

BIOGAS-MESSPROGRAMM III



BIOGAS

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IMPRESSUM

Herausgeber
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Titelbild
Hilfers - AES
Gestaltung/Realisierung
www.tangram.de, Rostock

Alle Rechte vorbehalten.

Für die Ergebnisdarstellung mit Schlussfolgerungen, Konzepten und fachlichen Empfehlungen sowie die Beachtung etwaiger Autorenrechte sind die Verfasser verantwortlich.

mediathek.fnr.de
FNR 2021

BIOGAS- MESSPROGRAMM III

Die vorliegende Publikation wurde erstellt durch:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112

Internet: www.dbfz.de

Bearbeitende: Tino Barchmann, Marcel Pohl, Velina Denysenko, Erik Fischer, Josephine Hofmann, Markus Lenhart, Jan Postel (ehemals), Dr. Jan Liebetrau (ehemals)

Datenerfassung: Region Ost

Inhaltliche Zuarbeit durch:

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Vöttinger Straße 36

85354 Freising

Bearbeitende: Dr. Mathias Effenberger, Rainer Kissel, Robert Kliche (ehemals), Gabriel Streicher

Datenerfassung: Region Süd-Ost

Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB)

Universität Hohenheim

Garbenstraße 9

70599 Stuttgart

Bearbeitende: Benedikt Hülsemann, Lijun Zhou, Dr. Hans Oechsner, Dr. Hans-Joachim Nägele (ehemals)

Datenerfassung: Region Süd-West

Kompetenzzentrum Erneuerbare Energien und Klimaschutz Schleswig-Holstein (EEK.SH)

c/o Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik

Max-Eyth-Str. 6

24118 Kiel

Bearbeitende: Torsten Mächtig, Dr. Christian R. Moschner

Datenerfassung: Region Nord

INHALT

VORWORT	XII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	1
FORMELZEICHEN UND EINHEITEN	2
1 Einleitung	3
2 Ziele des Projektes	4
3 Methodische Vorgehensweise	7
3.1 Methodik der bundesweiten Datenerhebung	7
3.2 Datenerfassung	9
3.2.1 Technische Ausrüstung und Konfiguration der Anlagen	10
3.2.2 Prozessdaten	10
3.2.3 Physikalisch-chemische Analyse der Biomasse	12
3.2.4 Datenaufbereitung	13
3.2.4.1 Plausibilitätsprüfung	13
3.2.4.2 Umgang mit Datenlücken	13
3.2.4.3 Vereinheitlichung der Datendichte	14
3.2.4.4 Datenspeicherung	14
3.3 Ringversuche	14
3.4 Massen- und Energiebilanzierung	17
3.4.1 Darstellung verfügbarer Methoden zur Bewertung des Gärprozesses	17
3.4.1.1 Massenbilanzierung	17
3.4.1.2 Bewertung mittels oTS-Abbaugrad	18
3.4.1.3 Bewertung mittels FoTS-Ausbeute	19
3.4.1.4 Bewertung mittels Methanausbeute und absolutem und relativem Restmethanpotential	19
3.4.1.5 Bewertung mittels anaerobem energetischen Umsatzgrad und anaerober energetischer Ausbeute	20
3.4.1.6 Vergleich der Kennzahlen zur Bewertung des Gärprozesses	20
3.4.2 Darstellung verfügbarer Methoden zur Bewertung des Gesamtprozesses	22
3.4.2.1 Brennstoffausnutzungsgrad	22
3.4.2.2 Benchmarksystem Biogas - Methode für den Anlagenvergleich im BMP III	22
3.4.3 Berechnung weiterer Kennzahlen	28
3.5 Ökonomie – Betriebszweigabrechnung	29
3.5.1 BZA Biogas- Grundlagen	32
3.5.2 Aufbau und Methodik der BZA Biogas	32
4 Ergebnisse der bundesweiten Betreiberbefragung, Anlagenauswahl der evaluierten Biogasanlagen und deren Kenndaten	34
4.1 Auswahlkriterien	34
4.2 Ergebnisse der bundesweiten Datenerhebung	34
4.2.1 Substrateinsatz	34
4.2.2 Installierte Technik	36
4.2.2.1 Fermentersystem	37
4.2.2.2 Rührtechnik	37
4.2.2.3 Gasspeichersysteme	38
4.2.2.4 Gasspeichervolumen gesamt	39
4.2.2.5 Anzahl installierter BHKW je Biogasanlage	39
4.2.2.6 Gärrestaufbereitung	40
4.2.2.7 Messtechnik	41
4.2.2.8 Repowering-Maßnahmen	44
4.2.3 Betriebsweise	44
4.2.3.1 Prozessführung	44

4.2.3.2	Betriebsstunden	45
4.2.4	Energieproduktion und –nutzung	46
4.2.4.1	Externe Wärmenutzung	46
4.2.4.2	Wärmenutzungsarten	46
4.3	Kenndaten	47
5	Beschreibung ausgewählter Anlagen	61
5.1	Biogasanlage 06	61
5.1.1	Anlagenbeschreibung	61
5.1.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	63
5.1.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	64
5.2	Biogasanlage 11	68
5.2.1	Anlagenbeschreibung	68
5.2.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	69
5.2.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	70
5.3	Biogasanlage 16	74
5.3.1	Anlagenbeschreibung	74
5.3.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	75
5.3.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	76
5.4	Biogasanlage 22	81
5.4.1	Anlagenbeschreibung	81
5.4.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	82
5.4.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	83
5.5	Biogasanlage 28	88
5.5.1	Anlagenbeschreibung	88
5.5.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	89
5.5.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	90
5.6	Biogasanlage 35	95
5.6.1	Anlagenbeschreibung	95
5.6.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	96
5.6.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	97
5.7	Biogasanlage 37	101
5.7.1	Anlagenbeschreibung	101
5.7.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	102
5.7.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	103
5.8	Biogasanlage 43	108
5.8.1	Anlagenbeschreibung	108
5.8.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	109
5.8.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	110
5.9	Biogasanlage 52	115
5.9.1	Anlagenbeschreibung	115
5.9.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	116
5.9.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	117
5.10	Biogasanlage 57	121
5.10.1	Anlagenbeschreibung	121
5.10.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	122
5.10.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	123
6	Ergebnisse des Biogas-Messprogramms	128
6.1	Anlagenkonfigurationen	128
6.1.1	Behälterkonfiguration	128
6.1.2	Prozesstemperatur	129
6.1.3	Anlagenleistung	130
6.1.4	Gasspeicherung	131
6.1.5	Wärmenutzung	132
6.1.6	Gasverwertung	133
6.1.6.1	Jahresbetriebsstunden, theoretische Volllaststunden und elektrische Auslastung der BHKW	134
6.1.6.2	Elektrischer Wirkungsgrad	135
6.1.6.3	Substratspezifische Energieproduktion	135

6.1.6.4	Wärmenutzung	137
6.1.6.5	Eigenstrombedarf	140
6.2	Betriebscharakteristika	143
6.2.1	Substrateinsatz	143
6.2.2	Substrat- und Ablaufcharakteristika	147
6.2.2.1	Gehalt an Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS)	148
6.2.2.2	Gehalt an Gesamtstickstoff (N_{ges} -N) und Ammoniumstickstoff (NH_4 -N)	152
6.2.3	Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz	154
6.2.4	Hydraulische Verweilzeit	155
6.2.5	Gasqualität	157
6.2.6	Gasproduktion	158
6.2.6.1	Spezifische Biogas- und Methanausbeute	158
6.2.6.2	Biogas- und Methanproduktivität	160
6.2.7	Biogas-/Methanpotential	163
6.2.8	Fermentierbare organische Trockensubstanz	165
6.2.9	Brennwert und Ligninanteil	167
6.2.10	Absolutes Restmethanpotential	170
6.3	Effizienzanalyse	171
6.3.1	oTS-Abbaugrad	171
6.3.2	FoTS-Ausbeute	171
6.3.3	Relative Methanausbeuten und Restmethanpotentiale	172
6.3.4	Bewertung mittels anaerob energetischem Umsatzgrad und anaerob energetischer Ausbeute	175
6.3.5	Vergleichende Bewertung der Effizienzanalyse, Fehler- und Schwachstellenbetrachtung	178
6.4	Ökonomische Bewertung	182
6.4.1	Datenqualität der ökonomischen Daten	182
6.4.2	Investitionsbedarfe der Biogasanlagen	182
6.4.2.1	Gesamtinvestition	183
6.4.2.2	Kosten für die BHKW	186
6.4.3	Finanzierung der Anlagen	186
6.4.4	Jährliche Leistungen	187
6.4.5	Jährliche Kosten	190
6.4.5.1	Abschreibungen	192
6.4.5.2	Substratkosten	193
6.4.5.3	Personalkosten	194
6.4.5.4	Instandhaltungskosten	194
6.4.5.5	Sonstige Betriebskosten	196
6.4.5.6	Stromgestehungskosten	197
6.4.6	Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlagen	199
6.4.7	Sensitivitätsanalyse	203
7	Vergleichende Bewertung der Biogasanlagen	206
7.1	Querschnittsauswertung und Ranking von 61 BGA	206
7.2	Beurteilung ausgewählter Repowering-Maßnahmen	214
7.2.1	BGA13 / 43	214
7.2.2	BGA 26 / 58	215
8	Zusammenfassung	218
9	Schlussfolgerung und Ausblick	223
Anhang 1 (Verzeichnisse und Sekundärinformationen)		225
10	Abbildungsverzeichnis	225
11	Tabellenverzeichnis	239
12	Glossar	245

13	Literatur und Quellenverzeichnis	250
Anhang 2 - Ergänzende Kapitel		255
14	Methoden	255
14.1	Messmethoden	255
14.1.1	Probenahme fester Proben auf Biogasanlagen	256
14.1.1.1	Ziel	256
14.1.1.2	Anwendungsbereich	256
14.1.1.3	Durchführung der Probenahme	256
14.1.1.4	Probentransport und Lagerung	258
14.1.1.5	Rückstellproben	258
14.1.2	Probenahme flüssiger Proben auf Biogasanlagen	258
14.1.2.1	Ziel	258
14.1.2.2	Anwendungsbereich	258
14.1.2.3	Durchführung der Probenahme	259
14.1.2.4	Probentransport und Lagerung	260
14.1.2.5	Rückstellproben	260
14.1.3	Bestimmung Trockensubstanz und organische Trockensubstanz mit Trockensubstanz-Korrektur	260
14.1.3.1	Ziel	260
14.1.3.2	Grundlagen	260
14.1.3.3	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	260
14.1.3.4	Probenahme	261
14.1.3.5	Analysen	261
14.1.3.6	Kenngößen	272
14.1.4	Bestimmung des Brennwertes von Substraten und Gärrückständen	275
14.1.4.1	Ziel	275
14.1.4.2	Grundlagen	275
14.1.4.3	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	275
14.1.4.4	Probenahme	276
14.1.4.5	Analysen	276
14.1.4.6	Kenngößen	280
14.1.5	Bestimmung der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS)	281
14.1.5.1	Ziel	281
14.1.5.2	Grundlagen	282
14.1.5.3	Anwendungsbereich	282
14.1.5.4	Probenahme	282
14.1.5.5	Analysen	283
14.1.5.6	Kenngößen	285
14.1.6	Ammoniumstickstoff	287
14.1.6.1	Ziel	287
14.1.6.2	Grundlagen	287
14.1.6.3	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	287
14.1.6.4	Kenngößen	288
14.1.7	Bestimmung protolytisch aktiver Substanzen mittels hochaufgelöster Titrationskurven	289
14.1.7.1	Ziel	289
14.1.7.2	Grundlagen	289
14.1.7.3	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	289
14.1.7.4	Probenahme	289
14.1.7.5	Analysen	290
14.1.7.6	Kenngößen	293
14.2	Berechnungsmethoden	294
14.2.1	Berechnung der produzierten Biogasmenge	294
14.2.1.1	Ziel	294
14.2.1.2	Hintergrund	294
14.2.1.3	Vorgehen	295
14.2.1.4	Anwendungsgrenzen	297
14.2.2	Berechnungen zur Vereinheitlichung der Datendichte bei Analysedaten	300

14.2.2.1	Ziel	300
14.2.2.2	Grundlagen	300
14.2.2.3	Berechnung der Kenngrößen	300
14.2.3	Methodenbeschreibung „Effizienzbewertung von Biogasanlagen auf Basis der FoTS“	302
14.2.3.1	Ziel	302
14.2.3.2	Grundlagen	302
14.2.3.3	Berechnung Ausbeute FoTS	303
14.2.3.4	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	304
14.2.3.5	Analysen	305
14.2.3.6	Anlagen-Kenngrößen	306
14.2.4	Berechnung von anaerobem energetischen Umsatz- und Ausbeutegrad	308
14.2.4.1	Ziel	308
14.2.4.2	Grundlagen	308
14.2.4.3	Berechnung der Kenngrößen	310
14.2.4.4	Anwendungsbereich, Status und Grenzen der Methode	311
14.2.5	Berechnung von Prozesskennzahlen	312
14.3	Ringversuche	314
14.3.1	Trockensubstanz / organische Trockensubstanz mit Korrektur	314
14.3.2	Biogasertragstest	320
14.3.3	Restgaspotential	322
14.3.4	FOS/TAC	323
14.3.5	Rohfaser	324
14.3.6	Fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS)	325
14.3.7	Rohasche	326
14.3.8	Gesamt-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff	327
14.3.9	Spurenelemente	328
14.3.10	Brennwert	329
14.3.11	Säurespektrum	330
15	Beschreibung der 61 Biogasanlagen	332
15.1	Biogasanlage 01 und 02	332
15.1.1	Anlagenbeschreibung	332
15.1.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	333
15.1.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	334
15.2	Biogasanlage 03	343
15.2.1	Anlagenbeschreibung	343
15.2.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	343
15.2.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	345
15.3	Biogasanlage 04	349
15.3.1	Anlagenbeschreibung	349
15.3.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	350
15.3.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	351
15.4	Biogasanlage 05	355
15.4.1	Anlagenbeschreibung	355
15.4.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	356
15.4.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	357
15.5	Biogasanlage 06	361
15.5.1	Anlagenbeschreibung	361
15.5.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	362
15.5.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	364
15.6	Biogasanlage 07	368
15.6.1	Anlagenbeschreibung	368
15.6.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	369
15.6.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	370
15.7	Biogasanlage 08	374
15.7.1	Anlagenbeschreibung	374
15.7.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	375
15.7.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	376
15.8	Biogasanlage 09	380

15.8.1	Anlagenbeschreibung	380
15.8.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	381
15.8.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	382
15.9	Biogasanlage 10	387
15.9.1	Anlagenbeschreibung	387
15.9.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	388
15.9.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	389
15.10	Biogasanlage 11	393
15.10.1	Anlagenbeschreibung	393
15.10.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	394
15.10.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	395
15.11	Biogasanlage 12	399
15.11.1	Anlagenbeschreibung	399
15.11.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	400
15.11.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	401
15.12	Biogasanlage 13	405
15.12.1	Anlagenbeschreibung	405
15.12.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	406
15.12.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	407
15.13	Biogasanlage 14	412
15.13.1	Anlagenbeschreibung	412
15.13.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	413
15.13.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	414
15.14	Biogasanlage 15	419
15.14.1	Anlagenbeschreibung	419
15.14.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	420
15.14.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	421
15.15	Biogasanlage 16	426
15.15.1	Anlagenbeschreibung	426
15.15.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	427
15.15.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	428
15.16	Biogasanlage 17	433
15.16.1	Anlagenbeschreibung	433
15.16.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	434
15.16.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	434
15.17	Biogasanlage 18	439
15.17.1	Anlagenbeschreibung	439
15.17.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	440
15.17.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	440
15.18	Biogasanlage 19	445
15.18.1	Anlagenbeschreibung	445
15.18.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	446
15.18.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	446
15.19	Biogasanlage 20	451
15.19.1	Anlagenbeschreibung	451
15.19.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	452
15.19.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	452
15.20	Biogasanlage 21	456
15.20.1	Anlagenbeschreibung	456
15.20.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	457
15.20.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	457
15.21	Biogasanlage 22	461
15.21.1	Anlagenbeschreibung	461
15.21.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	463
15.21.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	463
15.22	Biogasanlage 23	468
15.22.1	Anlagenbeschreibung	468
15.22.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	470
15.22.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	470
15.23	Biogasanlage 24	475

15.23.1	Anlagenbeschreibung	475
15.23.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	476
15.23.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	477
15.24	Biogasanlage 25	481
15.24.1	Anlagenbeschreibung	481
15.24.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	482
15.24.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	483
15.25	Biogasanlage 26	487
15.25.1	Anlagenbeschreibung	487
15.25.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	488
15.25.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	488
15.26	Biogasanlage 27	492
15.26.1	Anlagenbeschreibung	492
15.26.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	493
15.26.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	493
15.27	Biogasanlage 28	498
15.27.1	Anlagenbeschreibung	498
15.27.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	499
15.27.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	500
15.28	Biogasanlage 29	505
15.28.1	Anlagenbeschreibung	505
15.28.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	506
15.28.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	506
15.29	Biogasanlage 30	511
15.29.1	Anlagenbeschreibung	511
15.29.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	512
15.29.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	512
15.30	Biogasanlage 31	516
15.30.1	Anlagenbeschreibung	516
15.30.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	517
15.30.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	518
15.31	Biogasanlage 32	522
15.31.1	Anlagenbeschreibung	522
15.31.2	Beurteilung der Messtechnik	523
15.31.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	523
15.32	Biogasanlage 33	527
15.32.1	Anlagenbeschreibung	527
15.32.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	528
15.32.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	529
15.33	Biogasanlage 34	533
15.33.1	Anlagenbeschreibung	533
15.33.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	534
15.33.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	535
15.34	Biogasanlage 35	540
15.34.1	Anlagenbeschreibung	540
15.34.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	541
15.34.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	542
15.35	Biogasanlage 36	546
15.35.1	Anlagenbeschreibung	546
15.35.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	547
15.35.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	548
15.36	Biogasanlage 37	551
15.36.1	Anlagenbeschreibung	551
15.36.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	552
15.36.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	553
15.37	Biogasanlage 38	558
15.37.1	Anlagenbeschreibung	558
15.37.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	559
15.37.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	561
15.38	Biogasanlage 39	565

15.38.1	Anlagenbeschreibung	565
15.38.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	567
15.38.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	568
15.39	Biogasanlage 40	572
15.39.1	Anlagenbeschreibung	572
15.39.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	573
15.39.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	574
15.40	Biogasanlage 41	579
15.40.1	Anlagenbeschreibung	579
15.40.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	580
15.40.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	581
15.41	Biogasanlage 42	586
15.41.1	Anlagenbeschreibung	586
15.41.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	587
15.41.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	588
15.42	Biogasanlage 43	592
15.42.1	Anlagenbeschreibung	592
15.42.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	593
15.42.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	594
15.43	Biogasanlage 44	599
15.43.1	Anlagenbeschreibung	599
15.43.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	600
15.43.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	601
15.44	Biogasanlage 45	606
15.44.1	Anlagenbeschreibung	606
15.44.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	607
15.44.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	608
15.45	Biogasanlage 46	611
15.45.1	Anlagenbeschreibung	611
15.45.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	611
15.45.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	612
15.46	Biogasanlage 47	616
15.46.1	Anlagenbeschreibung	616
15.46.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	617
15.46.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	617
15.47	Biogasanlage 48	622
15.47.1	Anlagenbeschreibung	622
15.47.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	623
15.47.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	623
15.48	Biogasanlage 49	628
15.48.1	Anlagenbeschreibung	628
15.48.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	628
15.48.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	629
15.49	Biogasanlage 50	634
15.49.1	Anlagenbeschreibung	634
15.49.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	634
15.49.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	635
15.50	Biogasanlage 51	639
15.50.1	Anlagenbeschreibung	639
15.50.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	640
15.50.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	640
15.51	Biogasanlage 52	645
15.51.1	Anlagenbeschreibung	645
15.51.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	646
15.51.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	647
15.52	Biogasanlage 53	651
15.52.1	Anlagenbeschreibung	651
15.52.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	652
15.52.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	652
15.53	Biogasanlage 54	656

15.53.1	Anlagenbeschreibung	656
15.53.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	657
15.53.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	657
15.54	Biogasanlage 55	662
15.54.1	Anlagenbeschreibung	662
15.54.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	663
15.54.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	664
15.55	Biogasanlage 56	667
15.55.1	Anlagenbeschreibung	667
15.55.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	668
15.55.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	668
15.56	Biogasanlage 57	673
15.56.1	Anlagenbeschreibung	673
15.56.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	674
15.56.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	675
15.57	Biogasanlage 58 (siehe auch BGA 26)	679
15.57.1	Anlagenbeschreibung	679
15.57.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	680
15.57.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	681
15.58	Biogasanlage 59	685
15.58.1	Anlagenbeschreibung	685
15.58.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	686
15.58.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	686
15.59	Biogasanlage 60	691
15.59.1	Anlagenbeschreibung	691
15.59.2	Beurteilung der Messtechnik	692
15.59.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	692
15.60	Biogasanlage 61	696
15.60.1	Anlagenbeschreibung	696
15.60.2	Möglichkeiten zur Beurteilung des Betriebs	697
15.60.3	Anlagenbetrieb während des Messzeitraumes	698
Anhang 3 – Verwendete Daten		702
16	Datensatz aus Primärdatenerhebung	702

VORWORT

Zurzeit wird an etwa 9000 Standorten in Deutschland Biogas zur Stromerzeugung produziert, weitere 219 Anlagen erzeugen Biomethan, das über die Erdgasnetze verteilt und ebenfalls für die Bereitstellung erneuerbare Energien zur Verfügung steht.

Die Vielzahl der Anlagen, ihre hohe technische Individualität sowie die unterschiedlichen Konstellationen hinsichtlich wirtschaftlicher und genehmigungsrechtlicher Rahmenbedingungen erschweren einen branchenweiten Vergleich bzw. die vergleichende Bewertung der verschiedenen Betriebs- und Wirtschaftskonzepte. Sieben Forschungseinrichtungen ist es jetzt gelungen, ca. 60 Biogasanlagen hinsichtlich ihrer technischen und biologischen Effizienz, ihrer Wirtschaftlichkeit und der mikrobiellen Diversität zu vergleichen sowie den Erfolg von Repowering-Maßnahmen und die Optionen für eine flexible Energiebereitstellung zu analysieren. Die beiden zugrundeliegenden Teilvorhaben „Faktoren für einen effizienten Betrieb von Biogasanlagen“ und „Systemmikrobiologie“ wurden federführend durch das Deutsche Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) bzw. durch das Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB) bearbeitet. Die vorliegenden Ergebnisse sind das Resultat aufwendiger Datenerhebungen, Betreiberbefragungen, messtechnischer Untersuchungen und mikrobiologischer Analysen. Sie stellen den Stand der Technik zur Biogaserzeugung und –verwertung in Deutschland dar.

Neben einer Broschüre, in der die Ergebnisse beider Teilvorhaben des Biogasmessprogramm III auf 180 Seite zusammengefasst sind, stellen wir Ihnen in dieser umfangreicheren Ergebnisversion zusätzlich detaillierte Methodenbeschreibungen und die ausführliche Darstellung aller im Messprogramm untersuchten Biogasanlagen zur Verfügung.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei den Anlagenbetreibern für die engagierte Unterstützung bei der Datenerhebung und Anlagenbeprobung sowie für die wichtigen Hinweise zu den Schwachstellen der Anlagentechnik. Weiterer Dank gilt den fachlichen Betreuern der Kooperationspartner, ohne deren Einsatz die bundesweite Evaluierung nicht möglich gewesen wäre.

Dr.-Ing. Andreas Schütte
Geschäftsführer der FNR

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Erläuterung
AA	Andere Alkohole
AEA	Anaerob energetischer Umsatzgrad
AEU	Anaerob energetische Ausbeute
AfA	Absetzung für Abnutzung
AKF	Aktivkohlefilter
AI	Alle Alkohole
BD	Butandiol
BG	Biogas
BGA	Biogasanlage
BTB	Betriebstagebuch
BMP III	Biogas-Messprogramm III
BZA	Betriebszweigabrechnung
CCM	Corn-Corb-Mix
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk; M-Gruppe
EWB	Anteiliger Eigenwärmebedarf
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FM	Frischmasse
FOS	Flüchtige organische Säuren
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz
FS	Bezug auf Fermentersystem
FU	Frequenzumrichter
GG	Grundgesamtheit
GO	Gas-Otto-Motor
GPS	Ganzpflanzen-Silage
GSY	Bezug auf Gesamtsystem
HIT	Herkunftssicherungs- und Informationssystem für Tiere
HRT	Hydraulische Verweilzeit
HTK	Hühnertrockenkot
ifk	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart
KG	Körnergetreide
KLR	Kosten- und Leistungsrechnung
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
MAS	Maissilage
MKS	Maiskornsilage
MPR	Methanproduktivität
MUR	Methannutzungsgrad
MS	Milchsäure
NawaRo	Nachwachsende(r) Rohstoff(e)
NFS	Niedere Fettsäuren
oTS	Organische Trockensubstanz
PD	1,2-Propandiol
PM	Putenmist
PfM	Pferdemist
QZ	Querstromzerspaner
RBV	Relative Biogasausbeute
RG	Rindergülle
RM	Rindermist
RS	Reststoffe
SG	Schweinegülle

TAC	Engl.: „Total Alkalinity of Carbonates“; Carbonatpufferkapazität
TF	Trockenfermentation
TS	Trockensubstanz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungssanstalten
VOV	Vor-Ort-Verwertung / Verstromung
ZR	Zuckerrübe
ZS	Zündstrahl-Motor

FORMELZEICHEN UND EINHEITEN

Abkürzung	Erläuterung
a	Jahr
BR	organische Raumbelastung
C:N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
h	Stunden
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Masse-%	Masse Prozent
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
N _{ges} -N	Gesamt Kjeldahlstickstoff
O ₂	Sauerstoff
ppm	Parts per million (1 ppm = 1 Millionenstel)
R ²	Bestimmtheitsmaß
t	Tonne
Vol-%	Volumen Prozent

1 Einleitung

Die zentralen Herausforderungen der Bioenergiebranche liegen in Zukunft in den Bereichen der Wirtschaftlichkeit (Kostensenkung) und der Nachhaltigkeit, wobei insbesondere herauszuarbeiten ist, in welchen Sektoren (Wärme, Strom oder Kraftstoffe) welche Bioenergieträger möglichst effizient und zielführend genutzt werden können. Insbesondere für den gut ausgebauten Biogassektor ist festzustellen, dass mit ca. 9.000 Biogasproduktionsanlagen Ende 2018 (Lenz et al., 2019) und der damit verbundenen Nutzung landwirtschaftlicher Flächen in Deutschland ein weiterer Zubau von Anlagen auf Basis der bisherigen Strategien politisch nicht mehr unterstützt wird.

Die Ergebnisse der bisherigen Ausschreibungen unter der Fassung des EEG 2017 lassen erwarten, dass ein signifikanter Neubau von Biogasanlagen für die Nutzung von Energiepflanzen nicht mehr stattfinden wird. Mit dem vorhandenen Anlagenbestand und fehlendem Zubau liegt der Fokus auf der Bestandssicherung und Optimierung bestehender Anlagen. Hierbei werden insbesondere Ersatzbeschaffungen und Neuinvestitionen fällig.

Um unter den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland für bereits existierende Anlagen zukunftsfähige Lösungen zu finden, sind innovative technisch-ökologische Strategien mit neuen Betriebsmodellen und Effizienzsteigerungen notwendig, damit diese Anlagen weiterhin wirtschaftlich betrieben werden können und somit ein großflächiger Rückbau des Anlagenbestandes ab Mitte der 2020er Jahre verhindert wird.

Bedingt durch den zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien unterliegt vor allem der Strommarkt, aber auch das gesamte Energieversorgungssystem einem grundlegenden Wandel. Der Biogassektor kann und sollte seinen Beitrag leisten, um die Transformation des Energiesystems mitzugestalten. Ein wesentlicher Anknüpfungspunkt ist hier die Flexibilisierung der Energiebereitstellung.

Kostenseitig kann festgestellt werden, dass die im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien ohnehin hohen Bereitstellungskosten für Strom aus Biogas in den letzten Jahren nicht wesentlich gesunken sind. Aufgrund der zu einem großen Anteil von Substratpreisen bestimmten Kostenstruktur muss insbesondere die Effizienz der Konversion und Verwertung der bereitgestellten Energie gesteigert werden, um einen profitablen Anlagenbetrieb gewährleisten zu können.

2 Ziele des Projektes

Als übergeordnetes Ziel des 1. Teilvorhabens des Biogas-Messprogramms III, nachfolgend BMP III genannt, wurde formuliert, anhand ausgewählter, über die Bundesrepublik verteilter Anlagen die Effizienz der Biogaserzeugung und -verwertung messtechnisch zu erfassen und mit wissenschaftlich abgesicherten Methoden zu bewerten. Nach Möglichkeit sollten hierbei insbesondere der Erfolg von Repowering-Maßnahmen und Optionen für die Flexibilisierung der Energiebereitstellung untersucht werden. Wie schon die beiden vorausgegangenen „Bundes-Messprogramme Biogas“ sollte auch das BMP III auf diese Weise den Stand der Technik von Biogasanlagen im Lichte aktueller und zukünftiger Entwicklungen abbilden.

Die verwendeten Methoden und die gewonnenen Ergebnisse sollen prinzipiell auf den deutschen Anlagenbestand übertragbar sein und einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde im ersten Schritt eine umfangreiche bundesweite Betreiberbefragung durchgeführt, um für das Messprogramm eine möglichst aussagekräftige Vorauswahl von Biogasanlagen aus dem sehr großen Anlagenpark in Deutschland treffen zu können.

Um das oben genannte übergeordnete Ziel des BMP III zu erreichen, war zunächst festzulegen, wie der übergeordnete Begriff der Effizienz für das Vorhaben definiert werden sollte. Hierbei galt es zu entscheiden, unter welchen Aspekten (ökonomisch / ökologisch / technisch / biologisch) und auf welcher Basis die „Effizienz“ betrachtet werden sollte – denn die entsprechenden Definitionen von Effizienz unterscheiden sich hinsichtlich des Bezugssystems. Während bei der häufig verwendeten ökonomischen Effizienz kostenseitige Aspekte des gesamten Betriebszweiges Biogas betrachtet werden, konzentriert sich beispielsweise die biologische Effizienz auf den Gärprozess im Fermenter. In der öffentlichen Debatte wird die Forderung nach einer höheren Effizienz oft synonym mit einer Kostensenkung verwendet. Die Detailbetrachtung zeigt allerdings, dass die Optimierung z. B. der biologischen Effizienz nicht zwangsläufig mit einer Verbesserung der Profitabilität einhergeht. Im Gegenteil kann eine Verbesserung der energetischen Effizienz durch teurere Komponenten durchaus auch eine Verschlechterung der wirtschaftlichen Effizienz mit sich bringen. Daher sollte stets eine ganzheitliche systemische Betrachtung mit klar definierter Terminologie vorgenommen werden, in welche die verschiedenen Ansätze und die Resultate eingeordnet werden können. Mit dem Gesamtsystem im Blick sollten so möglichst alle relevanten Effizienzbegriffe in die Untersuchungen einbezogen und zueinander in Bezug gesetzt werden sowie durch einen einheitlichen Bezugsrahmen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden.

Neben der Klärung und Herausarbeitung des Effizienzbegriffes waren auch die methodischen Grundlagen für die Messung und Berechnung der Effizienz von Biogasanlagen zu beschreiben. Hierbei sollten in Ergänzung zu bewährten Methoden insbesondere neuartige Ansätze zur Effizienz- und Prozessbewertung aufgegriffen und weiterentwickelt werden. So haben (Effenberger et al., 2014; Djatkov et al., 2012) einen Ansatz zur übergreifenden Effizienzbewertung und Schwachstellenanalyse an Biogasanlagen vorgestellt. Weißbach (2008) und Weinrich (2014) beschreiben eine Methode zur Beurteilung der biologisch möglichen anaeroben Abbaubarkeit. Born und Casaretto (2012) hingegen nehmen eine rohstoffbezogene Beurteilung auf Basis des Brennwertes vor, ohne Berücksichtigung von organischen, biologisch nicht abbaubaren Bestandteilen. Übergreifende Betrachtungen zur Bilanzierung von Stoff- und Energieflüssen wurden von Fischer et al. (2009) vorgenommen: diese können neben den bereits erwähnten Methoden auch mit Hilfe von Restmethanpotential- und Biogasertragsanalysen zur Effizienzbestimmung verwendet werden. Weiterhin hat das DBFZ im Rahmen des Projektes „Potentiale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen - Energetische Effizienz von Repowering-Maßnahmen“ eine Methode zur Darstellung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades entwickelt. All diese Vorarbeiten wurden als Grundlagen für das BMP III herangezogen und für die Anwendung im Messprogramm angepasst.

Eine weitere Basis für die Bewertung der Effizienz von Biogasanlagen und damit auch für die Identifizierung von Schwachstellen sind objektive Gütekriterien. Hierzu existiert mit der VDI 4631 „Gütekriterien für Biogasanlagen“ bereits eine einschlägige Richtlinie (Verein Deutscher Ingenieure, 2008). Die Gütekriterien werden anhand von Kenngrößen (oder: Kennzahlen) festgelegt, die einheitlich und eindeutig definiert sein müssen. Unterschieden werden verfahrenstechnische, ökonomische und ökologische Kenngrößen, wobei in diesem Vorhaben der Schwerpunkt auf den verfahrenstechnischen Kenngrößen liegt. Um solche Kenngrößen mit einer vertretbaren Genauigkeit und Richtigkeit zu ermitteln, sind eine Ausstattung der Anlagen mit Messtechnik und eine Regelmäßigkeit und Sorgfalt der Datenerhebung auf einem hohen Niveau erforderlich, wie sie in der Praxis in der Regel nicht erreicht werden.

In den vorhergehenden Biogas-Messprogrammen I und II wurden wesentliche verfahrenstechnische Kenngrößen-Vergleiche in Form von Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Während diese Häufigkeitsverteilungen den Stand der Technik anhand der jeweiligen Anlagenstichprobe im Messprogramm widerspiegeln und man daraus Zielwertbereiche ableiten kann, ist die Aussagekraft solcher einfachen Kenngrößen-Vergleiche begrenzt. So ist anhand einzelner Kenngrößen zunächst nicht erkennbar, wo die individuellen Schwachstellen einer Anlage liegen, worin diese begründet sind und welche geeigneten Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Hierfür ist die Betrachtung mehrerer Kenngrößen im Zusammenhang erforderlich und es stellt sich die Frage, welche dies sein sollten, damit die Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz von Anlagen ausreichend genau und zuverlässig beschrieben werden kann.

Über den reinen Kenngrößen-Vergleich hinaus geht das Werkzeug des Benchmarkings. Benchmarking im klassischen ökonomischen Sinne bezeichnet „die Suche nach den besten Industriepraktiken, die zu Bestleistungen führen“ (Siebert und Kempf, 2012). Die Kernidee des Benchmarkings ist es, existierende erfolgreiche Problemlösungen („Best Practices“) zu nutzen, um die eigenen unternehmerischen Aufgaben besser zu lösen. Betrachtet man die Entwicklung der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Energiebereitstellung aus Biogas, so ist offensichtlich, dass die unternehmerischen Herausforderungen für den profitablen Betrieb von Biogasanlagen größer werden. In diesem zunehmend kompetitiven Markt könnte das Benchmarking ein effektives Mittel sein, um die Effizienz der Biogasproduktion und -verwertung im Anlagenbestand zu steigern. Beim Benchmarking werden nicht nur Kenngrößen verglichen („Wer ist besser?“), sondern es werden weitergehende Fragen gestellt, wie: „Warum ist das Ergebnis besser?“ oder „Welche Lösungsansätze wurden verfolgt?“. Tatsächlich existieren in der Praxis in Form von Stammtischen und Arbeitskreisen von Anlagenbetreibern bereits vielfältige Aktivitäten, die im weitesten Sinne ein Benchmarking darstellen. Als ein mögliches Werkzeug für das systematische verfahrenstechnische Benchmarking von Biogasanlagen kam im BMP III das an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) entwickelte „Benchmarksystem für Biogasanlagen“ zur Anwendung.

Abgesehen von der Effizienzbewertung bzw. vom Benchmarking besteht auch in der Biogas-Analytik Verbesserungsbedarf. Zum einen ist die Reproduzierbarkeit und Richtigkeit einzelner Bestimmungsmethoden im Einzellabor sowie im Laborvergleich nicht zufriedenstellend, zum anderen können mit den vorhandenen Analyseparametern nicht alle Fragen zur Bewertung des Biogasprozesses beantwortet werden. Die Ursachen hierfür liegen in einer fehlerhaften und nicht standardisierten Probenahme, Analysendurchführung und Auswertung sowie in der begrenzten Aussagefähigkeit vorhandener Analyseparameter. Zudem fehlt auf den Anlagen oftmals ein geeignetes, ganzheitliches Messkonzept, welches mit Blick auf die zu treffenden Aussagen Online- und Offline-Messgrößen sinnvoll und dauerhaft zuverlässig kombiniert. Fehler aufgrund von Probennahmen wurden im Rahmen des BMP III durch die Verwendung von standardisierten Methodenvorschriften zur Probenahme und zur Untersuchung von verschiedenen Parametern von Anfang an minimiert. Des Weiteren wurde der Erfolg dieser Standardisierung mit Hilfe von zwei Ringversuchen (vor jeder Messphase) untersucht und verifiziert. Die Ringversuche dienten zudem dazu, Fehlinterpretationen aufgrund von Messungenauigkeiten zwischen den beteiligten Laboren zu verhindern.

Zusätzlich zu einer Verbesserung der Datenlage für die Weiterentwicklung und Validierung innovativer methodischer Ansätze zielt das BMP III auf die Dokumentation der Fortentwicklung des deutschen Anlagenbestandes ab. In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Messkampagnen durchgeführt, wenn auch zum Teil geographisch enger gefasst (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 2005; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2009; Beck, 2012; Base Technologies, 2006; Besgen, 2005; Lindorfer, 2007; Effenberger et al., 2014; Ruile et al., 2015), jedoch fehlte häufig die explizite Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse. In Ermangelung eindeutig ermittelter Ausnutzungsgrade kann die Ausschöpfung des vorhandenen (Energie-)Potentials in Biogasanlagen nur selten bewertet werden. Mit der zudem unzureichenden Erfassung von Umbaumaßnahmen und Erweiterungen an Biogasanlagen lassen sich kaum Aussagen darüber treffen, wie sich die Effizienz einer Anlage durch technische und organisatorische Maßnahmen steigern ließe. Auch an diesem Punkt setzte das vorliegende Vorhaben an, um eine Effizienzbewertung unter besonderer Berücksichtigung von Repowering- und Flexibilisierungs-Maßnahmen vorzunehmen – soweit sich hierfür auf den ausgewählten Anlagen während des Beobachtungszeitraums die Möglichkeit bot.