

7 Vergleichende Bewertung der Biogasanlagen

Ein wichtiges Ziel des BMP III war es, innovative Methoden zur übergreifenden Beschreibung und Bewertung des Anlagenzustands und Betriebserfolgs zu entwickeln, diese auf die untersuchten Biogasanlagen anzuwenden und deren Aussagekraft und Tauglichkeit für die Praxis zu beurteilen. Hierbei wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: (1) die vergleichende Bewertung der verschiedenen Anlagen im Sinne eines Benchmarkings und (2) die Bewertung einzelner Anlagen im Zeitverlauf, beispielsweise um den Erfolg von Repowering-Maßnahmen zu bewerten. Fall (1) ist insofern besonders anspruchsvoll, als hier Anlagen mit sehr unterschiedlicher Konfiguration zu vergleichen sind.

Die folgende Darstellung der Bewertungsergebnisse enthält im ersten Abschnitt eine Querschnittsauswertung und ein Ranking (horizontaler Anlagenvergleich) derjenigen Biogasanlagen im Messprogramm, welche mit der Basismethode ausgewertet werden konnten. Im zweiten Abschnitt wird die Wirkung von Repowering-Maßnahmen an einzelnen Anlagen bewertet (vertikaler Anlagenvergleich).

Das Benchmarksystem ist derzeit nur auf Betriebe anwendbar, welche das Biogas in Blockheizkraftwerken verwerten. Damit eine Auswertung möglich ist, muss zudem von der zu bewertenden Biogasanlage und den zugehörigen BHKW ein Mindestmaß an gemessenen Daten verfügbar sein. Für einzelne Parameter können gegebenenfalls Ersatzwerte durch Schätzung ermittelt werden. Nach gründlicher Auswertung und teilweiser Ergänzung der Datenbank für die Biogasanlagen im Messprogramm stand fest, dass 48 von den insgesamt 61 untersuchten Biogasanlagen mit der Basismethode bewertet werden konnten. Einen detaillierten Überblick über die verfügbaren Messdaten und notwendige Ergänzungen gibt Tabelle 7-6.

7.1 Querschnittsauswertung und Ranking von 61 BGA

Für die Querschnittsauswertung wurden alle 48 zu bewertenden Anlagen anhand von sieben Kriterien (vgl. Abschnitt 3.4.2.2) den vier Effizienzklassen „sehr gut“/ „gut“/ „ausreichend“/ „ungenügend“ zugeordnet (darunter sind diejenigen Anlagen doppelt vertreten, welche über zwei Jahre gemessen wurden). Diese Bewertung nach Effizienzklassen kann dazu dienen, eine erste Einschätzung der Schwachstellen bzw. des Verbesserungsbedarfs der Biogasanlagen hinsichtlich folgender Kriterien vorzunehmen:

- Ausschöpfung des Gasertragspotentials der Einsatzstoffe: Relative Methanausbeute,
- Produktivität des Fermentersystems: Methanproduktivität,
- Zielerreichung bei der Ausnutzung der elektrischen Bemessungsleistung der Gasverwertungseinrichtung: Leistungsausnutzung und
- Bereitstellung von Nutzenergie aus der Verwertung des erzeugten Biogases: Methan-Nutzungsgrad.

Die Effizienzklassen wurden für die Zusammenstellung der Querschnittsbewertung in Tabelle 7-1 mit Farbcodes versehen, so dass bereits mit wenigen Blicken ein Eindruck vom Anlagenzustand bzw. den Schwachstellen gewonnen werden kann. Diese Bewertungstabelle für die 48 Biogasanlagen zeigt sich „bunt“.

Tabelle 7-1: Übersicht des Bewertungsergebnisses mit der Basismethode für 48 Biogasanlagen im Messprogramm nach Effizienzklassen

BGA ID	Relative Biogasausbeute	Methanproduktivität	Biogasproduktion	Leistungsausnutzung	Methan-Nutzungsgrad	Biogasverwertung	Anlageneffizienz zusammengefasst
01	gut	ausreichend	gut	sehr gut	gut	gut	gut
02	gut	ausreichend	gut	ausreichend	gut	gut	gut
03	gut	ausreichend	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
04	gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	gut	gut	ausreichend
05	ungenügend	ungenügend	ungenügend	ausreichend	ausreichend	ausreichend	ungenügend
06	gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut
08	gut	ausreichend	gut	sehr gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend
09	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend
10	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	gut
11	ausreichend	ausreichend	ausreichend	ausreichend	gut	ausreichend	ausreichend
12	gut	ausreichend	gut	sehr gut	gut	ausreichend	gut
13	sehr gut	gut	sehr gut	gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend
14	gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend
16	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend
17	sehr gut	gut	sehr gut	ausreichend	gut	ausreichend	ausreichend
18	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend	gut	ausreichend	gut
20	gut	ausreichend	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
21	gut	gut	gut	ungenügend	sehr gut	gut	gut
22	sehr gut	ausreichend	gut	ausreichend	gut	ausreichend	gut
23	ungenügend	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	gut	ungenügend
24	ausreichend	ungenügend	ungenügend	ungenügend	ausreichend	ausreichend	ungenügend
25	gut	ausreichend	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
26	gut	ausreichend	gut	gut	gut	gut	gut
27	ungenügend	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	gut	ungenügend
28	sehr gut	ausreichend	gut	ausreichend	ausreichend	ungenügend	ausreichend
29	gut	gut	gut	sehr gut	ungenügend	ausreichend	ausreichend
30	ausreichend	ungenügend	ungenügend	ausreichend	ungenügend	ungenügend	ungenügend
31	gut	ausreichend	gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend	ungenügend
32	sehr gut	ungenügend	ausreichend	gut	sehr gut	gut	ausreichend
33	gut	ausreichend	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
36	sehr gut	gut	gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend	ausreichend
37	gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
38	gut	sehr gut	gut	ausreichend	gut	ausreichend	gut
39	gut	gut	gut	sehr gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend
40	gut	ausreichend	gut	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend
41	ausreichend	ausreichend	ausreichend	sehr gut	ausreichend	ausreichend	ausreichend
43	sehr gut	ungenügend	ausreichend	ausreichend	gut	ausreichend	ausreichend
47	gut	gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut
48	sehr gut	ausreichend	gut	gut	sehr gut	gut	gut
49	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend
50	sehr gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend
51	gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut
52	gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	sehr gut	sehr gut	ausreichend
54	gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
56	gut	ungenügend	ausreichend	ungenügend	sehr gut	gut	ausreichend
57	gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ausreichend
58	gut	ausreichend	gut	gut	sehr gut	gut	gut
59	gut	ungenügend	ausreichend	sehr gut	ungenügend	ungenügend	ungenügend

Tabelle 7-2 zeigt die absoluten Häufigkeiten der Zuordnung zu den vier Effizienzklassen für die einzelnen Bewertungskriterien. Betrachtet man die Biogasproduktion, so erhalten 29 von 48 Anlagen mindestens die Bewertung „gut“, weisen also entsprechend der hier verwendeten Nomenklatur keine signifikanten Schwachstellen auf; für die Biogasverwertung ist dies nur für 24 von 48 Anlagen der Fall

Tabelle 7-2: Zahlenmäßige Beschreibung des Bewertungsergebnisses nach Tabelle 7-1

	sehr gut	gut	ausreichend	ungenügend
Relative Biogasausbeute	13	28	4	3
Methanproduktivität	7	9	17	15
Biogasproduktion	3	26	14	5
Leistungsausnutzung	26	5	13	4
Methan-Nutzungsgrad	17	14	8	9
Biogasverwertung	10	14	15	9
Effizienz insgesamt	0	20	17	11

Der „Biogas Doc“ errechnet neben der Effizienzklasse jeweils einen sogenannten Effizienzwert für die Kategorien „Biogasproduktion“, „Biogasverwertung“ sowie „Effizienz insgesamt“. Der Effizienzwert ist auf eine Skala von 0 (geringstmögliche Effizienz) bis 100 (höchststmögliche Effizienz) normiert. Anhand dieser Effizienzwerte wurde ein Ranking der Biogasanlagen im Messprogramm vorgenommen. Im Übrigen kann jede Biogasanlage, die mit dem „Biogas Doc“ (in derselben Version) bewertet wird, in dieses Ranking eingeordnet werden.

In den folgenden Balkendiagrammen für das Ranking der Anlagen fällt zunächst eine Clusterung der Bewertungsergebnisse auf. Dies erscheint nicht wünschenswert, bedeutet es doch, dass viele der Anlagen in Bezug auf die Effizienz nicht eindeutig voneinander unterschieden werden können. Gleichzeitig ist dies ein Effekt der begrenzten Auflösung der Methode aufgrund einerseits der realistischen Berücksichtigung von Messungenauigkeiten und andererseits der programmiertechnischen Umsetzung.

Für die Biogasproduktion setzen sich im Ranking mit den als sehr gut bewerteten BGA 18 und 17 zwei Spitzenreiter ab (vgl. Abbildung 7-1). Am unteren Ende der Effizienzskala rangieren drei Anlagen mit Effizienzwerten von lediglich ca. 13 bis 14: Grund hierfür ist in allen drei Fällen eine ungenügende Biogasausbeute von 90 % oder weniger. Auffällig ist die Häufung von Biogasanlagen mit einem Effizienzwert von 62,5 (17 Anlagen) bzw. 37,5 (elf Anlagen). Wie diese Häufungen im Detail zustande kommen, würde einer genauen Analyse der Methode bedürfen. Auf jeden Fall handelt es sich um einen Effekt der geringen Zahl von Effizienzklassen und der begrenzten numerischen Auflösung des Effizienzkennwerts.

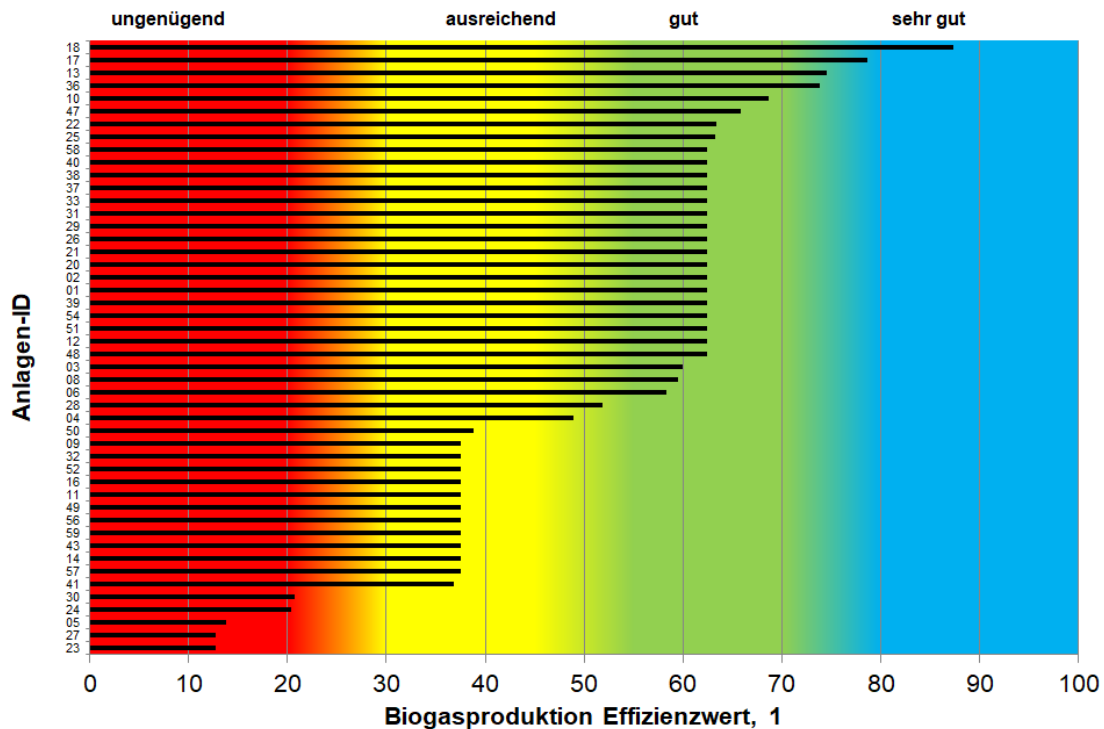


Abbildung 7-1: Ranking von 48 Biogasanlagen im Messprogramm für die Kategorie „Biogasproduktion“; die Anlagen sind nach Effizienzwert von oben nach unten absteigend angeordnet, die Farbverläufe in der Zeichnungsfläche illustrieren die Effizienzklassen

Aufgrund der oben beschriebenen Priorisierung des Bewertungskriteriums Relative Biogasausbeute (RBY) innerhalb der Kategorie Biogasproduktion kann das Manko der ungenügenden Biogasausbeute von BGA 23 und 27 auch durch deren sehr gute Methanproduktivität nicht kompensiert werden (vgl. Tabelle 7-1). Die ungenügende Biogasausbeute ist im Fall von BGA 27 keine Überraschung, da es sich hierbei um eine einstufige Gärstrecke mit offener Gärrestlagerung handelt. Damit bleibt nicht nur ein nennenswerter Anteil des energetischen Potentials der Einsatzstoffe ungenutzt, sondern es entsteht durch die Freisetzung signifikanter Mengen von Methan während der Gärrestlagerung auch eine erhebliche negative Umweltwirkung. BGA 23 weist die höchste oTS-Raumbelastung aller Anlagen im

Messprogramm auf sowie eine vergleichsweise kurze hydraulische Verweilzeit in der dreistufigen Gärbehälterkaskade, womit sich die unterdurchschnittliche Biogasausbeute plausibel begründen lässt. Bei BGA 05 muss von einem signifikanten nicht quantifizierbaren Gasverlust aus der offenen Hydrolysestufe ausgegangen werden.

Von den 26 Anlagen mit guter Bewertung der Biogasproduktion finden sich einerseits 15 mit einer lediglich ausreichenden, andererseits vier mit einer sehr guten Bewertung der Methanproduktivität (MPR). Die Methanproduktivität korreliert mit der oTS-Raumbelastung (vgl. Abbildung 6-37 in Kapitel 6.2.6.2). Betrachtet man für alle Anlagen das Verhältnis von Methanproduktivität und oTS-Raumbelastung, so lässt sich erwartungsgemäß eine gewisse Clusterung der jeweiligen Anlagen mit sehr guter MPR bei hoher Raumbelastung oberhalb von $3,8 \text{ kg}_{\text{oTS}}/(\text{m}^3 \text{ d})$ und ausreichender MPR bei mittlerer Raumbelastung im Bereich von $1,7$ bis $2,7 \text{ kg}_{\text{oTS}}/(\text{m}^3 \text{ d})$ feststellen (vgl. Abbildung 7-2).

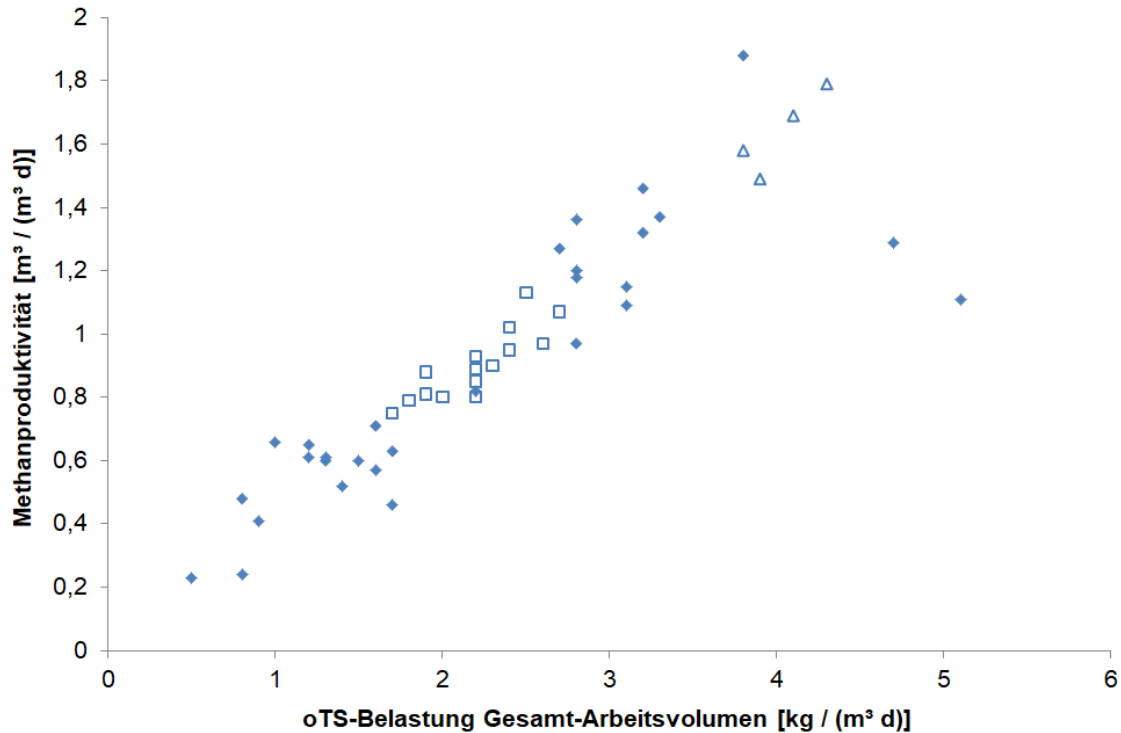


Abbildung 7-2: Verhältnis von oTS-Raumbelastung und Methanproduktivität des gesamten Arbeitsvolumens des Fermentersystems, d. h. exklusive eventueller Gärrestlager mit Gaserfassung) für 48 Biogasanlagen; hervorgehoben sind von den Anlagen mit guter Bewertung der Biogasproduktion diejenigen mit ausreichender (Quadrate ohne Füllung) bzw. mit sehr guter (Dreiecke ohne Füllung) Bewertung der Methanproduktivität

Für die Biogasverwertung ist zunächst festzustellen, dass der Anteil der Anlagen mit einerseits sehr guter oder andererseits ungenügender Bewertung deutlich größer ist als für die Biogasproduktion, während das Mittelfeld hier dünner besetzt ist.

Tabelle 7-2 zeigt die absoluten Häufigkeiten der Zuordnung zu den vier Effizienzklassen für die einzelnen Bewertungskriterien. Betrachtet man die Biogasproduktion, so erhalten 29 von 48 Anlagen mindestens die Bewertung „gut“, weisen also entsprechend der hier verwendeten Nomenklatur keine signifikanten Schwachstellen auf; für die Biogasverwertung ist dies nur für 24 von 48 Anlagen der Fall

Tabelle 7-2 und Abbildung 7-3). Dem Regelwerk entsprechend führt ein ungenügender Methan-Nutzungsgrad (MUR), wie er in neun Fällen festgestellt wurde, stets zu einem „ungenügend“ für die Biogasverwertung (vgl. Tabelle 7-1).

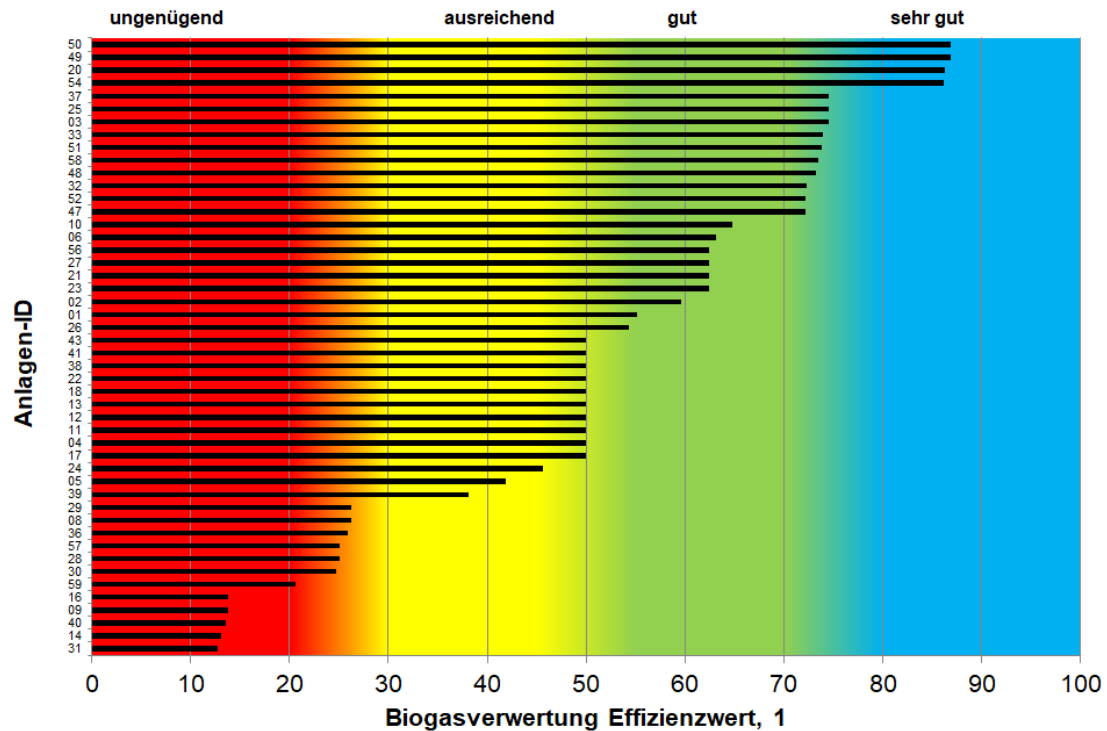


Abbildung 7-3: Ranking von 48 Biogasanlagen im Messprogramm für die Kategorie „Biogasverwertung“; die Anlagen sind nach Effizienzwert von oben nach unten absteigend angeordnet

Klassifiziert man nach MUR, so erzielen 29 von 48 Biogasanlagen einen Wert von über 55 %. Im Vergleich zu den Werten des MUR, die von der LfL im Rahmen des Monitorings der Bayerischen Pilot-Biogasanlagen von 2012 bis 2014 erhoben wurden, zeigt sich für das BMP III damit ein deutlich größerer Anteil von Anlagen mit einem Methan-Nutzungsgrad von 55 bis unter 65 %, jedoch ein geringerer Anteil mit einem MUR von 65 % oder höher (vgl. Abbildung 7-4).

Das Histogramm für die elektrische Leistungsausnutzung in Abbildung 7-5 zeigt ein deutlich anderes Bild als für die Arbeitsausnutzung (vgl. Abbildung 6-8). Die Hälfte der Anlagenbetreiber erzielte hier mit über 95 % eine sehr effektive Ausnutzung des Vergütungsrahmens für die Stromerzeugung.

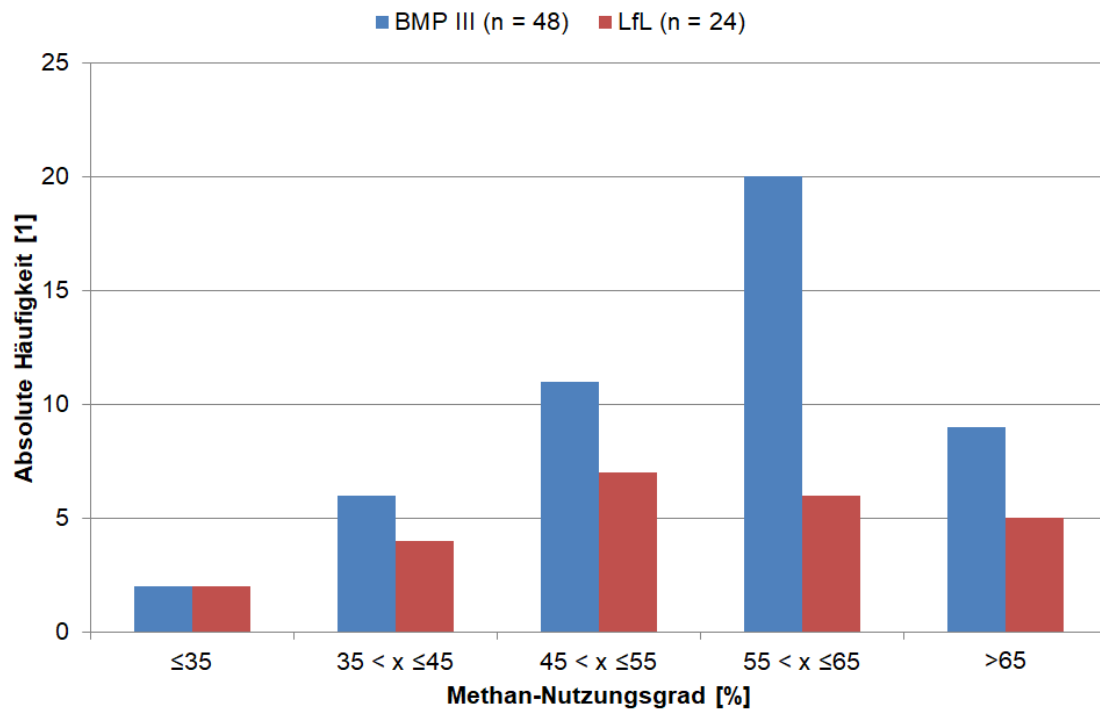


Abbildung 7-4: Histogramme des Methan-Nutzungsgrades für 48 Biogasanlagen im Messprogramm bzw. 24 Biogasanlagen im Biogas-Monitoring der LfL (Ebertseder et al., 2012; Streicher et al., 2016)

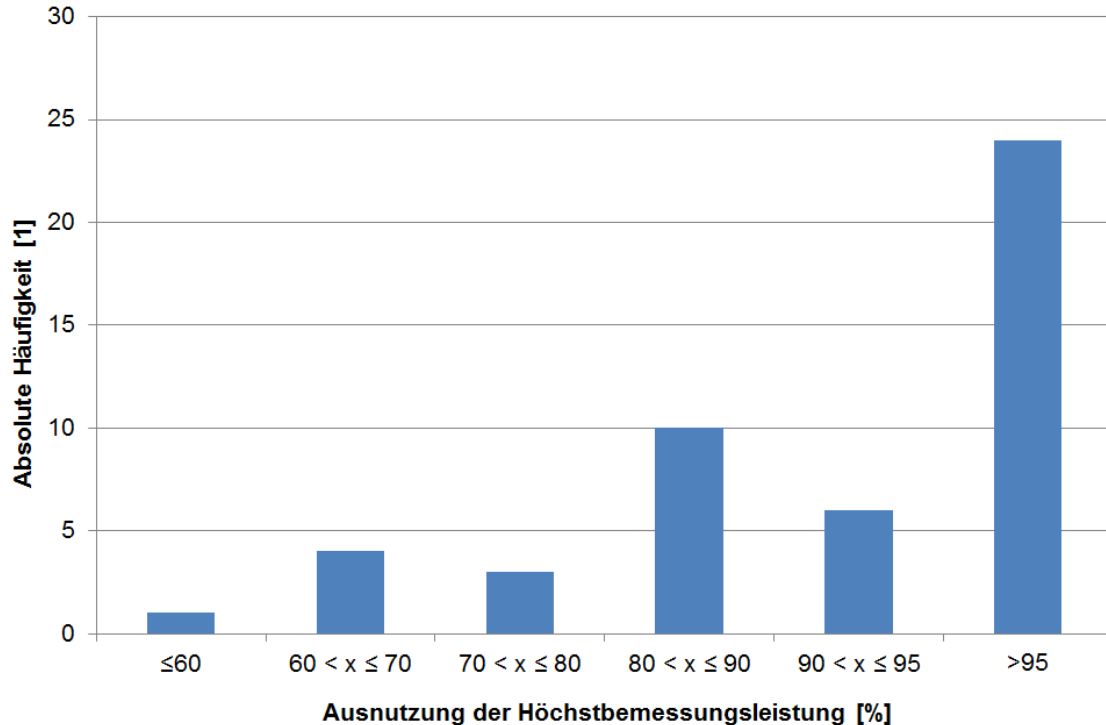


Abbildung 7-5: Histogramm der Leistungsausnutzung (= Ausnutzung der elektrischen Höchstbemessungsleistung) für 48 Anlagen im Messprogramm

Auch für die Biogasverwertung zeigt sich eine auffällige Häufung von Anlagen: in diesem Fall sind es zehn Anlagen mit einem Effizienzwert von 50,0 (vgl. Abbildung 7-3). In der zusammenfassenden Bewertung (vgl. Abbildung 7-6) ergeben sich Häufungen bei Effizienzwerten von 62,5 (zwölf Anlagen), 37,5 (neun Anlagen) und 12,7 (acht Anlagen); Effizienzwerte von 50,0 bzw. 50,1 erreichen sechs Anlagen.

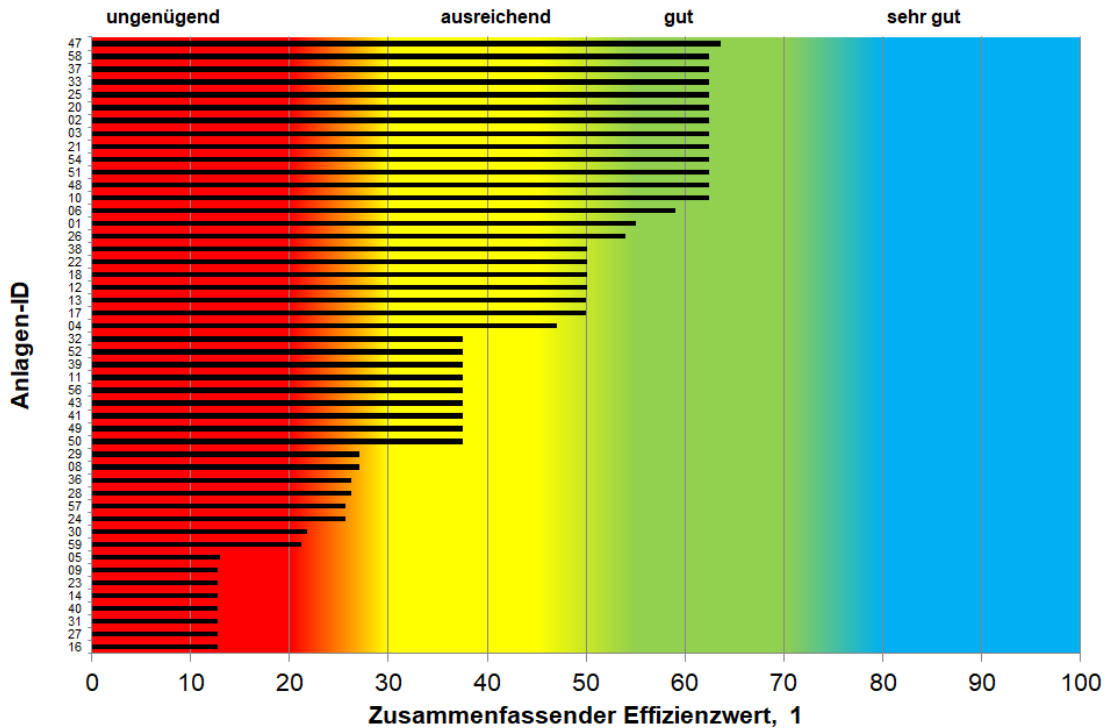


Abbildung 7-6: Ranking von 48 Biogasanlagen im Messprogramm für die „zusammengefasste Anlageneffizienz“; die Anlagen sind nach Effizienzwert von oben nach unten absteigend angeordnet

Für die vorliegende Betrachtung wichtiger als das noch aufzuklärende Phänomen der Häufungen in der verwendeten Basismethode, ist das Ergebnis, dass aufgrund der „strengen“ Regeln für die Zusammenfassung der Bewertungen keine der Biogasanlagen im Messprogramm insgesamt ein „sehr gut“ erhält. Immerhin 19 der 48 bewerteten Anlagen erzielen jedoch ein „gut“, andererseits ergibt sich in zwölf Fällen ein „ungenügend“ (vgl. Tabelle 7-2).

Gemäß der Interpretation der Effizienzklassen sind bei einem „ungenügend“ schwerwiegende Mängel an der Anlage zu vermuten und bei einem „ausreichend“ immer noch signifikante Schwachstellen. Um diesen Schwachstellen im Einzelnen auf die Spur zu kommen, sind natürlich detailliertere Informationen von den jeweiligen Anlagen sowie ein sehr gutes Verständnis der gesamten Prozesskette der Biogaserzeugung und -verwertung erforderlich. An dieser Stelle kann nur auf einige auffällige Schwachstellen anhand der Gesamtschau der Biogasanlagen im Messprogramm eingegangen werden.

Die Methanproduktivität, MPR ist dasjenige Bewertungskriterium mit dem schlechtesten Bewertungsprofil in der Querschnittsauswertung (vgl. Tabelle 7-2). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Bewertung mit der Basismethode die MPR zunächst „nivelliert“ wird, um den Einfluss der Substratauswahl zu verringern (vgl. Kapitel 3.4.2.2). Fälle mit guter Bewertung sowohl der Methanproduktivität als auch der Biogasproduktion sind insgesamt relativ selten (sieben Anlagen), da diese beiden Kennwerte prinzipiell gegenläufig sind. Dies wird deutlich an denjenigen zwölf Anlagen, die ein „gut“ oder „sehr gut“ für die relative Biogasausbeute erzielen, jedoch aufgrund einer sehr geringen Methanproduktivität nur eine „ausreichende“ Gesamtbewertung der Biogasproduktion erhalten. Bei diesen Anlagen sollte ein gewisser Spielraum bestehen, das vorhandene Fermentationsvolumen produktiver zu nutzen, wenn entsprechende Substrate verfügbar sind.

Die methodische Schwierigkeit, bei zunehmender Flexibilisierung der Stromerzeugung einen vergleichbaren Ausnutzungsgrad für das BHKW zu berechnen, konnte hier nur teilweise

überwunden werden. Auch bei Heranziehung der „Leistungsausnutzung“ auf Basis der elektrischen Höchstbemessungsleistung werden einzelne Anlagen systematisch benachteiligt. Es werden deshalb zunächst diejenigen vier Anlagen, die demzufolge ein „ungenügend“ für die Leistungsausnutzung erhalten, näher betrachtet. Wie Tabelle 7-3 zeigt, ist das Bewertungsprofil dieser vier Anlagen deutlich verschieden.

Tabelle 7-3: Vergleich der vier Biogasanlagen im Messprogramm mit ungenügender Bewertung der Leistungsausnutzung

ID	Gesamt- oTS-B _R , [kg/(m ³ d)]	Spezif. P _{el} , [kW/m ³]	Leistungs- ausnutzung [%]		Methan- Nutzungs- grad [%]		Biogas- verwertung		Insgesamt	
21	3,1	0,32	61	ungenüg.	63	sehr gut	gut	62,5	gut	62,5
24	1,7	0,13	64	ungenüg.	50	Aus- reich.	aus- reich.	45,6	ungenüg.	25,6
31	2	0,31	50	ungenüg.	43	ungenüg.	ungenüg.	12,7	ungenüg.	12,7
56	1,4	0,14	61	ungenüg.	63	sehr gut	gut	62,5	ausreich.	37,5

Die Anlagen 21 und 56 weisen einen sehr guten Methan-Nutzungsgrad auf und erzielen wegen der Priorisierung dieses Bewertungskriteriums insgesamt ein „gut“ für die Biogasverwertung. Anlage 24 erhält ein „ausreichend“, während Anlage 31 das „Schlusslicht“ für den Bereich der Biogasverwertung markiert. (Effenberger et al., 2008) schlagen für ein simples, orientierendes Benchmarking eine Betrachtung der spezifischen installierten elektrischen BHKW-Leistung und der erzielten Arbeitsausnutzung vor. Verwendet man hier die Bemessungsleistung ergibt sich für die 48 zu vergleichenden Anlagen der in Abbildung 7-7 gezeigte Zusammenhang mit der Methanproduktivität: Diese ist für alle vier hier betrachteten Anlagen unterdurchschnittlich. Es wäre daher – insbesondere für die vergleichsweise moderat belasteten Anlagen 24 und 56 – zu prüfen, ob es Defizite beim Gärprozess gibt und dieser produktiver gestaltet werden könnte.

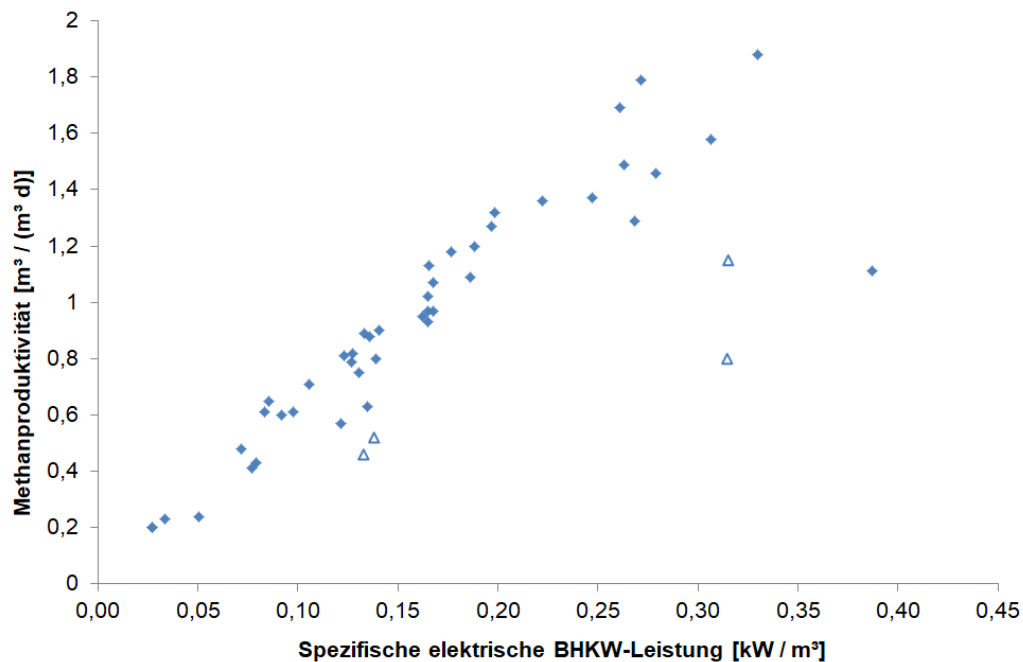


Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der spezifischen elektrischen Bemessungsleistung je Kubikmeter Arbeitsvolumen und der Methanproduktivität für 48 Biogasanlagen im Messprogramm; die vier Anlagen mit ungenügender Bewertung der BHKW-Leistungsausnutzung sind hervorgehoben (nicht ausgefüllte Dreiecke)

7.2 Beurteilung ausgewählter Repowering-Maßnahmen

Um Repowering-Maßnahmen mittels der im BMP III verwendeten Bewertungsmethode zuverlässig beurteilen zu können, mussten zwei Voraussetzungen gegeben sein: (1.) Es musste eine solchermaßen ausgewiesene Maßnahme während der Projektlaufzeit durchgeführt werden und (2.) es mussten sowohl vor als auch nach Durchführung derselben über einen ausreichend langen Zeitraum die benötigten Messdaten verfügbar sein. Dies war in zwei Fällen gegeben, welche im Folgenden dargestellt werden.

Einen weiteren interessanten Fall stellt BGA 19 dar, wo zwischenzeitlich eine Ultraschalldesintegrationseinheit nachgerüstet wurde. Von dieser Anlage fehlten jedoch verwertungsseitig die erforderlichen Daten, da der größte Teil des Rohbiogases nicht vor Ort verwertet, sondern an Dritte verkauft wurde. Die Kennwerte für die Biogasproduktion sowie die gärbioologischen Prozessindikatoren laut Datenblatt (vgl. Kapitel 15.18.3) bieten beim gegebenen Substratmix keine Veranlassung für eine solche zusätzliche Substrataufbereitung. Allerdings ist der anteilige Eigenstrombedarf sehr hoch und es wäre zu prüfen, ob durch die Ultraschalldesintegration der Rührenergiebedarf signifikant gesenkt werden konnte.

7.2.1 BGA13 / 43

Grundlage für diese Betrachtung sind die Zeiträume Oktober 2016 bis September 2017 (365 Tage; BGA 13) bzw. Oktober 2017 bis September 2018 (365 Tage; BGA 43). Hervorzuheben ist, dass BGA 13 mit 73 % Gülleanteil zwar vergütungsseitig keine „Gülleanlage“ darstellt, jedoch einen der höchsten Massenanteile von Gülle im Substratmix unter den BMP III-Anlagen aufweist. Alle während der Beobachtungsperiode erhobenen Daten deuten darauf hin, dass der Gärprozess in dieser Anlage durchweg stabil verlief (vgl. Kapitel 15.12.3). Der Ausgangsstatus der Biogasanlage zeigt sich dementsprechend sehr gut (74,5) für die Biogasproduktion: BGA 13 rangiert hier im Ranking an dritter Stelle. Für die Biogasverwertung erhält die Anlage ein „gutes ausreichend“ (50,0) (vgl. Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Anlagenstatus von BGA 13 versus BGA 43 nach der Basismethode

ID	13	43
Relative Biogasausbeute	sehr gut	sehr gut
Methanproduktivität	gut	ungenügend
Biogasproduktion	74,5 ⇒ sehr gut	37,5 ⇒ ausreichend
Leistungsausnutzung [%]	95 ⇒ gut	83 ⇒ ausreichend
Methan-Nutzungsgrad [%]	53 ⇒ ausreichend	53 ⇒ gut
Biogasverwertung	50 ⇒ ausreichend	50 ⇒ ausreichend
Zusammenfassende Bewertung	50 ⇒ ausreichend	37,5 ⇒ ausreichend

Die Anlage wurde im Frühjahr 2017 durch einen Nachgärbehälter erweitert, der im November 2017 in Betrieb genommen wurde. BGA 43 weist damit eine dreistufige Gärbehälterkaskade gegenüber einer zweistufigen bei BGA 13 auf. Ausgewiesenes Ziel dieser Erweiterung des Fermentationsvolumens war die Verringerung der Emissionen aus dem offenen Gärrestlager und die Steigerung der Gasausbeute. Was die Gasausbeute angeht, zeigt die sehr gute Bewertung mit dem Biogas Doc hierfür allerdings keinerlei Notwendigkeit.

Weiterhin sollte sukzessive der Einsatz von Rinderfestmist ermöglicht werden, um die Mais-Ganzpflanzensilage teilweise zu ersetzen. Dies führte allerdings zu einer Überlastung der Rührtechnik im Hauptgärbehälter und in der Folge einem insgesamt sehr unruhigen Betrieb während des zweiten Beobachtungszeitraums (vgl. Kapitel 15.42.3). Logischerweise errechnet sich mit der Erweiterung des Arbeitsvolumens um etwas mehr als ein Drittel zunächst ein deutlicher Rückgang der Methanproduktivität von einem vergleichsweise hohen auf ein sehr geringes Niveau. Die beschriebenen technischen und resultierenden gärbioologischen Probleme beeinträchtigten zudem die Gasproduktion: die Biogasrate ging von 7.231 m³/d (BGA 13) auf

6.149 m³/d (BGA 43) zurück. Folglich sank auch die Leistungsausnutzung der BHKW deutlich (vgl. Tabelle 7-4). Damit führte die Maßnahme nicht zum gewünschten Erfolg, sondern es wurden im Gegenteil weitere Maßnahmen zur Stabilisierung bzw. Optimierung des Betriebes notwendig. Um den langfristigen Erfolg des Repowerings dieser Anlage letztendlich beurteilen zu können, hätte die Anlage weiter beobachtet werden müssen. Soweit die technischen Probleme dauerhaft gelöst werden können und die Anpassung der Gärbiologie an den veränderten Substratmix gelingt, ist von einer Zielerreichung auszugehen. Die sehr moderate Raumbelastung von BGA 43 nach der Erweiterung bietet ausreichenden Spielraum für eine Steigerung der Fütterungsrate, um auch bei verändertem Substratmix das BHKW voll auszulasten.

7.2.2 BGA 26 / 58

Grundlage für diese Betrachtung sind die Zeiträume September 2016 bis Januar 2018 (518 Tage; BGA 26) bzw. Februar bis August 2018 (212 Tage; BGA 58). Die Repowering-Maßnahme auf dieser Anlage betraf die Biogasverwertung: Bis Januar 2018 wurde das erzeugte Biogas mit zwei baugleichen Gas-Otto-Motoren (P_{el} jeweils 400 kW) in Strom und Wärme umgewandelt. Dann wurde zusätzlich ein neues BHKW-Aggregat mit einer elektrischen Nennleistung von 901 kW in Betrieb genommen. Die Höchstbemessungsleistung der Anlage stieg hierdurch von 710 auf 750 kW an. Nach dem Einfahren des neuen Motors standen die alten BHKW-Aggregate ab April 2018 praktisch still, ehe diese im August im Zuge einer aufkommenden Destabilisierung des Gärprozesses zu Ungunsten der Auslastung des neuen Motors wieder hochgefahren wurden (Vgl. Kapitel 15.58.3).

Der Anlagenstatus vor der BHKW-Erweiterung (BGA 26) stellt sich insgesamt gut dar, wobei die Anlage sowohl für die Biogasproduktion als auch für die Biogasverwertung (knapp) ein „gut“ erhält. Mit der BHKW-Erweiterung ändert sich bei der Biogasproduktion nichts an der Bewertung. Dies bedeutet, dass die sich gegen Ende des Beobachtungszeitraums aufbauende gärbiologische Störungen von der auf Mittelwerten beruhenden Basismethode noch nicht detektiert wurden (vgl. Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Anlagenstatus von BGA 26 versus BGA 58 nach der Basismethode

ID	26	58
Relative Biogasausbeute	gut	gut
Methanproduktivität	ausreichend	ausreichend
Biogasproduktion	62,5 ⇒ gut	62,5 ⇒ gut
Leistungsausnutzung [%]	91 ⇒ gut	94 ⇒ gut
Methan-Nutzungsgrad [%]	56 ⇒ gut	61 ⇒ sehr gut
Biogasverwertung	54,3 ⇒ gut	73,5 ⇒ gut
Zusammenfassende Bewertung	54,0 ⇒ gut	62,5 ⇒ gut

Bei der Biogasverwertung verbessert sich BGA 58 gegenüber BGA 26 innerhalb der Effizienzklasse „gut“ um 19,2 Punkte beim Effizienzwert. (Die Bewertung „sehr gut“ wird knapp verfehlt) Dies ist der Steigerung des Methan-Nutzungsgrades aufgrund des höheren elektrischen Wirkungsgrades des neu angeschafften, leistungsstärkeren BHKW-Aggregates geschuldet. Insgesamt verbesserte sich die Anlage damit im Verlauf des Messprogramms innerhalb der Effizienzklasse „gut“ deutlich um 8,5 „Effizienzpunkte“.

Gemäß der hier verwendeten Bewertungsmethode weist die BGA 26 / 58 als erkennbare Schwachstelle lediglich eine leicht unterdurchschnittliche Methanproduktivität des großzügig dimensionierten Fermentationsvolumens auf. Es bestünde Spielraum, wenn entsprechend ertragsreiche Substrate verfügbar wären, die Raumbelastung etwas zu erhöhen und damit die Produktivität zu steigern. Alternativ könnte ein Teil der NawaRo durch tierische Wirtschaftsdünger ersetzt werden, um die Anlage bei in etwa gleichbleibender, moderater Produktivität, jedoch verringertem Aufwand für die Substratbereitstellung zu betreiben.

Tabelle 7-6: Übersicht über die Verfügbarkeit von Messdaten und gegebenenfalls Ersatzwerten für die Bewertung der Biogasanlagen im Messprogramm mit der Basismethode (1: ja/vorhanden; 0: nein/nicht vorhanden; schraffierte Felder: nicht zutreffend)

BGA Nr.		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
Auswertung ohne weiteres möglich?		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Auswertung nach Ergänzung möglich?		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
Datenbestand:																
Gärbehälter	Fermenter/1. Stufe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Nachgärer	1	1		1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
BHKW	in Besitz d. Betreibers?															
	Motor typ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Motorkennwerte	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	ggf. Zündölbedarf					1		1								1
	Stromerzeugung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Biogas	gemessene Menge	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	errechnete Menge	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Methangehalt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektr. Energie	Volleinspeisung (VE)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Überschusseinsp. (ÜE)															
	Einspeisemenge VE/ÜE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	VE: Eigenbedarf/Bezug	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	ÜE: Eigenbedarf															
Wärmeenergie	Absatz	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
	Eigenbedarf gemessen	1	1	0	0	0	0		0	0	0	1	1	1	1	0
	Eigenbedarf geschätzt	0	0	1	1	1	1		1	1	1	0	0	0	0	1

BGA Nr.		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Auswertung ohne weiteres möglich?		1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Auswertung nach Ergänzung möglich?		1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Datenbestand:																
Gärbehälter	Fermenter/1. Stufe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Nachgärer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1
BHKW	in Besitz d. Betreibers?															
	Motor typ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Motorkennwerte	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	ggf. Zündölbedarf								1				1		1	
	Stromerzeugung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Biogas	gemessene Menge	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0
	errechnete Menge	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Methangehalt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektr. Energie	Volleinspeisung (VE)	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
	Überschusseinsp. (ÜE)									1	1					
	Einspeisemenge VE/ÜE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	VE: Eigenbedarf/Bezug	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
	ÜE: Eigenbedarf									1	1					
Wärmeenergie	Absatz	1	1	1		1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	Eigenbedarf gemessen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Eigenbedarf geschätzt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

BGA Nr.		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Auswertung ohne weiteres möglich?		1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
Auswertung nach Ergänzung möglich?		1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
Datenbestand:																
Gärbehälter	Fermenter/1. Stufe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Nachgärer	1	1	1		1		1	1		1	1	1	1	1	1
BHKW	in Besitz d. Betreibers?															
	Motortyp	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Motorkennwerte	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	ggf. Zündölbedarf	1			1											
	Stromerzeugung	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Biogas	gemessene Menge	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
	errechnete Menge	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	Methangehalt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektr. Energie	Volleinspeisung (VE)	1	1	1	1		1	1	1		1		1	1	1	
	Überschusseinsp. (ÜE)									1		1				
	Einspeisemenge VE/ÜE	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VE: Eigenbedarf/Bezug	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	0	1
	UE: Eigenbedarf									1		1				
Wärmeenergie	Absatz	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	
	Eigenbedarf gemessen	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
	Eigenbedarf geschätzt	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0

BGA Nr.		46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	Σ
Auswertung ohne weiteres möglich?		1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	34
Auswertung nach Ergänzung möglich?		0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	48
Datenbestand:																		
Gärbehälter	Fermenter/1. Stufe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	61
	Nachgärer		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	50
BHKW	in Besitz d. Betreibers?																	
	Motortyp	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		57
	Motorkennwerte	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		57
	ggf. Zündölbedarf			1														9
	Stromerzeugung	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		57
Biogas	gemessene Menge	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	31
	errechnete Menge	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	57
	Methangehalt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	61
Elektr. Energie	Volleinspeisung (VE)	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		53
	Überschusseinsp. (ÜE)																	4
	Einspeisemenge VE/ÜE	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		57
	VE: Eigenbedarf/Bezug	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	54
	UE: Eigenbedarf																	4
Wärmeenergie	Absatz	0	1	1	1	1	1	1		1	0	1	1	1	1	0		48
	Eigenbedarf gemessen	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	30
	Eigenbedarf geschätzt	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	22

8 Zusammenfassung

Die jüngere Entwicklung in der Biogasbranche seit Inkrafttreten des EEG 2014 zeigt, dass die Anzahl der neu gebauten Biogasanlagen in Deutschland drastisch zurückgegangen ist und somit die Optimierung der Bestandsanlagen in den Fokus der Branchenentwicklung rückt. Im Hinblick auf hohe Stromgestehungskosten im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien müssen die Kosten gesenkt und die Vorteile der Vielseitigkeit und Speicherfähigkeit des Energieträgers Biogas besser in Wert gesetzt werden. Biogasanlagen in der Landwirtschaft müssen hinsichtlich der Nutzung kostengünstiger und nachhaltiger Substrate, deren optimaler Ausbeutung und der effizienten Nutzung des produzierten Biogases weiterentwickelt werden.

Vor diesem Hintergrund war es das übergeordnete Ziel des Biogas-Messprogramms III, anhand ausgewählter, über die Bundesrepublik verteilter Anlagen den technischen und ökonomischen Stand der Biogaserzeugung und -nutzung abzubilden und mittels bewährter und neuartiger Methoden wissenschaftlich zu bewerten. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen den Betrieb von Biogasanlagen technisch, ökonomisch und ökologisch zu optimieren, sodass der Biogassektor weiterhin einen wertvollen Beitrag zur Energiewende leisten kann.

Auf Grundlage von 345 Antworten einer bundesweiten Betreiberumfrage wurden für die Untersuchung 61 Biogasanlagen mit unterschiedlichen Anlagenkonzepten ausgewählt. In den vorangegangenen Messprogrammen wurde bereits die Verschiedenartigkeit der Anlagensysteme in der Praxis herausgestellt. Für das BMP III wurden die Anlagen so ausgesucht, dass folgende Kategorien abgedeckt wurden:

- Anlagen mit innovativen Wärmenutzungskonzepten
- Anlagen zur bedarfsorientierten Stromerzeugung
- Anlagen mit Substrataufbereitung
- Anlagen mit Gärrestaufbereitung
- Kleine Anlagen mit hohem Gülleanteil („Güllekleinanlagen“)
- Anlagen, die Reststoffe einsetzen
- Anlagen, die Repowering-Maßnahmen durchführen
- Biomethananlagen

Bei der Anlagenauswahl wurde neben den genannten Kategorien auf eine überdurchschnittlich gute messtechnische Ausstattung Wert gelegt, um belastbare und aussagekräftige Daten generieren zu können und den Aufwand für Nachrüstungen möglichst gering zu halten. In der Betreiberumfrage war bereits festzustellen, dass an einer Vielzahl von Anlagen nicht alle Stoffströme erfasst werden. So verfügten nur 44 % der Anlagen über eine Mengenerfassung der flüssigen Inputstoffe. Den Input der Feststoffe konnten hingegen 79 % der befragten Anlagen erfassen. Ebenfalls große Lücken gab es bei der Gasmengenerfassung (57 %) und der Bestimmung der Gasqualität (66 %). 77 % der Betriebe verfügten über Wärmemengenzähler, jedoch beschränkte sich die Erfassung bei den meisten Anlagen auf den Wärmeabsatz (KWK-Bonus). Der Eigenwärmebedarf konnte bei 57 % der an der Messkampagne teilnehmenden Betriebe bestimmt werden, die erzeugte BHKW-Wärme war hingegen nur in Einzelfällen erfassbar. Um alle Anlagen trotz der unzureichenden Messtechnik einheitlich bilanzieren und bewerten zu können, mussten bestimmte notwendige Messgrößen indirekt aus anderen Größen abgeleitet werden. Insbesondere wurden die Gärrestmenge aus der Massenbilanz und die Biogasmenge aus der Stromerzeugung errechnet.

Die ausgewählten Anlagen wurden über einen Zeitraum von jeweils zwölf Monaten untersucht, aufgeteilt in zwei Messphasen in den Jahren 2016 / 2017 bzw. 2017 / 2018. Hierbei wurden Daten zur technischen Ausstattung, Prozessdaten während des Anlagenbetriebs und ökonomische Kennzahlen aufgenommen (Bilanzjahr 2017). Außerdem wurden die zu- und abgeführten Stoffströme sowie die Fermenterinhalt/ Gärgemische beprobt und im Labor auf für die Stoffstrombilanz und die Beurteilung der Prozessstabilität benötigten Parameter untersucht.

Im Rahmen des 1. Teilvorhabens des BMP III wurden von den vier beteiligten Projektpartnern vor Beginn der Messphasen jeweils gezielte Ringversuche für Laboranalysen durchgeführt.

Hierdurch konnten methodische Abweichungen frühzeitig erkannt werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse abzusichern. Ähnliche Erfahrungen in den jährlich durchgeführten Ringversuchen des KTBL zeigen die Notwendigkeit der genauen Beachtung der vorgegebenen Analysemethoden und der weiteren Standardisierung und Optimierung der Analyse- und Auswerteverfahren.

Die im BMP III untersuchten Biogasanlagen waren mit 92 % mehrheitlich mehrstufig ausgeführt, wobei am häufigsten zwei (30 von 56 Fällen), in 18 Fällen auch drei und in sechs Fällen sogar vier Gärstufen vorgefunden wurden. Als Gärbehälter dominierten Rührkesselfermenter, vier Anlagen setzten Pfropfenstromfermenter ein. Andere Fermentertypen spielten eine untergeordnete Rolle. Die Gärtemperatur lag bei 30 % der Anlagen im typischen mesophilen Bereich (35 – 42°C) und bei 18 % im thermophilen Bereich (> 48°C). Damit wies etwas mehr als die Hälfte der Anlagen eine Prozesstemperatur zwischen 42 und 48°C auf, also im Übergangsbereich von mesophil zu thermophil.

In Summe über alle 61 Betriebe hinweg wurden ca. 37 % Wirtschaftsdünger (FM) eingesetzt, davon 82 % Rindergülle oder Rindermist. In 14 % der Betriebe wurden ausschließlich nachwachsende Rohstoffe vergoren. Unter den NawaRo war Mais-Ganzpflanzensilage der häufigste Einsatzstoff (in 90 % der Betriebe), gefolgt von Grassilage (71 %). Insgesamt sank damit im aktuellen Messprogramm der Massenanteil von Mais-Ganzpflanzensilage an den Einsatzstoffen gegenüber dem BMP II um 10 %-Punkte auf rund 40 %. Der durchschnittliche oTS-Gehalt der eingetragenen Substratmischungen betrug rund 23 %. Das an den Anlagen vorhandene durchschnittliche Fermentationsvolumen lag bei ca. 4.500 m³. Im Mittel über alle Anlagen errechnete sich eine oTS-Raubelastung von 2,6 kg_{oTS}/(m³ d), welche für die einzelnen Anlagen zwischen 0,9 bis 5,0 kg_{oTS}/(m³ d) variierte.

Die hydraulische Verweilzeit im Fermentersystem betrug bei einstufigen Anlagen 45 bis 100 Tage (Mittelwert: 67 Tage) und bei mehrstufigen 36 bis 231 Tage (Mittelwert: 100 Tage). Damit wiesen die Anlagen im BMP III im Durchschnitt längere hydraulische Verweilzeiten im gesamten gasdichten System auf als im BMP II: während im BMP II nur knapp 20 % der Anlagen eine Gesamtverweilzeit von mehr als 160 Tagen aufwiesen, lag dieser Anteil im BMP III in etwa bei der Hälfte der Anlagen. Dies kann auf geänderte Vorgaben beim Immissionsschutz zurückgeführt werden, welche ab 2012 auch Eingang in das EEG fanden.

Pro Tonne eingesetzter oTS wurden in den Anlagen im Mittel rund 670 m³ Biogas bzw. 350 m³ Methan produziert. Der gemessene Methangehalt im Biogas reichte von 46,8 bis 60,3 Vol.-% (Mittelwert: 52 %). Im Zuge der Flexibilisierung der Stromerzeugung wird als erste Maßnahme in der Regel die Gasspeicherkapazität der Biogasanlage vergrößert. Dieser Trend lässt sich aus den Beobachtungen im aktuellen Messprogramm deutlich erkennen. Während die Mehrheit der Anlagen im BMP II noch ein spezifisches Gasspeichervolumen von höchstens 2 m³/kW_{el} aufwies, war dies für lediglich elf der Anlagen im BMP III der Fall. Das mittlere spezifische Gasspeichervolumen aller Anlagen im BMP III lag bei rund 4,3 m³/kW_{el}.

Die Verwertung des produzierten Biogases erfolgte bei 53 der 61 Anlagen ausschließlich in BHKW zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, wovon 23 % flexibel Strom produzierten. Drei Betriebe setzten Rohbiogas an externe Verwerter ab und betrieben zugleich ein BHKW vor Ort; fünf Betriebe speisten Biomethan ins Erdgasnetz ein. Die kleinsten der Strom produzierenden Anlagen verfügten über eine installierte elektrische Leistung von 75 kW, die größte Anlage über 2.770 kW. Im Mittel waren rund 700 kW installiert, die mittlere Höchstbemessungsleistung lag bei rund 600 kW. Bezogen auf die Höchstbemessungsleistung, die zur Beurteilung herangezogen wurde, um der Flexibilisierung Rechnung zu tragen, betrug der mittlere Ausnutzungsgrad knapp 90 %. Die durchschnittliche Auslastung der überschüssigen Wärmeleistung („Wärmenutzungsgrad“) lag für etwa die Hälfte der Anlagen oberhalb von 50 %. Im Vergleich zum BMP II, wo diese Schwelle lediglich ca. 10 % der Anlagen überschritten, bedeutet dies eine erhebliche Verbesserung der Energieeffizienz. Gleichwohl gab es im BMP III nach wie vor elf Anlagen, die keine Wärme an externe Nutzer absetzten – darunter die sechs untersuchten GÜllekleinanlagen. Der anteilige Eigenbedarf der Biogasanlagen betrug für den elektrischen Strom im Mittel 8,8 % (gegenüber 7,9 % im BMP II) und für die Wärme 15 % (12 %).

Ein besonderer methodischer Schwerpunkt im BMP III lag auf der Effizienzbewertung. Dafür wurden die Teilprozesse Biogasproduktion und Biogasverwertung getrennt betrachtet. Für die Bewertung der Biogasproduktion kamen drei verschiedene Methoden zum Einsatz, welche unterschiedliche Ergebnisse zeigten. Bei Bestimmung der Effizienz über die fermentierbare organische Trockensubstanz oder den Biogasertragstest wurden vielfach Werte größer 100 % berechnet. Dies zeigt die enorme Herausforderung der Anwendung dieser Methoden in der Praxis. Die ermittelte relative Biogasausbeute lag auf Basis der FoTS für 44 von 61 Anlagen über 100 % und auf Basis des Biogasertragspotentials im Biogasertragstest für 31 von 61 Anlagen. Für die vergleichende Effizienzbewertung wurden daher die auf das beobachtete Maximum normierten Werte für die relative FoTS-Ausbeute verwendet.

Die wesentliche Fehlerquelle bei der Bestimmung der relativen Biogasausbeute liegt bezüglich der Biogasmenge, welche aus dem BHKW-Strom berechnet wurde, beim angenommenen elektrischen BHKW-Wirkungsgrad. Bei der Bestimmung des Biogasertragspotentials ist die Fehlerkette deutlich länger. Hierbei dürfte erfahrungsgemäß der Fehler bei der Bestimmung der eingesetzten Frischmasse in den Anlagen am größten sein. Bei den festen Einsatzstoffen kann eine fehlerhafte Kalibrierung der Waage erheblich zu Buche schlagen. Hinzu kommt, dass teilweise lediglich die gesamte Fütterungsmenge gewogen und die Anteile der einzelnen Substrate geschätzt wurden sowie kurzzeitig eingesetzte Substrate überhaupt nicht erfasst werden konnten. Güllemengen wurden in den meisten Fällen nur geschätzt.

Grundsätzlich lieferten die Werte für die Ausbeute auf Basis der FoTS und des Biogasertragspotentials richtungsgleiche Aussagen. Die Anzahl der Anlagen mit auffällig niedriger Biogasausbeute war mit sieben von 61 gering. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass Biogasanlagen auf dem aktuellen Stand der Technik in der Regel eine hohe Methanausbeute garantieren und das Biogasertragspotential der Einsatzstoffe weitgehend ausschöpfen. Auch das durchschnittliche Restmethanpotential ging im Vergleich mit den Ergebnissen des BMP II von im Mittel $9,5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tGärrest}$ für einstufige und $4,9 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tGärrest}$ für mehrstufige Anlagen auf $8,2 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tGärrest}$ bzw. $4,0 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tGärrest}$ zurück. Demnach entfalteten die Anlagen zur Emissionsminderung Wirksamkeit. Gleichzeitig wurde entsprechend der längeren Verweilzeiten der Anlagen im BMP III auch eine geringere Methanproduktivität des Fermentersystems festgestellt: Diese betrug im Mittel $0,9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ d})$ (Wertebereich: $0,2 - 1,9$) gegenüber $1,1 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ d})$ ($0,3 - 3,2$) im BMP II. In Ermangelung entsprechender Kennwerte für die relative Biogasausbeute ist ein Vergleich mit dem vorhergegangenen BMP II hinsichtlich der Effizienz der Biogasproduktion nur anhand des oTS-Abbaugrades möglich. Dieser lag im Mittel aller untersuchten Anlagen im BMP III mit 80 % etwas höher als im BMP II (76 %). Die FoTS-Basis wurde im vorliegenden Biogas-Messprogramm mit dem Ziel verwendet, den Einfluss der Substratauswahl – insbesondere des Anteils an tierischen Wirtschaftsdüngern mit niedrigerem Biogasertragspotential – auf den Vergleich der Effizienz der Biogasproduktion zu eliminieren. Tatsächlich war ein Einfluss des Wirtschaftsdüngeranteils auf die relative Biogasausbeute auf Basis der FoTS nicht erkennbar – im Gegensatz zum Abbaugrad der oTS.

Der eingespeiste Strom von Güllekleinanlagen mit einer Bemessungsleistung von bis zu $75 \text{ kW}_{\text{el}}$ wird besonders vergütet (§44 EEG 2017), weshalb der Zubau von Anlagen in den letzten Jahren hauptsächlich in dieser Kategorie erfolgte. Entsprechend wurden für das Messprogramm sechs Anlagen dieses Typs ausgewählt, obgleich dort wenig Messtechnik vorhanden war und vier der sechs Anlagen die Wärme nur für die Beheizung der Fermenter und des Wohnhauses nutzten. Insgesamt schnitten die untersuchten Güllekleinanlagen im Messprogramm sehr unterschiedlich ab. Das relative Restgaspotential variierte mit Werten von 2,2 % bis 11,5 % sehr stark. Gegenüber der gesamten Stichprobe von 61 Anlagen zeigten die Güllekleinanlagen tendenziell höhere Restgaspotentiale. Dies kann auf die vergleichsweise schwer abbaubaren Substrate – bei gleichzeitig geringem absoluten Biogasertragspotential – und kurze Verweilzeiten bei zwei dieser Anlagen zurückgeführt werden. Bezüglich der Ökonomie zeigte sich bei den Güllekleinanlagen ebenfalls eine große Schwankungsbreite. Sowohl die höchsten spezifischen Gewinne ($15,21 \text{ ct/kW}_{\text{el}}$) als auch die größten Verluste von allen Anlagen ($- 4,36 \text{ ct/kW}_{\text{el}}$) wurden für Anlagen dieses Typs ermittelt.

Das an der LfL entwickelte Benchmarksystem, mit welchem landwirtschaftliche Biogasanlagen gemessen am Stand der Technik untereinander verglichen werden, konnte entsprechend der aus dem Monitoring verfügbaren Daten auf 48 der 60 Anlagen angewandt werden. Im Bewertungsergebnis wurde ein deutlicher Verbesserungsbedarf häufiger bei der Biogasverwertung (24 Anlagen) als bei der Biogasproduktion (19) erkennbar. Erfreulicherweise war die Anzahl der Anlagen mit einer inakzeptabel niedrigen Ausnutzung des Methanertragspotentials der Einsatzstoffe mit sieben gering. Passend zu diesem Ergebnis wurde allerdings bei etwas mehr als der Hälfte der Anlagen eine steigerungsfähige Methanproduktivität des Fermentationsvolumens festgestellt. Für die zusammenfassende Bewertung der Biogasproduktion wurde letzteres Kriterium schwächer gewichtet, da ein überdimensioniertes Arbeitsvolumen prinzipiell kein verfahrenstechnisches Risiko darstellt, sondern allenfalls kostenseitig von Nachteil ist. Gleichwohl zeigten 14 Anlagen, dass es durchaus möglich ist, einen tragfähigen Kompromiss zwischen effizienter Substratausnutzung und guter Produktivität des Fermentationsvolumens zu finden.

Bei der Biogasverwertung ist der Anteil der Anlagen mit insgesamt sehr guter oder ungenügender Bewertung deutlich größer als für die Biogasproduktion, während das Mittelfeld hier dünner besetzt ist. Die Ausnutzung der festgelegten Höchstbemessungsleistung für die Stromeinspeisung war insgesamt das am besten bewertete Kriterium. Dies überrascht insofern nicht, als dieser Parameter direkt mit dem Einkommen aus dem Anlagenbetrieb gekoppelt ist. Gleichzeitig stieß das Benchmarksystem bei diesem Kriterium an seine Grenzen, da im Zuge der zunehmenden Flexibilisierung und Marktorientierung der Stromerzeugung aus Biogas eine Vielzahl von Konfigurationen möglich ist, welche mit einer einzigen Kennzahl nicht verlässlich abgebildet werden kann. Der energetische Nutzungsgrad des erzeugten Biogases erhöhte sich zwar im Gesamtbild gegenüber vorausgegangenen Messprogrammen deutlich, gleichwohl ging auf einem Drittel der Anlagen ein großer Anteil der Methanenergie als Fortwärme verloren. Ob sich die Flexibilisierung der Stromerzeugung nachteilig auf den Wärmeabsatz auswirkte, wurde nicht untersucht. Jedenfalls war keine Korrelation von Methan-Nutzungsgrad und BHKW-Leistungsausnutzung erkennbar.

Das „Benchmarksystem für Biogasanlagen“ kann auch von Anlagen intern verwendet werden, um die Effektivität von Repowering-Maßnahmen zu beurteilen. Dies war auch eine Zielsetzung für das BMP III. Allerdings konnten im Rahmen des Messprogramms lediglich zwei eindeutige Fälle von Repowering-Maßnahmen evaluiert werden. In einem Fall hätte die vorherige Anwendung des Benchmarksystems die geplante Erweiterung des Fermentationsvolumens als unnötig herausstellen können. Im anderen Fall bildete das Benchmarksystem die Steigerung der Effizienz der Biogasverwertung durch Erneuerung des BHKW korrekt ab und zeigte zugleich ein erkennbares Potential für eine Steigerung der Kosteneffizienz bei der Biogasproduktion. Anlagenbetreibenden wird ausdrücklich geraten, die Wirksamkeit eines Repowerings vorab kritisch zu prüfen und nach erfolgter Maßnahme auszuwerten. Wie in der vorliegenden Broschüre mehrfach betont, ist dies nur möglich, wenn man den Status quo der Anlage anhand geeigneter Kennzahlen beschreiben kann.

Die Ergebnisse des BMP III anhand der 50 ökonomisch untersuchten Anlagen machen deutlich, dass ein Großteil der untersuchten BGA (47 von 50) ein positives Betriebszweigergebnis aufweist. Gegenüber dem BMP II ist somit die Anzahl der Anlagen, die ein negatives Betriebszweigergebnis aufweisen, von 8 auf 3 gesunken. Das kalkulatorische Betriebszweigergebnis zeigt im Mittel einen Gewinn von 4,59 ct/kW_{h_{el}} (BMP II: 2,9 ct/kW_{h_{el}}) bzw. 214.573 € auf, mit Wertebereichen von - 4,36 ct/kW_{h_{el}} (BGA 34) bis 15,21 ct/kW_{h_{el}} (BGA 50) bzw. - 47.281 € (BGA 39) bis 771.006 € (BGA 25). Die durchschnittliche Brutto-Umsatzrendite liegt über alle 50 Anlagen bei 19,3 %. Diese Kennzahl als Gradmesser der Profitabilität von Unternehmen zeigt, dass im Durchschnitt eine angemessene Brutto-Rendite im Betriebszweig Biogas bei den Anlagen erzielt wird.

Der Wertebereich der Gesamtinvestitionsvolumina erstreckt sich von rund 494.000 € für die Güllekleinanlage BGA 49 bis zu rund 10,72 Mio. € für die Biomethananlage BGA 35 und liegt damit deutlich oberhalb dem im BMP II (200.000 € bis 5,0 Mio. €). Begründet werden kann dies insbesondere durch viele Erweiterungs- und Reinvestitionen aufgrund des gestiegenen durchschnittlichen Alters des untersuchten Anlagenbestandes. Zudem haben verschiedene gesetzliche Regelungen, Verordnungen und Gesetze im Biogasbereich größere Investitionen nach sich gezogen, z. B. in neue Gärrestlager zur Erhöhung der Lagerkapazitäten sowie der verlängerten Verweilzeiten im gasdichten System. Die spezifischen Investitionssummen auf Basis der gesetzlichen Höchstbemessungsleistung variieren von 2.219 €/kW_{el} (BGA 25) bis

10.310 €/kW_{el} (BGA 34). Der Mittelwert liegt für die untersuchten Anlagen im BMP III bei 4.935 €/kW_{el} (3.096 €/kW_{el} installierter Leistung im BMP II).

Die Zusammensetzung der jährlichen Gesamtausgaben wird dominiert von Ausgaben für die eingesetzten Substrate. Die durchschnittlichen relativen Substratkosten an den jährlichen Gesamtausgaben liegen im Bewertungszeitraum bei rund 38,2 % (BMP II: 42 %), gefolgt von den sonstigen Betriebskosten (21,9 %), den Abschreibungen (21,8 %) sowie den Instandhaltungskosten (12,2 %). Personalkosten spielen mit lediglich 6,0 % eine eher untergeordnete Rolle an den jährlichen Gesamtausgaben. Die mittleren Substratkosten für Mais-Ganzpflanzensilage liegen bei 36 €/t_{FM} (Minimum: 27 €/t_{FM}; Maximum: 59 €/t_{FM}). Damit liegen die mittleren Substratkosten für Mais-Ganzpflanzensilage um 4 €/t_{FM} höher als im BMP II, was in etwa einer jährlichen Steigerung von 1 % entspricht. Für Grassilage liegen die mittleren Substratkosten bei 31 €/t_{FM} und für diverses Getreidekorn bei 129 €/t_{FM}. Die mittleren Stromgestehungskosten über alle 50 Biogasanlagen betragen 18,9 ct/kW_hel (BMP II: 16,0 ct/kW_hel).

Haupteinkunftsquelle bei den jährlichen Einnahmen ist nach wie vor der Verkauf von Strom. Dabei verteilen sich die jährlichen Einnahmen, über alle betrachteten Anlagen hinweg, im Mittel auf ca. 81 % Stromerlöse, 7,9 % Wärmeerlöse und 11,2 % sonstige Erlöse. Bleiben die drei Anlagen, die im größeren Umfang Rohbiogas verkaufen (BGA 07, 19 und 23) sowie die drei Biomethananlagen (BGA 35, 53 und 61) in der Betrachtung außen vor, verteilen sich die durchschnittlichen prozentualen Erlöse zu 89,1 % auf den Verkauf von Strom, 8,9 % auf den Verkauf von Wärme und lediglich 2,0 % auf die Einnahmenkomponente sonstige Erlöse.

Die Gesamtwirtschaftlichkeit ist von sehr vielen unterschiedlichen Kostenfaktoren und der Erlösstruktur abhängig. Mit zunehmender elektrischer Auslastung der Anlagen werden die Stromgestehungskosten reduziert. Dabei ist zu beachten, dass eine hohe elektrische Auslastung notwendig, aber nicht hinreichend für niedrige Stromgestehungskosten ist, da weitere Effekte diese überlagern können, z. B. teure Substrate, Havarien im Betrachtungszeitraum oder hohe Erstinvestitionen.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit dem Wegfall der besonderen Vergütung der Stromerzeugung aus der Vergärung von Energiepflanzen im EEG 2014 ist der Zubau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland erheblich eingebrochen. In der Folge brachte die Einführung des Ausschreibungsverfahrens durch das EEG 2017 bei der Installation von Anlagen zur Stromerzeugung aus EE eine weitere Erschwernis für den profitablen Betrieb von Biogasanlagen aufgrund der niedrigen Höchstgebotspreise. So sehr man dies aus agrarökologischen Gründen begrüßen kann, so dramatisch sind die betriebswirtschaftlichen Folgen für einen großen Teil des Anlagenbestandes mit überwiegendem Einsatz von Energiepflanzen. Gleichzeitig erfüllt der Zubau an güllebasierten Anlagen in der unteren Leistungsklasse bis 75 kW_{el} wegen der hohen spezifischen Anschaffungskosten nur bedingt die politischen Erwartungen. All dies erscheint in einem starken Widerspruch zu den Zielen der Regierung für die Steigerung der Strom- und Energiebereitstellung aus EE zu stehen.

Wie im vorliegenden, dritten bundesweiten Biogas-Messprogramm gezeigt werden konnte, stellen sich derweil die Betriebe den neuen Herausforderungen, insbesondere in Form der Flexibilisierung der Stromerzeugung und der Steigerung der Energieeffizienz, und beteiligen sich mit der Wissenschaft an der Entwicklung neuer Lösungsansätze. Ein naheliegender Schritt zur Steigerung der Einkünfte und Verbesserung der Profitabilität von Biogasanlagen ist es, die Verluste an nutzbarer Energie möglichst zu minimieren. Dies betrifft sowohl die Biogasproduktion, also die Ausschöpfung des Biogasertragspotentials der Einsatzstoffe, als auch die Biogasverwertung im BHKW oder durch Aufbereitung zu Biomethan.

Ausgangspunkt für solche Optimierungsmaßnahmen ist in jedem Fall eine möglichst genaue Abbildung der Anlageneffizienz im Status quo. Im BMP III wurde auf die Erprobung und Validierung entsprechender Methoden zur Effizienzbewertung besonderer Wert gelegt. Dabei zeigte sich erneut und in bisher kaum erreichtem Detailgrad, dass die Anwendung dieser Methoden in der Praxis eine enorme Herausforderung darstellt. Nicht nur ist eine Mindestausstattung an Messtechnik zur Erfassung der grundlegenden Stoffströme wie Substrate, Gärreste und Biogasertrag unverzichtbar, sondern die entsprechende Messtechnik muss auch zuverlässig gewartet und regelmäßig kalibriert werden, um die Aussagekraft der erhobenen Daten dauerhaft sicherzustellen. Während unter diesen Voraussetzungen eine anlageninterne Auswertung ausreichend verlässliche Ergebnisse liefert, stellt der Vergleich verschiedener Anlagen untereinander eine größere Herausforderung dar. Diesbezüglich besteht nach wie vor erheblicher Bedarf zur Verbesserung bestehender und gegebenenfalls Entwicklung neuer Bewertungsmethoden. Auch bezüglich der Harmonisierung und Qualitätssicherung von biogasspezifischen laboranalytischen Methoden gibt es noch in mehrerlei Hinsicht Verbesserungsbedarf. Wie gezeigt werden konnte, sind zudem Methodenabgleiche und Ringversuche in jedem Projektverbund unerlässlich, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Trotz deutlicher Verbesserungen gegenüber früheren Messkampagnen erscheint der weitere Ausbau des Absatzes von Wärmeenergie aus BHKW mit Vor-Ort-Verstromung mittelfristig als wichtigster Entwicklungspfad zur Steigerung der Energieeffizienz und Vermeidung von THG-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger – insbesondere bei Vergärung von Reststoffen. Die räumliche Entkopplung der Erzeugung des Biogases und dessen Umwandlung zu Strom und Wärme in einem Satelliten-BHKW am Ort der Wärmesenke kann hierbei erhebliche Vorteile bieten.

Die Flexibilisierung der Energiebereitstellung aus Biogas eröffnet neue Fragestellungen für weitere Bilanzierungsansätze. So ist es mit den etablierten, statischen Betrachtungen zur Biogasanlageneffizienz schwer möglich, die Dynamik einer bedarfsorientierten Stromerzeugung, möglicherweise in Verbindung mit einer Modulation der Biogasproduktion zu beurteilen. Der systemdienliche Betrieb kann im Widerspruch zum Wirkungsgradverhalten des BHKW stehen, und auch das Risiko für höhere betriebsbedingte Emissionen in diesem Zusammenhang kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Alternative Anlagenkonzepte und Nutzungsoptionen für Biomethan sind ebenfalls zunehmend in Betracht zu ziehen. Beispielsweise erfährt die Kraftstoffbereitstellung aus Biogas zunehmendes Interesse, hängt jedoch stark von den Standortbedingungen ab. Weitere viel diskutierte Themen, wie z. B. die Substratumstellung auf Reststoffe oder auch die Aufbereitung von Gärresten zu marktfähigen Düngern, sind Möglichkeiten, um die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen zukünftig zu erhöhen.

Hinsichtlich der zukünftigen wirtschaftlichen Herausforderungen von bestehenden Biogasanlagen in Deutschland bzgl. einer Laufzeitverlängerung nach dem Ausschreibungsdesign des EEG 2017 zeigt sich, dass ein Großteil der Biogasanlagen mit ihren mittleren Stromgestehungskosten oberhalb des Höchstgebotspreises für Bestandsanlagen liegt. Sofern durch die Reduktion der Einnahmen und die notwendigen individuellen Reinvestitionen für eine Laufzeitverlängerung, die abhängig vom jeweiligen zukünftigen Geschäftsfeld sind, z. B. aktive oder passive Flexibilisierung, dies zu einem jährlichen bzw. dauerhaften Verlust führt, ist die Teilnahme am Ausschreibungsverfahren unter den derzeit gegebenen rechtlichen Rahmenbedingungen und dem aktuellen Anlagensetting nicht wirtschaftlich. Gegebenenfalls müssen neue Geschäftsfelder erschlossen oder aber der Rückbau der Anlage aus betriebswirtschaftlichen Gründen in Betracht gezogen werden.