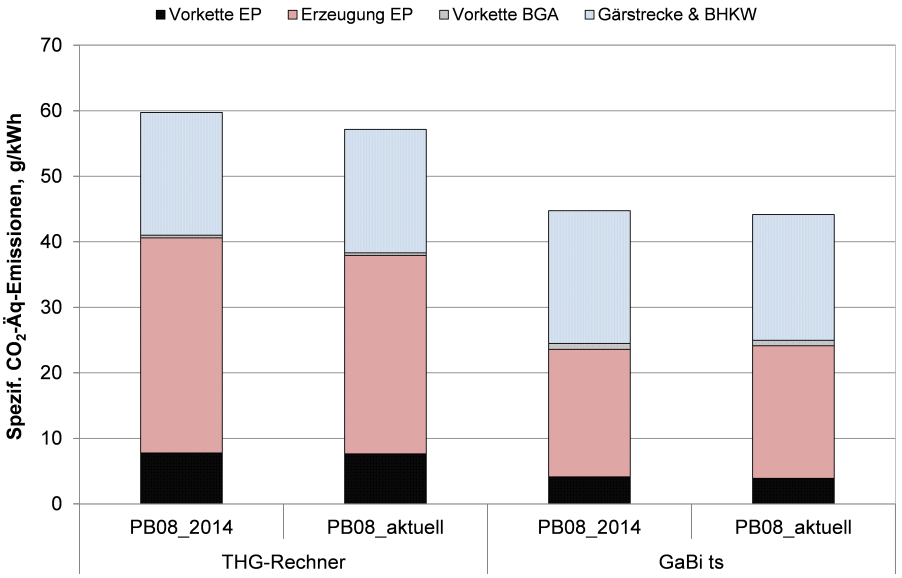

Abb. 35: Mit zwei verschiedenen Software-Anwendungen berechnete spezifische CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung aus PB08, unterteilt in direkte und indirekte Quellen sowie die Verfahrensketten für die Substratbereitstellung und die Biogaserzeugung & -verwertung.

Betrachtet man die Aufteilung auf die verwendeten Quellgruppen, zeigen sich weitere Unterschiede. Während laut THG-Rechner die Emissionen aus der Erzeugung der EP den größten Posten darstellen, liegen diese gemäß GaBi in etwa gleichauf mit den Emissionen aus der Gärstrecke und dem BHKW (Tab. 20). Zugleich fallen letztere im Betrag nahezu gleich hoch aus, da diese auf beiden Rechenwegen anhand des gemessenen Biogasertrags geschätzt werden.

Tab. 20: Aufteilung der spezifischen CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung aus PB08 gemäß Berechnung mit zwei verschiedenen Software-Anwendungen.

	THG-Rechner		**GaBi**	
Prozentuale Aufteilung:	**2014**	**aktuell**	**2014**	**aktuell**
Vorkette EP	13,0	13,4	9,2	8,8
Erzeugung EP	55,0	53,0	43,5	45,8
Vorkette BGA	0,7	0,7	2,1	1,9
Gärstrecke & BHKW	31,3	33,0	45,3	43,5

Emissionen aus der Vorkette der BGA fallen für PB08 nur aus der Herstellung und Errichtung der Biogasanlage an (Überschusseinspeisung!) und beeinflussen das Gesamtergebnis kaum. Während im THG-Rechner diese Emissionen lediglich mittels eines Faktoransatzes aus der installierten elektrischen BHKW-Leistung errechnet werden, beruht die Analyse mit GaBi auf einem groben Aufmaß der verbauten Massen an Beton und Stahl.

Damit richtet sich der Fokus auf die Emissionen aus der Bereitstellung der EP, die methodisch den kompliziertesten Rechenweg und die größte Unsicherheit aufweisen. Die hauptsächliche Ursache für den erheblichen Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen dürfte darin liegen, dass im THG-Rechner

Standarderträge für die EP angenommen werden und auf dieser Basis die Stickstoffdüngung nach Entzug berechnet wird, während die Analyse mit GaBi auf betrieblichen Angaben zu den Erträgen und dem Düngeaufwand beruht. Dass die Werte im THG-Rechner tendenziell überschätzt werden, könnte erklären, weshalb für PB08 solch hohe spezifische CO_2-Äq-Emissionen mit Bezug auf die Erzeugungsfläche errechnet wurden (Vergleiche

Tab. 17).

Betreffend den Vergleich der spezifischen CO_2-Äq-Emissionen der Wärmebereitstellung zwischen dem Anlagenstatus 2014 und 2018, errechnen beide Anwendungen eine tendenzielle, nicht signifikante Abnahme. Im Unterschied zum THG-Rechner fällt diese mit GaBi insgesamt geringer aus (-1 %) und die Emissionen aus der Erzeugung der EP nehmen geringfügig zu (+4 %).

4.5 Vorläufige Zusammenfassung der Ergebnisse molekularbiologischer Untersuchungen zur Gärbiologie

Autoren: Dr. M. Lebuhn, V. Dollhofer (LfL Abt. Qualitätssicherung und Untersuchungswesen)

Infolge der COVID-19-Pandemie mussten Analysen in diesem Bereich verschoben werden, so dass zum Termin der Berichtsabgabe noch nicht alle Auswertungen vorlagen. Um den Abgabetermin 30.06.2020 dennoch einzuhalten, werden die berichtsreifen Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst und interpretiert – da sich bereits ein vermittlungsfähiges Gesamtbild ergibt. Eine ausführliche Darstellung der molekularbiologischen Untersuchungen und ihrer Ergebnisse wird nachgereicht.

Im Biogasprozess werden pflanzliche oder tierische Substrate von Bakterien und methanogenen Archaeen zu Biogas umgesetzt. Eine „gesunde“ Prozessmikrobiologie ist somit für eine effiziente Biogasproduktion essentiell. Neben den technischen Betriebsbedingungen kann auch das eingesetzte Substrat die Biogasmikrobiologie („Gärbiologie“) beeinflussen. Die im Projekt eingesetzten Zuckerrübensilagen enthalten viele leicht abbaubare Substanzen wie Zucker, Säuren und Alkohole, die durch die Bakterien im Prozess rasch umgesetzt werden können. Dies kann zu einer Versäuerung des Gärgemischs führen und die methanogenen Archaeen und damit die Biogasproduktion hemmen (Langer et al., 2015). Zuckerrübensilage enthält zudem kaum Stickstoff und Phosphor, und reduziert die Pufferkapazität (Demirel & Scherer, 2008).

Um den Einfluss des ZR-Einsatzes auf die Prozessmikrobiologie zu erfassen, wurden zu ausgewählten Terminen Proben von den Pilotbetrieben (PB) 8, 22, 25, 27 und 28 genommen. Dabei wurden generell die Hauptgärbehälter („Fermenter“) der Anlagen beprobt, nur bei PB27 wurde am 19.02.2018 zusätzlich eine Hydrolysegrube (H1) untersucht. Die Proben wurden wenn möglich vor und während des ZR-Einsatzes entnommen: für die Anlage PB08 vor und während der ZR-Fütterung von November 2017 bis März 2018, für PB22 von November 2017 bis ins Frühjahr 2018, für PB25 ab September 2017, für PB27 ab Januar 2018 und für PB28 ab Januar 2018.

Aus den Gärgemischen wurden nach erfolgreicher Nukleinsäureextraktion die Anzahl (Messung der DNA bzw. Gene) und Transkriptions-Aktivität (Messung der RNA bzw. Transkripte als cDNA und Berechnung der Transkript/Gen-Verhältnisse als spezifische Transkriptionsaktivität) von Bakterien und methanogenen Archaeen mittels quantitativer real-time PCR bestimmt. Weiterhin wurde die bakterielle und methanogene

Gesellschaftszusammensetzung mittels spezifischer PCR-basierter Amplikonsequenzierung ermittelt. Die Primer zur spezifischen Analyse der Gene bzw. Transkripte des Schlüsselenzyms der Methanogenese, der Methyl-Coenzym-M-Reduktase (MCR Genuntereinheit mcrA, beinhaltet im Folgenden die Isogene mcrA1,2), wurden von Bauer et al. (2008) entwickelt. Der Energiehaushalt der Methanogenen ist direkt abhängig von der Aktivität dieses Enzyms: ohne MCR-Aktivität können die Methanogenen keine Energie gewinnen und es entsteht kein Methan. Die Primer zur spezifischen Analyse der bakteriellen 16S-rRNA-Gene (rrs) bzw. ihrer Transkripte sind bei Lebuhn et al. (2014a) beschrieben.

Die Konzentration der mcrA1,2- (beinhaltet Isogen mrtA-) Gene, also die Gesamtzahl der methanogenen Archaeen pro Volumeneinheit Gärgemisch, lag in den Fermentern der PB 8, 22 und 25 mit Werten zwischen $6{,}5*10^{7}$ und $1{,}8*10^{9}$ Kopien/mL im oberen Normalbereich für Biogasprozesse (Lebuhn et al., 2014b). In PB28 lag die Anzahl an Methanogenen mit Werten im Bereich 10^{7} Kopien/mL noch im Normalbereich für Biogasprozesse. In PB27 war die Anzahl der Methanogenen dagegen mit 10^{6} Kopien/mL im Fermenter ziemlich gering. In der Hydrolysegrube war dies ebenfalls der Fall, allerdings ist hier auch mit einer geringen Anzahl und Aktivität der Methanogenen zu rechnen, da die Hydrolyse des Substrats mit der Bildung organischer Säuren praktisch ausschließlich durch Bakterien bewerkstelligt wird.

Die mcrA1,2-Transkriptionsaktivität der Methanogenen war in den verschiedenen Praxisanlagen recht unterschiedlich. In beiden Fermentern von PB08 bewegte sich diese Aktivität mit mcrA1,2-Transkript/Gen-Verhältnissen (T/GmcrA1,2) um niedrige Werte zwischen $6{,}7*10^{-2}$ und $2{,}8*10^{-1}$. T/GmcrA1,2 war auch in PB25 schwach. Für PB27 ergaben sich für die zwei untersuchten Zeitpunkte im Fermenter recht unterschiedliche T/GmcrA1,2: eine mit 1 relativ hohe im Februar 2018 und eine mit $4*10^{-3}$ niedrige im März 2018. In der Hydrolysestufe konnte erwartungsgemäß keine mcrA1,2-Transkriptionsaktivität nachgewiesen werden. In den Anlagen von PB22 und PB28 lag die methanogene Transkriptionsaktivität im Normalbereich.

Eine Korrelation einer Veränderung der Anzahl oder Transkriptionsaktivität der Methanogenen mit dem Einsatz von ZR war in keiner der untersuchten Anlagen festzustellen. Die methanogene Gesellschaftszusammensetzung wurde durch den ZR-Einsatz ebenfalls nicht beeinflusst. Unterschiede waren eher durch die Prozesstemperaturen der jeweiligen Anlagen geprägt: In PB22, deren Fermenter bei 53 °C betrieben wurden, dominierte *Methanothermobacter wolfeii*. Dieser Organismus ist für sein Vorkommen in thermophilen Biogasprozessen bekannt und verstoffwechselt als hydrogenotrophe Archaee CO_2 und H_2 zu CH_4 (Hassa et al., 2020). In den Hauptgärbehältern von PB27 und in PB28 dominierte *Candidatus Methanoculleus IIB thermohydrogenotrophicum*. Dieses hydrogenotrophe methanogene Archaeon kommt häufig in Biogasprozessen vor. Sein Auftreten ist nicht mit einer bestimmten Substratmischung assoziiert, sondern eher mit höheren Prozesstemperaturen (Kougias et al., 2017), wie dies in PB27 mit 44 °C und PB 28 mit 48 °C der Fall war.

Die bakterielle Zellzahl lag in allen Anlagen mit Werten um 10^{10} bis 10^{11} Zellen pro mL Gärgemisch im Normalbereich einstufiger Biogasprozesse, ebenso wie die bakterielle Transkriptionsaktivität (gemessen als rrs-cDNA) mit 10^{12} Transkripten pro mL Gärgemisch und einem T/Grrs mit 10^{1} bis 10^{2} (Lebuhn et al., 2014a; Lebuhn et al., 2014b). Lediglich für die Hydrolysegrube der PB 27 ergab sich am 19.02.2018 mit $1{,}3*10^{14}$ Transkripten pro mL Gärgemisch und einem T/Grrs von $1{,}6*10^{3}$ eine sehr hohe Aktivität. Ein Einfluss des Zuckerrübeneinsatzes war auch hier nicht erkennbar.

Wie bei den methanogenen Archaeen unterschied sich die bakterielle Gesellschaftszusammensetzung in PB22, 27 und 28 kaum zwischen den verschiedenen Messszeitpunkten. In PB22 war die hohe Abundanz der Gattungen Clostridia MBA03 und Defluviitoga auffällig. Beide sind für ihr Vorkommen in Biogasprozessen bekannt. Clostridia MBA03 treten häufig in thermophilen Prozessen unter Verwertung von cellulosereichen Substraten auf und katalysieren hydrolytische Reaktionen (FitzGerald et al., 2019). Die Gattung Defluvitoga gehört zum Phylum Thermotogae, das für eine thermophile Lebensweise und den Abbau einer Vielzahl von Kohlenstoffquellen (Hexosen, Pentosen, Glukane, Xylane, Pektin, Chitin und Cellulose) zu Lactat, Ethanol, Acetat, CO_2 und H_2 bekannt ist (Maus et al., 2015). Zusätzlich waren hier die Gattungen Halocella, Lentimicorbiaceae und Syntrophaceticus aktiv. Halocella-Zugehörige aus dem Phylum Firmicutes sind hydrolytische Bakterien, die Cellulose zu Acetat, Lactat, Ethanol, CO_2 und H_2 umsetzen. Die Spezies *Halocella cellulosilytica* wurde bereits in thermophilen Biogasanlagen nachgewiesen (Azman et al., 2015). Lentimicrobiaceae gehören zum Phylum Bacteroidetes. Soweit bekannt katalysieren sie hydrolytische Umsetzungen komplexer Polysaccharide und produzieren Acetat, Malat, Propionat, Formiat und Wasserstoff zur weiteren Umsetzung durch methanogene Archaeen oder syntrophe Bakterien im Biogasprozess (Sun et al., 2016b). Zugehörige der Gattung Syntrophaceticus sind für die syntrophe Oxidation von Acetat im Zusammenspiel mit hydrogenotrophen Archaeen bekannt. Clostridia MBA03 und Mitglieder der Gattung Lentimicrobiaceae gehörten auch in den Anlagen von PB27 und PB28 zu den dominanten Organismen. In PB27 waren zusätzlich Vertreter der Gattungen Halocella und Tepidimicrobium aktiv. Tepidimicrobium-Bakterien verstoffwechseln Peptide und wurden in anaeroben Prozessen gefunden (Dai et al., 2016). In PB28 waren zusätzlich Vertreter der Gattung Gallicola (zugehörig zur Familie Tissierellaceae) dauerhaft aktiv. Gallicola-Vertreter sind für die Verwertung von Purinen bekannt und wurden zum ersten Mal aus Hühnermist isoliert (Sun et al., 2016a). Ihr Vorkommen passt mit dem dauerhaften Einsatz von Putenmist in PB28 zusammen. Zusammengefasst entsprachen die bakteriellen Profile den für thermophile Prozesse erwarteten Verteilungen. Ein Einfluss des Zuckerrübeneinsatzes war nicht erkennbar.

Die Gesellschaftszusammensetzungen der Anlagen PB08 und PB25 wurden im Rahmen des Community Science Program-Projekts „Anaerobic fungi and assessment of their potential for biogas production“ am Joint Genome Institute, Walnut Creek, Kalifornien, USA durchgeführt. Hier sind die Auswertungen noch nicht vollständig abgeschlossen. Ein ausführlicher Bericht mit Darstellung der mikro- und molekularbiologischen Ergebnisse wird daher nachgereicht. Es ist aber davon auszugehen, dass sich auch in den noch ausstehenden Analysen kein modifizierender Einfluss des Zuckerrübeneinsatzes bei den realisierten FM-Anteilen auf die Prozessmikrobiologie ergibt. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Projekt „Verfahrenstechnische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben als Spitzenlast-Substrat in Biogasanlagen“ (Projekt BE/16/02 StMWi) ergibt sich das Bild, dass der Einsatz von Zuckerrüben und deren Silagen in den bisher untersuchten Mengen keinen Einfluss auf die Prozessmikrobiologie hat und daher zumindest im getesteten Anteil in der Substratmischung zur Flexibilisierung der Biogasproduktion unbedenklich einsetzbar ist.

Quellenverzeichnis:

Azman, S., Khadem, A.F., van Lier, J.B., Zeeman, G., Plugge, C.M. (2015): Presence and Role of Anaerobic Hydrolytic Microbes in Conversion of Lignocellulosic Biomass for

Biogas Production, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 45:23, 2523-2564, DOI: 10.1080/10643389.2015.1053727

Bauer, C., Korthals, M., Gronauer, A., Lebuhn, M. (2008): Methanogens in biogas production from renewable resources – a novel molecular population analysis approach. *Water Sci. Technol.* 58:7, 1433–1439, https://doi.org/10.2166/wst.2008.514

Dai, X., Yan, H., Li, N. (2016): Metabolic adaptation of microbial communities to ammonium stress in a high solid anaerobic digester with dewatered sludge. *Sci. Rep.* 6**,** 28193. https://doi.org/10.1038/srep28193

Demirel, B., Scherer, P. (2008): Production of methane from sugar beet silage without manure addition by a single-stage anaerobic digestion process. *Biomass Bioenergy*, 32:3, 203-209, https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.09.011

FitzGerald, J.A., Wall, D.M., Jackson, S.A., Murphy, J.D., Dobson, A.D.W. (2019): Trace element supplementation is associated with increases in fermenting bacteria in biogas mono-digestion of grass silage. *Renew. Energy*, 138, 980-986, https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.051.

Hassa, J., Wibberg, D., Maus, I., Pühler, A., Schlüter, A. (2019): Genome Analyses and Genome-Centered Metatranscriptomics of *Methanothermobacter wolfeii* Strain SIV6, Isolated from a Thermophilic Production-Scale Biogas Fermenter. *Microorganisms,* 8:1, 13, doi:10.3390/microorganisms8010013

Kougias, P.G., Campanaro, S., Treu, L. Zhu, X., Angelidaki, I. (2017): A novel archaeal species belonging to *Methanoculleus* genus identified via de-novo assembly and metagenomic binning process in biogas reactors. *Anaerobe*, 46, 23-32, https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.02.009.

Langer, S.G., Ahmed, S., Einfalt, D., Bengelsdorf, F.R. and Kazda, M. (2015): Biogas-producing microbial communities. *Microb. Biotechnol.*, 8, 828-836, doi:10.1111/1751-7915.12308

Lebuhn, M., Hanreich, A., Klocke, M., Schlüter, A., Bauer, C., Marín Pérez, C. (2014a): Towards molecular biomarkers for biogas production from lignocellulose-rich substrates. *Anaerobe* 29, 10-21, DOI:10.1016/j.anaerobe.2014.04.006

Lebuhn, M., Munk, B., Effenberger, M. (2014b): Agricultural biogas production in Germany - from practice to microbiology basics. *Energy Sustain. Soc.,* 4:10, 21, DOI:10.1186/2192-0567-4-10

Maus, I., Cibis, K.G., Wibberg, D., Winkler, A., Stolze, Y., König, H., Pühler, A., Schlüter, A. (2015): Complete genome sequence of the strain *Defluviitoga tunisiensis* L3, isolated from a thermophilic, production-scale biogas plant. *J. Biotechnol.*, 203, 17-18, https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.03.006.

Sun, L., Liu, T., Müller, B., & Schnürer, A. (2016a): The microbial community structure in industrial biogas plants influences the degradation rate of straw and cellulose in batch tests. *Biotechnol. Biofuels*, 9, 128, https://doi.org/10.1186/s13068-016-0543-9

Sun, L., Toyonaga, M., Ohashi, A. (2016b): *Lentimicrobium saccharophilum* gen. nov., sp. nov., a strictly anaerobic bacterium representing a new family in the phylum *Bacteroidetes*, and proposal of *Lentimicrobiaceae* fam. nov. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol*., 66:7, 2635-2642

5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen eines mehrjährigen Monitorings wurden Daten von fünf Biogasanlagen, die sich hinsichtlich Einsatzstoffmix und Anlagenkonzept teilweise sehr deutlich unterschieden, mit den an der LfL entwickelten und bewährten Methoden erhoben, ausgewertet und im Lichte des in der Fachliteratur dokumentierten Standes der Technik interpretiert. Auf Basis dieser Ergebnisse können auf die zu Beginn des Projekts formulierten Fragen die folgenden Antworten gegeben werden.

Aus welchen Gründen bzw. zu welchen Zwecken setzen Betreiber in ihren Biogasanlagen ZR ein?

Nach eigenen Aussagen setzten die Betreiber ZR in ihren Biogasanlagen ein, um (1) eine saisonale, Wärme geführte Flexibilisierung der BHKW-Leistung vorzunehmen, (2) wiederkehrende gärbiologische Instabilitäten zu vermeiden oder (3) den Energiebedarf für das Rühren der Gärbehälter zu verringern.

Ad (1): Nachweislich wurden ZR nur in einer Anlage gezielt gefüttert, um saisonal die BHKW-Leistung Wärme geführt zu erhöhen; in zwei weiteren Fällen ersetzten ZR zwar saisonal andere Energiepflanzen, aber hierbei wurde nicht in erster Linie die ZR-Eintragsrate entsprechend dem Leistungsbedarf variiert. Dieser Unterschied spielte insofern keine Rolle, als im Wärme geführten Betrieb in der Regel keine intermittierende oder selektive Beschickung erfolgt.

Ad (2): Eindeutig positive Effekte auf die Gärbiologie konnten in zwei Fällen gezeigt werden, wobei die Wirkung jeweils vor dem Hintergrund des Ausgangsstatus der jeweiligen Anlage beurteilt werden muss. Als wahrscheinliche Wirkmechanismen kommen der Ausgleich eines Mangels an Spurenelementen und eine Verdünnung des Gärgemisches in Frage. Ein negativer gärbiologischer Effekt der ZR-Substrate wurde in keinem Fall beobachtet und war bei den hier beobachteten mittleren FM-Anteilen von maximal etwa einem Fünftel nicht zu erwarten.

Ad (3): Der Effekt auf den Strombedarf für die Förder- und Rührtechnik ist in hohem Maße abhängig vom Einsatzstoffmix und der Verfahrenstechnik. Eine signifikante Abnahme des Stromeigenbedarfs der Anlage ist nicht zu erwarten; im Gegenteil kann durch eine aufwändige Aufbereitung und Beschickung des ZR-Substrats dieser sogar zunehmen.

Wie gestaltet sich die Lernkurve von Anlagenbetreibern beim Einsatz von ZR für die Biogasproduktion?

Die beobachteten Qualitätsunterschiede der ZR-Substrate zeigen, dass der sachgemäßen Lagerung ein besonderes Augenmerk gelten muss, um die Energieverluste zu minimieren. Hohe Ansprüche an die Betreiberqualifikation stellt die intermittierende oder selektive Beschickung, welche hier aber nicht evaluiert werden konnte.

Eignen sich ZR für die Modulation der Biogasproduktion („biologische Flexibilisierung“) und in welchen Anteilen müssen sie zu diesem Zweck eingesetzt werden?

Wie obenstehend bereits ausgeführt, wurden ZR-Substrate in den beobachteten Anlagen nicht für eine intermittierende oder selektive Beschickung im Tagesverlauf, sondern für eine saisonale, Wärme geführte Flexibilisierung eingesetzt. Hierbei wurden auf Tagesbasis kurzzeitig bis zu 73 % der gesamten FM in Form von ZR gefüttert. ZR-Substrate wurden im Rahmen diese Monitorings nicht entsprechend ihrem vollen technischen Potential für

die kurzfristige Modulation der Biogasproduktion im Tagesverlauf eingesetzt, so dass diesbezüglich keine Aussagen getroffen werden können.

Welche bautechnischen, verfahrenstechnischen und gärbiologischen Limitationen und Risiken treten beim Einsatz von ZR in Biogasanlagen auf? Gibt es hierfür kritische Schwellen?

In drei der fünf beobachteten Biogasanlagen wurden ZR zu einem mittleren FM-Anteil von ca. 7 % und an einzelnen Tagen bis zu 73 % eingesetzt. Unter diesen Umständen trat keine Destabilisierung der Gärbiologie auf und daher kann das Risiko einer „Fehlfütterung" als gering eingestuft werden.

Zwei Anlagen im Monitoring realisierten einen deutlich höheren FM-Anteil aus ZR von etwa einem Fünftel: im einen Fall wurden ausschließlich sehr faserarme, pflanzliche Substrate in einem zweiphasig-vierstufigen Verfahren vergoren; im anderen Fall wurden in einer herkömmlichen einphasig-zweistufigen Gärkaskade ein Drittel tierische Wirtschaftsdünger und zwei Drittel Energiepflanzen verwertet. Die beiden Anlagen unterscheiden sich also bezüglich Einsatzstoffmix und Anlagenkonzept sehr deutlich.

Die erstgenannte Anlage stellt einen Spezialfall, der durch einen hohen Prozessenergiebedarf und eine vergleichsweise ungünstige THG-Bilanz gekennzeichnet ist. Diese Anlagentechnik ist aber grundsätzlich für einen solchen anspruchsvollen Einsatzstoffmix geeignet und birgt das Potential für eine weitergehende biologische Flexibilisierung. In letzterer Anlage brachte der ZR-Einsatz eine vorübergehende Entlastung der Gärbiologie, was jedoch nicht darüber hinwegtäuschen konnte, dass generell mit zu hoher Raumbelastung gefahren und hierdurch Biogasertragspotential verschenkt wurde.

Sind herkömmliche Prozessindikatoren und Richtwerte für die Gärbiologie, wie sie in Biogasanlagen mit überwiegendem Einsatz von Stärke betonten Rohstoffen Anwendung finden, auch auf die ZR-Vergärung anwendbar? Können gegebenenfalls neue, besser geeignete Prozessindikatoren definiert werden?

Es ergeben sich keinerlei Hinweise darauf, dass die gängigen gärbiologischen Prozessindikatoren und Schwellenwerte beim Einsatz von ZR prinzipiell nicht anwendbar wären, sofern sich die realisierten FM-Anteile und insbesondere die Variation der Fütterungsraten in dem während des Monitorings beobachteten Rahmen bewegen. Soll eine höhere Dynamik der biologischen Flexibilisierung realisiert werden, könnte es für die Sicherung der Prozessstabilität notwendig sein, zusätzliche Prozessindikatoren zu verwenden, welche *inline* gemessen werden können.

Welche Auswirkungen hat der Einsatz von ZR auf die Umweltwirkungen der Biogaskette?

Was die spezifischen THG-Emissionen der Energiebereitstellung betrifft, ist für die fünf Biogasanlagen, die im Rahmen dieses Monitorings bewertet wurden, kein signifikanter positiver zusätzlicher Effekt des Einsatzes von ZR festzustellen. Alle fünf Betriebe sind durch einen vergleichsweise guten bis sehr guten Wärmenutzungsgrad gekennzeichnet. In den Fällen, in welchen ZR nach Betreiberaussagen zum Zwecke der Wärme geführten Flexibilisierung der BHKW-Leistung eingesetzt wurden, waren die geringen Veränderungen der THG-Bilanz gegenüber einem früheren Status nicht auf den Einsatzstoffmix, sondern auf die Erweiterung des BHKW zurückzuführen. Es konnte mittels der vereinfachten THG-Bilanzierung an der kleinen Stichprobe aus diesem Monitoring kein signifikanter Unterschied in der THG-Intensität der Substratbereitstellung zwischen Mais und ZR festgestellt werden.

Für den oben erwähnten Spezialfall einer zweiphasig-vierstufigen Anlage nahm der Prozessenergiebedarf während des Einsatzes von ZR aufgrund der sehr aufwändigen Aufbereitungs- und Fütterungstechnik deutlich zu, so dass in diesen Phasen die Energieeffizienz merklich verringert und folglich die damit verbundenen Umweltwirkungen erhöht waren. Der Aspekt der Energieeffizienz, unter Einbeziehung der Lagerung und Aufbereitung von ZR-Substraten, verdient demnach in der Praxis besondere Aufmerksamkeit, da hier bei nicht sachgerechter Vorgehensweise das Risiko eines nennenswerten negativen Effektes durch den Einsatz von ZR-Substraten besteht.

Mit Blick auf die Praxis der Nutzung von ZR zur Biogaserzeugung sind mit Abschluss dieses Forschungsprojektes vor allem Fragen zu einerseits der Prozesssteuerung bei der weitergehenden biologischen Flexibilisierung und andererseits der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit des Ersatzes von Silomais als intensive Ackerkultur durch Zuckerrübe als eine andere intensive Ackerkultur offen geblieben.

6 Wissenstransfer und Veröffentlichungen

Streicher, G.: Biogastechnologie (Schwerpunkt Landwirtschaft) – Anlagentechnik und Prozessbiologie. Vorlesung im Fach „Nachwachsende Rohstoffe“, Masterstudiengang Agrarwissenschaften, Technische Universität München, Wintersemester 2017/18

Streicher, G: Beschreibung der beprobten Pilotanlagen. Fachvortrag mit Diskussion im Rahmen des 3. Statusseminars im Verbundvorhaben “Bedeutung und Verbleib von *Clostridium difficile* und anderen neuartigen Erregern in Biogasanlagen“, LfL Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen / Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising: 05.07.2017

Streicher, G: Vorstellung der untersuchten Pilotanlagen. Fachvortrag mit Diskussion im Rahmen des 4. Statusseminars im Verbundvorhaben “*Clostridium difficile*“, LfL Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen / Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising: 25.06.2018

Kissel, R.; Tappen, S.; Streicher, G.; Lichti, F. Effenberger, M.: Verfahrenstechnische Erkenntnisse zum Einsatz von Zuckerrüben für die Biogaserzeugung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hg.), *Ackerbau - technische Lösungen für die Zukunft*, Landtechnische Jahrestagung, Deggendorf: 21.11.2017

Literaturverzeichnis

[1] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF): *Bayerischer Agrarbericht.* http://www.agrarbericht.bayern.de - 25.10.2018

[2] Schaffner, S.; Wolf, G.; Kawasch, M.: Rüben als Biogassubstrat Teil 1/2 - Überblick über Verfahrenswege zu Transport und Aufbereitung. *Biogas Forum Bayern* (2017), II-17

[3] Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Hillebrand, K.; Naumann, K. et al.: *Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa Biomasse). Zwischenbericht Juni 2014.* DBFZ Deutsches Biomasse Forschungszentrum, Leipzig: 2014

[4] Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T. et al.: *Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland.* DBFZ Report 30, Leipzig: 2017 - ISBN: 978-3-946629-24-5

[5] Strobl, M.; Vogler, S.: *Kurzstudie zur Wirtschaftlichkeit der Zuckerrübe auf Biogas-Praxisanlagen.* LfL Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/083618/index.php - 13.03.2020

[6] Lichti, F.; Tappen, S.; Schober, J.: *Einrichtung und Erprobung des Intervallbetriebs der Biogasanlage an der Versuchsstation Grub. Abschlussbericht zum Vorhaben N/14/13 an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.* Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2018

[7] Kissel, R.; Lichti, F.: *Verfahrenstechnische, mikrobiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen - Modul 1: Lagerung und Aufbereitung. FKZ: N/15/05.* Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2018

[8] DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum: *Biogas-Messprogramm III: 61 Biogasanlagen im Vergleich.* Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), in press

[9] Djatkov, Dj.; Effenberger, M.; Lehner, A.; Martinov, M.; Tesic, M. *et al.*: New method for assessing the performance of agricultural biogas plants. *Renew. Energ.* 40 (2012), 104-112

[10] Effenberger, M.; Buschmann, A.; Schober, J. Djatkov, Dj.: Webbasierte Schwachstellenanalyse an landwirtschaftlichen Biogasanlagen/Web-based weak point analysis for agricultural biogas plants. *Landtech./Agric. Eng.* 69 (2014), 2, 295-301

[11] 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

[12] Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S.: *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger.* Umweltbundesamt (UBA), Cimate Change 37, Dessau-Roßlau: 2019

[13] Memmler, M.; Schrempf, L.; Hermann, S.; Schneider, S.; Pabst, J. et al.: *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013.* Umweltbundesamt (UBA), Cimate Change 29, Dessau-Roßlau: 2014

[14] Schieder, D.; Gronauer, A.; Lebuhn, M.; Bayer, K.; Beck, J. et al.: Prozessmodell Biogas. *Biogas Forum Bayern* (2015), III-03

[15] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: *Spurenelemente* -

Düngeempfehlungen für Acker- und Grünland. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, www.landwirtschaftskammer.de - 19.05.2020

[16] Streicher, G.; Kliche, R.; Buschmann, A.; Pohl, A. Effenberger, M.: *Monitoring von Biogasanlagen - Diversifizierung der Einsatzstoffe und Verfahrenstechnik. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (FKZ: EW/12/03).* Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2016

[17] Ahring, B.K.: Methanogenesis in thermophilic biogas reactors. *Antonie van Leeuwenhoek* 67 (1995), 91-102

[18] Preißler, D.: Prozessbiologische Störungen in NawaRo und Gülleanlagen: Symptome, Ursachen und mögliche Lösungsansätze. *Biogas Forum Bayern* (2010), III-4

[19] Angelidaki, I.; Ahring, B.K.: Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Res.* 28 (1994), 3, 727-731

[20] Effenberger, M.: Biogasanlagen in Bayern - Minderung der Treibhausgasemissionen. *Schule & Beratung* (2020), 5-6, 55-59

Anhang

Tabelle-A 1: Analysedaten der Einsatzstoffe von PB08

Substrat	**n**		**TM**	**oTM**	**oTM**
			% FM	% TS	% FM
Maissilage	10	MW	36,1	97,0	35,0
		Max	38,2	97,3	37,2
		Min	34,0	96,4	32,8
Gassilage	7	MW	33,3	89,2	29,7
		Max	42,9	90,5	38,8
		Min	23,6	86,7	20,5
Triticale GPS	6	MW	26,9	94,9	25,5
		Max	35,6	96,2	34,2
		Min	21,9	93,6	20,5
Zuckerrüben	3	MW	24,3	93,9	22,9
		Max	25,9	94,4	24,4
		Min	23,2	93,3	21,6
CCM	1		59,4	98,3	58,4

Tabelle-A 2: Analysedaten der Gärgemischproben von PB08

Gärstufe	**n**		**TM**	**oTM**	**pH**	**TAN**	**FOS/ TAC**	**Essigs. Äquivalent**	**Essig-säure**	**Propion-säure**
			%	%		mg/kg	-	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Fermenter 1	11	MW	8,9	78,5	7,7	1.753	0,30	635	607	24
		Max	9,9	81,6	7,9	2.222	0,48	2.155	2.053	126
		Min	8,0	75,0	7,4	1.465	0,21	121	121	0
Fermenter 2	11	MW	9,0	78,6	7,7	1.777	0,31	747	711	36
		Max	10,6	81,9	7,9	2.100	0,49	2.031	1.935	119
		Min	7,7	75,8	7,5	1.404	0,21	135	110	0
Nachgärer	11	MW	7,9	76,4	7,7	1.896	0,23	141	137	2
		Max	8,7	79,7	7,9	2.252	0,30	456	456	26
		Min	7,4	73,5	7,5	1.510	0,20	0	0	0

Tabelle-A 3: Analysedaten der Einsatzstoffe von PB22

Substrat	**n**		**TM**	**oTM**	**oTM**
			% FM	% TM	% FM
Maissilage	29	MW	33,3	96,3	32,1
		Max	44,5	97,6	42,9
		Min	28,8	94,6	28,1
Grassilage	25	MW	31,0	88,9	27,6
		Max	46,2	91,4	39,5
		Min	19,8	85,0	16,8
Grünroggen-GPS	6	MW	23,0	89,6	20,6
		Max	26,6	91,2	24,0
		Min	20,6	86,2	17,7
Zuckerrüben	8	MW	24,0	84,3	20,3
		Max	26,3	97,0	25,5
		Min	21,5	76,5	17,6
Getreideschrot	2	MW	87,9	98,0	86,1
		Max	88,4	98,2	86,4
		Min	87,4	97,8	85,8
Rindergülle	21	MW	9,5	81,0	7,7
		Max	12,0	86,9	9,5
		Min	7,6	74,8	5,9
Rindermist	8	MW	28,0	77,5	21,7
		Max	37,2	88,1	32,8
		Min	20,3	67,2	14,7

Tabelle-A 4: Analysedaten der Gärgemischproben von PB22

Gärstufe	**n**		**TM**	**oTM**	**pH**	**TAN**	**FOS/TAC**	**Essigsäure-Äq.**	**Essigs.**	**Propions.**
			%	%	1	mg/L	1	mg/L	mg/L	mg/L
Fermenter 1	29	MW	9,0	79,4	7,7	1.562	0,41	1.004	760	263
		Max	11,3	83,1	8,1	1.793	0,59	2.449	1.496	1.150
		Min	6,8	73,7	7,3	1.292	0,27	179	151	34
Fermenter 2	29	MW	9,2	80,1	7,7	1.526	0,51	1.567	1.068	498
		Max	10,6	84,6	8,1	1.864	0,98	4.940	2.359	2.288
		Min	7,7	74,5	7,2	1.203	0,31	240	202	47
Gärrestlager	19	MW	6,7	73,0	7,8	2.346	0,21	142	138	3
		Max	8,2	77,2	8,0	2.599	0,33	525	516	35
		Min	4,4	69,5	7,4	1.912	0,16	0	0	0

Tabelle-A 5: Analysedaten der Einsatzstoffe von PB25

Substrat	**n**		**TM**	**oTM**	**oTM**
			% FM	% TM	% FM
Maissilage	18	MW	32,9	96,0	31,6
		Max	39,1	97,0	37,6
		Min	20,5	90,4	19,7
Grassilage	12	MW	30,5	88,7	27,1
		Max	49,3	92,4	44,6
		Min	25,2	81,0	21,8
Getreide-GPS	7	MW	28,5	93,0	26,6
		Max	32,5	94,7	30,8
		Min	23,0	89,4	21,2
Zuckerrüben	6	MW	25,4	93,3	23,7
		Max	26,4	97,1	24,2
		Min	25,1	89,4	22,6
Getreideschrot	1		89,1	97,8	87,2
Rindergülle	4	MW	8,6	80,8	6,9
		Max	10,6	84,3	8,2
		Min	7,5	77,2	6,2

Tabelle-A 6: Analysedaten der Gärgemischproben von PB25

Gärstufe	**n**		**TM**	**oTM**	**pH**	**TAN**	**FOS/TAC**	**Essigsäure-Äq.**	**Essigs.**	**Propions.**
			%	%	1	mg/L	1	mg/L	mg/L	mg/L
Hydrolyse	17	MW	9,3	83,5	6,0	1.594	-	12.636	5.966	1.660
		Max	10,7	86,8	6,6	2.173	-	15.895	8.077	3.576
		Min	7,8	80,3	5,4	844	-	7.246	3.458	38
Fermenter	20	MW	7,1	77,4	7,8	2.303	0,26	598	579	14
		Max	8,3	81,8	8,1	2.767	0,38	2.264	2.159	149
		Min	6,0	73,7	7,5	1.900	0,19	90	90	0
Nachgärer	18	MW	6,5	74,8	7,8	2.387	0,21	71	67	2
		Max	7,4	78,3	8,1	2.921	0,41	282	241	30
		Min	5,2	72,9	7,5	1.990	0,14	0	0	0

Tabelle-A 7: Analysedaten der Einsatzstoffe von PB27

Substrat	**n**		**TM**	**oTM**	**oTM**
			% FM	% TS	% FM
Maissilage	20	MW	41,0	97,0	39,7
		Max	48,3	98,1	46,8
		Min	33,8	94,9	32,6
Grassilage	16	MW	36,2	87,7	31,7
		Max	45,0	91,4	40,5
		Min	26,1	81,0	22,7
Zuckerrübenbrei	17	MW	15,9	83,1	12,3
		Max	25,3	90,0	20,4
		Min	6,0	75,5	0,0
Getreideschrot	3	MW	87,9	97,6	85,8
		Max	89,1	97,8	87,1
		Min	86,3	97,4	84,3
Maiskornschrot	13	MW	68,7	98,4	67,6
		Max	73,8	98,8	72,5
		Min	65,7	98,1	64,8

Tabelle-A 8: Analysedaten der Gärgemischproben von PB27

Gärstufe	**n**		**TM**	**oTM**	**pH**	**TAN**	**FOS/TAC**	**Essigsäure-Äq.**	**Essigs.**	**Propions.**
			%	%	1	mg/L	1	mg/L	mg/L	mg/L
Hydrolyse 1	6	MW	20,5	89,2	5,4	3.954	5,18	7.188	6.952	196
		Max	21,8	91,2	6,1	4.211	6,45	9.985	9.820	445
		Min	18,8	88,5	4,7	3.542	3,91	5.719	5.376	108
Hydrolyse 2	16	MW	19,0	88,9	4,8	3.875	-	10.502	10.194	193
		Max	21,9	90,5	5,7	4.397	-	14.788	14.558	522
		Min	16,4	87,2	4,4	3.451	-	4.922	4.824	86
Fermenter	20	MW	9,9	74,8	8,1	5.198	0,24	511	404	107
		Max	12,4	81,0	8,2	5.667	0,32	963	787	618
		Min	9,1	71,2	7,9	3.855	0,18	304	259	37
Festbett-reaktor 2	19	MW	11,9	66,3	8,1	5.328	0,22	332	175	171
		Max	15,3	75,4	8,6	5.890	0,29	2.397	587	2.686
		Min	10,4	52,3	7,7	3.920	0,18	61	61	n.n.

Tabelle-A 9: Analysedaten der Einsatzstoffe von PB28

			% FM	% TS	% FM
		MW	35,6	96,7	34,5
Maissilage	17	Max	40,3	97,7	39,1
		Min	32,1	95,7	30,8
		MW	21,4	91,3	19,6
Roggen - GPS	3	Max	22,4	92,9	20,6
		Min	20,4	88,9	18,1
		MW	23,9	85,8	20,5
Zuckerrüben	11	Max	29,9	97,1	23,6
		Min	20,6	61,8	14,5
		MW	53,4	85,5	45,8
Putenmist	15	Max	73,7	88,1	63,2
		Min	32,1	81,3	26,9

Tabelle-A 10: Analysedaten der Gärgemischproben von PB28

Gärstufe	n		TM	oTM	pH	TAN	FOS/ TAC	Essigs. Äquivalent	Essig-säure	Propion-säure
			%	%		mg/kg	.	mg/kg	mg/kg	mg/kg
		MW	16,2	67,8	8,1	3843	0,38	2565	656	2236
Fermenter	27	Max	19,4	78,1	8,3	5067	0,66	6465	2146	6851
		Min	11,6	0,0	7,8	3100	0,23	286	220	0
		MW	12,7	71,6	8,2	4884	0,22	361	159	205
Nachgärer	15	Max	14,4	75,2	8,5	5418	0,40	2934	576	2512
		Min	11,1	64,6	8,0	4353	0,17	58	58	0

Tabelle-A 11: Zusammenstellung wichtiger (mittlerer) verfahrenstechnischer Kennwerte der Pilotbetriebe; falls vorhanden, sind als Referenz Daten aus vorhergehendem Monitoring aufgeführt; Kursivdruck: Werte wurden nicht über den gesamten Auswertungszeitraum ermittelt, Kursivdruck in Rot: Werte konnten nicht direkt gemessen werden und wurden daher rechnerisch ermittelt bzw. abgeschätzt.

		PB08_2014	**PB08_aktuell**	**PB22_2014**	**PB22_aktuell**	**PB25_2014**	**PB25_aktuell**	**PB27**	**PB28**
Auswertungszeitraum	d	365	352	365	1095	365	700	730	1029
davon Tage mit tatsächl. ZR-Einsatz	d	0	137	53	253	0	279	679	522
Arbeitsvolumen Stufe 1	m³	1.800		220		85		140	1.400
Arbeitsvolumen Gesamt	m³	4.300		1620*		1.385		1.660	2.800
Gesamter FM-Eintrag	t/d	30,0	20,7	18,9	22,4	13,5	17,0	11,5	32,5
Maissilage	t/d	22,7	11,9	2,4	2,8	4,5	5,1	3,4	12,2
Grassilage	t/d	5,3	3,4	0,47	0,19	2,2	2,7	0,43	
Zuckerrüben	t/d		1,7	0,16	0,31	0,47	0,71	2,8	7,3
Triticale-GPS	t/d	1,3	3,7	0,12	0,006	0,83			0,34
S.Gerste-GPS	t/d				0,08		0,94		
CCM	t/d	0,13	0,003	0,04				4,4	
Getreideschrot	t/d			0,18	0,28	0,46	0,91	0,46	
Gülle (Rind)	t/d	0,6		14,8	17,9	4,9	5,9		0,22
Gülle (Schwein)									3,3
Mist (Rind)	t/d			0,66	0,75				
Mist (Pute)									9,1
Sonstiges	t/d				0,06	0,13	0,71		
Frischwasserzugabe	m³/d	1,3	0,1						
Gesamter oTM-Eintrag	t/d	9,0	6,5	2,2	2,8	2,6	4,3	5,2	10,6
oTM-Raumbelastung Fermentersystem	kg/(m³ d)	2,1	1,5	1,4	1,8	1,9	3,1	3,1	3,8
Hydraul. Verweilzeit Fermentersystem	d	143	208	86	72	103	82	147	86
CH4-Gehalt im Biogas	%	51,3	49,7	51,6	*51,1*	58,9	59,1	53,1	*50,3*
H2S-Gehalt im Biogas	ppm	40	37	212	*291*	116	117	n.v.	n.v.
Gasproduktionsrate	m³/d	8.729	9.197	1.275	1.261	1.959	2.301	4.240	6.409
Methanproduktionsrate	m³/d	4.469	4.575	658	645	1.154	1.360	2.252	*3.224*
Methanproduktivität Fermentersystem	m³/(m³ d)	1,0	1,1	0,41	0,40	0,83	1,0	1,3	*1,2*
Gasausbeute (Normbed.) aus FM	m³/t	291	444	67	56	146	136	370	197
Methanausbeute (Normbed.) aus FM	m³/t	149	221	35	29	86	80	197	*99*
Gasausbeute (Normbed.) aus oTM	m³/t	967	1.419	571	445	756	537	808	604
Methanausbeute (Normbed.) aus oTM	m³/t	495	706	257	227	445	318	429	*304*

		PB08_2014	PB08_aktuell	PB22_2014	PB22_aktuell	PB25_2014	PB25_aktuell	PB27	PB28
Stromeinspeisung	kWh/d	15.232	16.798	2.449	2.357	4.198	4.792	9.025	12.122
Stromerzeugung	kWh/d	16.504	18.391	2.449	2.357	4.198	4.792	9.025	12.122
Brutto-Stromausbeute aus FM	kWh/t	507		811		129		105	312
Brutto-Stromausbeute aus oTM	kWh/t	1.687		2.591		1.097		831	1.619
Verstromungsfaktor Biogas	kWh/m³	1,75	1,83	1,92	98,00	2,14	2,08	380,00	490,00
Installierte elektr. Leistung	kW	750	1150	103	103	190	290	400	799
Stromkennzahl	1	1,16	1,05	1,26	1,26	1,21	1,23	1,02	1,00
Elektr. Höchstbemessungsleistung	kW	750	713	103	98	190	276	380	490
Mittlere elektr. Leistung	kW	688	700	102	98	175	200	376	505
Elektr. Nutzungsgrad	%	37,0	40,3	37,3	36,7	36,5	35,3	40,2	37,7
Mittlere elektr. Auslastung (Höchstbemessungsleistung)	%	91,7	98,2	99,1	100,2	92,1	72,3	99,0	103,1
Strombedarf Gesamtanlage	kWh/d	1.272	1.594	229	261	662	823	918	896
~Substrataufbereitung	kWh/d	-	-	-	-	84	59	30	-
~~	kWh/t oTM	-	-	-	-	32,6	13,8	5,7	-
~Rühren Vorgrube/Hydrolyse	kWh/d	-	-	-	-	n.v.	n.v.	30	-
~Rühren Hauptgärbehälter	kWh/d	n.v.	74	n.v.	45	n.v.	n.v.	n.v.	93
~Rühren Nachgärbehälter	kWh/d	n.v.	52	n.v.	10	n.v.	n.v.	n.v.	36
~Rühren Gärbehälter insgesamt	kWh/d	n.v.	127	57	55	162	298	220	129
~~	kWh/t oTM	n.v.	6,1	3,0	2,4	62,5	69,5	41,9	12,1
~Rühren Gärrestlager	kWh/d	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	133
~Pumpen	kWh/d	n.v.	12	5	22	84	17	15	n.v.
~~	kWh/t oTM	n.v.	0,6	0,3	1,0	32,6	4,0	2,8	n.v.
~Eintrag	kWh/d	n.v.	4	26	53	174	162	383	n.v.
~~	kWh/t oTM	n.v.	0,2	1,4	2,4	66,9	37,9	73,0	n.v.
~Förder- & Rührtechnik	kWh/t FM	n.v.	143	4,7	5,8	37,5	31,6	56,5	n.v.
Ant. Förder- & Rührtechnik am Stromeigenbedarf	%	n.v.	9,0	n.v.	n.v.	76	65	70	n.v.
BHKW	kWh/d	n.v.	n.v.	n.v.	136	158	286	271	339
Anteiliger Stromeigenbedarf Gesamtanlage	%	7,7	8,7	9,4	11,1	15,8	17,2	10,2	7,4
Wärmeerzeugung	kWh/d	17.789	19.311	2.846	2.899	5.079	5.894	9.206	12.122
Anteiliger Wärmeeigenbedarf	%	14,7	14,7	21,8	21,8	12,1	13,2	15,0	15,0
Wärmeeigenbedarf	kWh/d	2.615	2.839	621	632	615	781	1.381	1.818
Wärmeeigenbedarf	kWh/t FM	87	137	33	28	46	46	121	56
Wärmeabsatz	kWh/d	14.438	15.673	1.752	2.610	4.245	4.818	5.243	6.079
Wärmeabsatzgrad	%	95	95	62	90	95	94	67	59