



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogas- produktion in Bayern

1

2010



Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Str. 36, 85354 Freising
E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 71-3450

1. Auflage: Januar 2010

Druck:

Schutzgebühr: 15,-- Euro

© LfL



Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern

Abschlussbericht

Dr.-Ing. Mathias Effenberger

Dipl.-Ing. (FH) Hans Bachmaier

Dipl.-Ing. (FH) Eunice Kränsel

Dipl.-Ing. agr. Andreas Lehner

Dr. agr. Andreas Gronauer

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung	16
1 Einleitung	19
2 Stand des Wissens.....	21
2.1 Entwicklungspfade der landwirtschaftlichen Biogastechnik	21
2.2 Umweltwirkungen der Biogastechnologie und deren Bewertung.....	25
3 Zielsetzung	28
4 Material und Methoden	29
4.1 Auswahl der Biogasanlagen für die wissenschaftliche Begleitung.....	29
4.2 Zusammenarbeit mit den Anlagenbetreibern	31
4.3 Modellierung der Prozesskette Biogas und Erfassung von Betriebsdaten	31
4.3.1 Betriebstagebuch	32
4.3.2 Automatisierte Messwerterfassung und -aufzeichnung	32
4.4 Probenahme und chemische Analytik	34
4.5 Stammdaten und Konfiguration der Pilot-Biogasanlagen.....	37
4.6 Messtechnische Ausstattung der Pilot-Biogasanlagen	39
4.7 Fließbilder der Pilot-Biogasanlagen.....	42
4.7.1 Pilot-Biogasanlage A.....	42
4.7.2 Pilot-Biogasanlage B	43
4.7.3 Pilot-Biogasanlage C.....	43
4.7.4 Pilot-Biogasanlage D.....	44
4.7.5 Pilot-Biogasanlage E	45
4.7.6 Pilot-Biogasanlage F	46
4.7.7 Pilot-Biogasanlage G.....	47
4.7.8 Pilot-Biogasanlage H.....	48
4.7.9 Pilot-Biogasanlage I	49
4.7.10 Pilot-Biogasanlage J	50
4.8 Dokumentation baulicher und technischer Einrichtungen der Pilot-Biogasanlagen	51
4.8.1 Planunterlagen und 3D-Modelle	51

4.8.2	Poster.....	52
4.8.3	3D-Darstellung der Pilotanlagen mittels Rendern	52
4.8.4	Dokumentationsmappen.....	52
4.8.5	Publikationen.....	52
4.8.6	Grundrisse und isometrische Darstellungen der Pilot-Biogasanlagen	53
4.8.7	Grundfläche und Rauminhalt der Pilot-Biogasanlagen.....	63
4.9	Bilanzierung der Treibhausgasemissionen der Stromproduktion und des Kumulierten Energieaufwands für die Pilotanlagen	65
4.9.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	65
4.9.1.1	Zieldefinition.....	65
4.9.1.2	Funktionelle Einheit	65
4.9.1.3	Untersuchungsrahmen und Untersuchungszeitraum.....	65
4.9.2	Sachbilanz	66
4.9.2.1	Modellierung Biogasanlagen.....	66
4.9.2.2	Datensammlung.....	66
4.9.2.3	Allokationsverfahren	68
4.9.3	Wirkungsabschätzung	68
4.9.4	Referenzen.....	68
4.10	Gärrestuntersuchungen und Erstellung von Nährstoffbilanzen (LfL- Agrarökologie)	69
4.11	Vorgehen zur vergleichenden Bewertung der Pilot-Biogasanlagen.....	69
5	Ergebnisse und Diskussion	72
5.1	Verfahrenstechnische Kennzahlen der Pilot-Biogasanlagen.....	72
5.1.1	Kenngrößen der Biogasproduktion	72
5.1.1.1	Einsatzstoffe	72
5.1.1.2	Eintragsmenge	73
5.1.1.3	Zusammensetzung der Einsatzstoffe	73
5.1.1.4	Zusammensetzung des Gärgemisches	78
5.1.1.5	Raumbelastung	79
5.1.1.6	Hydraulische Verweilzeit.....	80
5.1.1.7	Prozesstemperatur	81
5.1.1.8	Betrieb des Feststoffeintrags	82
5.1.1.9	Betrieb der Rührwerke	83
5.1.1.10	Prozessindikatoren im Gärgemisch.....	84
5.1.1.11	Biogas- und Methanausbeute	92

5.1.1.12	Abbau der Biomasse.....	94
5.1.1.13	Biogas- und Methanproduktivität.....	94
5.1.1.14	Zusammensetzung und Heizwert des Biogases	95
5.1.2	Kenngroßen der Biogasverwertung.....	96
5.1.2.1	Stromausbeute Frischmasse-Eintrag	96
5.1.2.2	Ausnutzungsdauer und Arbeitsausnutzung (Auslastung) des BHKW	96
5.1.2.3	Biogasverluste	98
5.1.2.4	Strombedarf der Biogasanlagen	99
5.1.2.5	Wärmebedarf der Biogasanlagen	102
5.1.2.6	Nutzungsgrad BHKW	103
5.2	Treibhausgasbilanz und kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen	104
5.3	Aspekte der Düngung (LfL-Agrarökologie)	108
5.3.1	Qualität der Gärrückstände.....	108
5.3.2	Nährstoffbilanzen	110
5.3.3	Beurteilung der Düngewirkung der Gärrückstände.....	112
6	Einordnung der Ergebnisse.....	113
7	Schlussfolgerungen und weiterführende Arbeiten.....	117
8	Veröffentlichungen.....	119
	Literaturverzeichnis	120
	Glossar	125
	Anhang	129
	Anhang 1: Anlagenspiegel zur Meldung von Kandidatenbetrieben.....	130
	Anhang 2: Muster-Vereinbarung mit den Betreibern der Pilot-Biogasanlagen für die Zusammenarbeit im Projekt	134
	Anhang 3: Lagepläne der Pilot-Biogasanlagen	139
	Anhang 4: Zusammenstellung der verfahrenstechnischen Kenngrößen der Biogasanlagen	149
	Anhang 5: Verlauf der Wochensummen der eingetragenen Substratmengen auf den Pilotanlagen	151
	Anhang 6: Analysendaten zu den Einsatzstoffen und Gärgemischen der einzelnen Pilotanlagen	156
	Weitere Materialien.....	166

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Rechtliche Rahmenbedingungen und jährlicher Zubau von Biogasanlagen in Deutschland: 1992 – 2009 (Fachverband Biogas, 2008).....	19
Abb. 2: Anzahl der in Bayern neu errichteten Biogasanlagen pro Jahr in den Jahren 1995 bis 2006 (LfL, 2007)	20
Abb. 3: Grobe Kategorisierung von Verfahren der anaeroben Behandlung (Die derzeitige Verbreitung der Verfahren in der Landwirtschaft ist durch die Stärke der Pfeile sowie die Schraffur angedeutet)	22
Abb. 4: Überblick über die häufigsten Verfahren der Nassvergärung (verändert nach LfU, 2007)	23
Abb. 5: Ablauf des Auswahlverfahrens für die Bayerischen Biogas-Pilotanlagen.....	30
Abb. 6: Modell der Prozesskette der Energiegestehung aus Biogas (verändert nach Strobl & Keymer, 2006)	31
Abb. 7: Probebohrungen an der Anschnittfläche eines Silostocks (Maissilage).....	35
Abb. 8: Boxplots der Verteilung der Analysenergebnisse für TM- und oTM-Gehalt in jeweils zehn Proben von Maissilage für zwei Probenahmevarianten	36
Abb. 9: Übersicht über die Behälterkonfiguration der Pilotanlagen	37
Abb. 10: Legende der nachfolgenden Fließbilder der Pilotanlagen.....	42
Abb. 11: Fließbild der Pilotanlage A.....	42
Abb. 12: Fließbild der Pilotanlage B.....	43
Abb. 13: Fließbild der Pilotanlage C.....	44
Abb. 14: Fließbild der Pilotanlage D.....	45
Abb. 15: Fließbild der Pilotanlage E.....	46
Abb. 16: Fließbild der Pilotanlage F	47
Abb. 17: Fließbild der Pilotanlage G.....	48
Abb. 18: Fließbild der Pilotanlage H.....	49
Abb. 19: Fließbild der Pilotanlage I	50
Abb. 20: Fließbild der Pilotanlage J.....	51
Abb. 21: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage A	53
Abb. 22: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage B.....	54
Abb. 23: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage C/C*	55
Abb. 24: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage D	56
Abb. 25: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage E.....	57
Abb. 26: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage F	58

Abb. 27: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage G	59
Abb. 28: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage H/H*	60
Abb. 29: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage I.....	61
Abb. 30: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage J.....	62
Abb. 31: Schematische Darstellung der Baukörper der Pilot-Biogasanlagen (nicht maß-stabsgetreu)	64
Abb. 32: Entwurf eines Bewertungskatalogs für die Pilotanlagen.....	70
Abb. 33: Auswahl, mittlere Masseanteile und mittlere Eintragsrate der Einsatzstoffe (Substrate) auf den Pilotanlagen.....	73
Abb. 34: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Maissilage	74
Abb. 35: oTM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Maissilage	74
Abb. 36: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Grassilage.....	75
Abb. 37: oTM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Grassilage.....	75
Abb. 38: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von GPS	76
Abb. 39: oTM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von GPS	76
Abb. 40: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Getreidekörnerschrot	77
Abb. 41: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Gülle.....	77
Abb. 42: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Rindermist und Geflügelkot.....	78
Abb. 43: N-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Rindermist und Geflügelkot.....	78
Abb. 44: Mittlerer TM-Anteil (Masse-%) als Summe der oTM und des Glührückstands (GR) in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen	79
Abb. 45: Raumbelastung (Mittelwert und Streuung der Monatsmittelwerte) der Pilotanlagen, jeweils für den/die Hauptgärbehälter und den gesamten Gärraum.....	80
Abb. 46: Hydraulische Verweilzeit der Pilotanlagen, jeweils für die erste Stufe (Mittelwert und Streuung; ohne Berücksichtigung der Rezirkulation) und den gesamten Gärraum (Mittelwert)	81
Abb. 47: Mittelwerte der hydraulischen Verweilzeit in der ersten Stufe der Pilotanlagen, ohne und ggf. mit Berücksichtigung der Rezirkulation	81

Abb. 48: Gemessene Temperaturen (Mittelwert und Streuung) in den einzelnen Gärbehältern der Pilotanlagen (hell ausgefüllte Säulen: Temperaturen in Nachgärern).....	82
Abb. 49: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)	85
Abb. 50: FOS/TAC-Werte in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung).....	86
Abb. 51: Gemessene Konzentration an Essigsäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)	86
Abb. 52: Gemessene Konzentration an Propionsäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)	87
Abb. 53: Gemessene Konzentration an iso-Buttersäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)	88
Abb. 54: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Proben aus den Nachgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)	88
Abb. 55: FOS/TAC-Werte in Proben aus den Nachgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung).....	89
Abb. 56: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und Essigsäure in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte)	90
Abb. 57: Im Labor gemessene pH-Werte in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte und Streuung)	90
Abb. 58: Im Labor gemessener pH-Wert in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen aufgetragen über der NH ₄ -N-Konzentration in denselben Proben (jeweils Mittelwerte).....	91
Abb. 59: Ammoniakalische N-Konzentration in Gärgemischproben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte).....	92
Abb. 60: Biogas- bzw. Stromausbeute aus der eingetragenen organischen Trockenmasse (Mittelwerte).....	94
Abb. 61: Spezifische installierte elektrische Leistung und mittlere elektrische Arbeitsausnutzung der Pilotanlagen.....	98
Abb. 62: Durchschnittlicher TM-Gehalt im Gärgemisch und gemessener Strombedarf der Rührwerke in der ersten Prozessstufe der Pilotanlagen	102
Abb. 63: Treibhausgasbilanz der Stromproduktion aus Biogas auf den Pilotbetrieben inkl. Gutschrift für Stromeinspeisung.....	104
Abb. 64: Treibhausgasbilanz der Stromproduktion aus Biogas auf den Pilotbetrieben ohne Gutschrift für Stromeinspeisung („Null-Szenario“).....	105
Abb. 65: Kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen inkl. Gutschrift für Stromeinspeisung	106
Abb. 66: Kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen ohne Gutschrift für Stromeinspeisung („Null-Szenario“).....	107
Abb. 67: THG-Emissionen (g CO ₂ -Äq.*kWh _{el.} ⁻¹) aufgetragen über KEA (kWh*kWh _{el.} ⁻¹) der Pilotanlagen.....	107

Abb. 68: Methanausbeute bezogen auf die Frischmasse aufgetragen über dem durchschnittlichen oTM-Gehalt des Frischmasse-Eintrags.....114

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Übersicht über die auf den Pilot-Biogasanlagen erfassten Betriebsdaten (Kenngrößen) in den Bereichen Biogasproduktion und -verwertung	33
Tab. 2: Übersicht über Analysenparameter für Proben der Substrate, der Gärgemische und der Gärrückstände	34
Tab. 3: Grundlegende verfahrenstechnische Daten der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen	38
Tab. 4: Messtechnische Ausstattung der Pilotanlagen und Messorte	40
Tab. 5: Übersicht über Messverfahren	41
Tab. 6: Brutto-Grundflächen und Brutto-Rauminhalte der Pilot-Biogasanlagen	63
Tab. 7: Berechnungsgrundlage für Ammoniakemissionen auf Ackerland und Grünland	67
Tab. 8: Skala für paarweise Vergleiche nach Saaty (1986)	70
Tab. 9: Dauer der Beobachtungszeiträume für die Ermittlung der verfahrenstechnischen Kennzahlen der Pilotanlagen	72
Tab. 10: Durchschnittlicher TM- und oTM-Anteil in der Substratration der Pilotanlagen in Prozent der Frischmasse	73
Tab. 11: Übersicht über Einstellungen des Feststoffeintrags der Pilotanlagen (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte der Eintragshäufigkeit pro Tag)	83
Tab. 12: Übersicht über Laufzeit-Einstellungen der Rührwerke der Pilotanlagen (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte der Rührzeit in Minuten je Stunde)	83
Tab. 13: Richtwerte der Prozessindikatoren flüchtige Fettsäuren und FOS/TAC für ein einphasiges Verfahren im Rührkesselreaktor (Effenberger & Lebuhn, 2008)	85
Tab. 14: Für die Pilotanlagen ermittelte Biogas- und Methanausbeuten (Mittelwerte) im Vergleich zu rechnerischen Werten nach Futterwertmodell	93
Tab. 15: Berechneter Masse- und oTM-Abbau der Einsatzstoffe in den Pilotanlagen in Prozent (Mittelwerte)	94
Tab. 16: Für die Pilotanlagen ermittelte Biogas- und Methanproduktivitäten in Kubikmeter je Kubikmeter Nutzvolumen pro Tag (Mittelwerte)	95
Tab. 17: Gemessene Methangehalte im Biogas der Pilotanlagen in Volumenprozent (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte) und resultierender Heizwert H des Brenngases (Mittelwert) in Kilowattstunden je Normkubikmeter [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$]	95
Tab. 18: Im Brenngas der Pilotanlagen gemessene Schwefelwasserstoffgehalte in parts per million (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte)	96

Tab. 19: Stromausbeuten für die Pilotanlagen in Kilowattstunden bezogen auf den Substrateintrag in Tonnen Frischmasse bzw. organische Trockenmasse [kWh*t ⁻¹] (Mittelwerte).....	96
Tab. 20: Mittlere elektrische Arbeitsausnutzung (Auslastung) und theoretische Volllaststunden der BHKW der Pilotanlagen	97
Tab. 21: Strombedarf der Pilotanlagen im Verhältnis zur Brutto-Stromproduktion und Werte des spezifischen Strombedarfs bezogen auf den Eintrag an Frischmasse [kWh*t ⁻¹] (Mittelwerte).....	100
Tab. 22: Installierte Leistung und Strombedarf der Rührwerke in der ersten Prozessstufe der Pilotanlagen bezogen auf das Nutzvolumen Fermenter (Mittelwerte).....	101
Tab. 23: Prozentuale Aufteilung des Strombedarfs für sechs Pilotanlagen.....	101
Tab. 24: Wärmebedarf der Pilotanlagen im Verhältnis zur BHKW-Wärme und spezifischer Wärmebedarf (Mittelwerte).....	102
Tab. 25: Für die Pilotanlagen ermittelter Nutzungsanteil des Wärmeabsatzes und Gesamtnutzungsgrad BHKW in Prozent (Mittelwerte)	103
Tab. 26: Ergebnisse der Gärrestuntersuchungen der Pilotanlagen (Mittelwerte und Minimal-/Maximalwerte)	108
Tab. 27: Nährstoffgehalte in den Gärresten aus den Pilotanlagen.....	109
Tab. 28: Nährstoffgehalte separierter Gärrückstände aus den Pilotanlagen (Mittelwerte).....	110
Tab. 29: Obergrenzen für den betrieblichen Nährstoffüberschuss nach Düngeverordnung.....	111
Tab. 30: Auswertung der Nährstoffsalden von neun Pilotbetrieben.....	111
Tab. 31: Spezifischer Gärraum (Fermenter-Nutzvolumen) bzw. spezifische installierte elektrische Leistung der Pilotanlagen.....	113

Abkürzungsverzeichnis

ADF	<i>Engl.</i> Acid detergent fibre („Säure-Detergentien-Faser“)
ADL	<i>Engl.</i> Acid detergent lignin (Lignin)
BGA	Biogasanlage
BGF	Brutto-Grundfläche
BRI	Brutto-Rauminhalt
Ca	Kalzium
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DFÜ	Datenfernübertragung
FFS	flüchtige Fettsäuren
FOS/TAC	Quotient aus flüchtigen organischen Säuren und gesamtem anorganischem Carbonat
GR	Glührückstand
K	Kalium
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KS4,3	Säurekapazität bis pH 4,3
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NAWARO	nachwachsende Rohstoffe
NDF	<i>Engl.</i> Neutral detergent fibre („Neutral-Detergentien-Faser“)
NH ₄ -N	Ammoniakalischer Stickstoff (NH ₄ ⁺ + NH ₃)
N _{org.}	Organischer Stickstoff
n.v.	nicht verfügbar
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TMP	Tauchmotorpropeller
TS	Trockensubstanz
oTM	organische Trockenmasse
P	Phosphor
S	Schwefel
vgl.	vergleiche
3D	dreidimensional

Zusammenfassung

Die wissenschaftliche Begleitung der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion („Pilotanlagen“) hatte die folgenden Ziele: den Kenntnisstand über den Betriebserfolg landwirtschaftlicher Biogasanlagen unterschiedlicher Konzeption und an verschiedenen Standorten zu erweitern und zu vertiefen; eine unabhängige Informationsquelle für potentielle Investoren bzw. Betreiber von Biogasanlagen zu schaffen; und Biogasanlagen mit Vorbildfunktion zu dokumentieren.

Für die Auswahl geeigneter Kandidaten wurde mit den staatlichen Landtechnikberatern zusammengearbeitet. Als Randbedingungen wurden festgelegt, dass die auszuwählenden Pilotanlagen möglichst über ganz Bayern verteilt lagen und unterschiedliche Verfahrenskonzepte und Hersteller vertreten waren. Hierbei wurde jeweils nur eine Anlage desselben Herstellers ausgewählt. Vorbedingungen für die Meldung von Anlagen waren: die ausschließliche Verwertung von Substraten nach § 8 (2) EEG („NAWARO-Anlagen“); die zumindest teilweise Verwertung der Wärmeenergie (§ 8 (3) EEG: „KWK-Bonus“); und die persönliche Eignung des Betreibers für die Unterstützung der Arbeiten im Projekt. Aus insgesamt 68 gemeldeten Betrieben wurden in einem dreistufigen Auswahlverfahren durch einen externen Fachbeirat die zehn Pilotanlagen ausgewählt.

Die Erfassung von Betriebsdaten auf den Pilotanlagen umfasste die Auswertung von Betriebstagebüchern, die automatisierte kontinuierliche Messwerterfassung sowie die regelmäßige Probenahme und chemische Analytik. Der Zeitraum der Datenerhebung umfasste je nach Anlage einen Zeitraum von 200 bis 865 Tagen. Hierbei wurden Anlagen, bei denen es während der Projektlaufzeit zu erheblichen baulichen Änderungen kam, für die Auswertung als separate Anlagen betrachtet. In der Zusammenfassung werden, soweit nichts anderes erwähnt ist, nur die Werte der jeweils letzten Ausbaustufe aufgeführt. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte für die einzelnen Anlagen über den gesamten Auswertungszeitraum.

Die Dokumentation der Pilotanlagen schließt die folgenden Unterlagen ein: Planunterlagen und 3D-Modell, Poster, 3D-Darstellung mittels Rendern, Dokumentationsmappe sowie Schriften der LfL.

Für die Pilotanlagen wurden Bilanzen der Treibhausgasemissionen aus der Stromproduktion und des kumulierten Energieaufwands (KEA) erstellt. Auf der Basis von Gärrestuntersuchungen wurden Nährstoffbilanzen berechnet. Um einen Vergleich der Pilotanlagen auf der Basis ökonomischer, umweltbezogener und verfahrenstechnischer Kenngrößen zu ermöglichen, wurde eine Bewertungsmethode entworfen. Die Rangfolge der Pilotanlagen auf Basis des Betriebserfolgs wird vom Fachbeirat Biogas der LfL nach dieser Methode ermittelt werden.

In zwei der zehn Anlagen wurden während der Projektlaufzeit regulär überhaupt keine tierischen Exkrememente eingesetzt, in zwei Anlagen nur gelegentlich bzw. in geringen Mengen. In vier Anlagen wurden tierische Exkrememente aus dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb verwertet, die übrigen Anlagen setzten Gülle bzw. Mist von anderen Betrieben ein. Im Durchschnitt häufigste NAWARO waren Mais- und Grassilage. An Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft wurden Rindergülle, Schweinegülle, Rindermist und Geflügelkot verwertet.

Alle zehn Pilotanlagen waren mehrstufig, wobei eine Anlage nach dem zweiphasigen Verfahren arbeitete, d. h. die Hydrolyse und Versäuerung fanden hier in einer separaten Stufe

statt. Sechs der zehn Anlagen verfügten über ein offenes Gärrestlager, aus dem Methanemissionen in unbekannter Höhe auftraten. Lediglich zwei der zehn Anlagen wurden durchgängig auf thermophilem Temperaturniveau (hier: $> 50^{\circ}\text{C}$) betrieben. Ein Einfluss der Prozesstemperatur auf die Prozessstabilität oder Kennwerte der Biogasproduktion war für die Pilotanlagen insgesamt nicht erkennbar.

In den BHKW überwogen die Gas-Otto-Motoren mit zwölf gegenüber den Zündstrahl-Motoren mit drei Aggregaten. Zu Beginn des Projektes lag das Spektrum der elektrischen BHKW-Leistung der Pilotanlagen bei 250 bis 380 kW, nach Erhöhung der installierten elektrischen Leistung während der Projektlaufzeit lag zum Ende der Datenaufnahme das Spektrum bei 250 bis 630 kW.

Die durchschnittlichen Gesamtraumbelastungen der Pilotanlagen lagen bei 1,9 bis $3,1 \text{ kg oTM} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ und damit auf niedrigem bis leicht überdurchschnittlichem Niveau. Die hydraulischen Verweilzeiten im gesamten Fermentersystem errechneten sich zu 62 bis 141 Tagen. Die hydraulische Verweilzeit in der ersten Prozessstufe betrug 13 bis 105 Tage ohne Rezirkulation bzw. 3 bis 104 Tage mit Berücksichtigung der Rezirkulation.

Anlagen, in denen es während der wissenschaftlichen Begleitung zu einer längerfristigen Destabilisierung des Gärprozesses kam, waren anhand der größeren Streuung der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (FFS) und des FOS/TAC-Wertes zu identifizieren. Das Niveau des FOS/TAC-Wertes war unter den Anlagen nur eingeschränkt vergleichbar. Zuvor veröffentlichte Richtwerte der Prozessindikatoren FFS und FOS/TAC für die einphasige Verfahrensführung im Rührkesselreaktor waren eingeschränkt anwendbar, um Anlagen mit Stabilitätsproblemen zu identifizieren. Die beste Treffsicherheit hatten hier Propionsäure und iso-Buttersäure.

Die für die Pilotanlagen ermittelten Biogas- bzw. Methanausbeuten bezogen auf die Frischmasse lagen mit 162 bis $258 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ bzw. 84 bis $136 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ allesamt in einem realistischen Bereich. Die auf den Frischmasse-Eintrag bezogene Methanausbeute war mit dem oTM-Gehalt der eingetragenen Frischmasse positiv korreliert. Die nach Futterwertmodell prognostizierten Ausbeuten aus der organischen Trockenmasse (oTM) wurden in neun von zehn Fällen deutlich übertroffen. Im Mittel betrug das Verhältnis aus gemessener zu prognostizierter Biogasausbeute 131 %. Aus der Massenbilanz errechneten sich Abbaugrade der oTM von 57,5 bis 89,0 %.

Das Restgaspotential im Verhältnis zur durchschnittlich auf der jeweiligen Anlage erzielten Biogasausbeute zeigte eine breite Streuung. Im Mittel lag es für die zweistufigen BGA im „kalten“ Gärtest bei 0,9 %, gegenüber 0,4 % für die dreistufigen Anlagen, wobei die Streuung bei letzteren deutlich geringer war. Das Restgaspotential sank tendenziell mit zunehmender Gesamt-Verweilzeit im Fermentersystem, wobei unterhalb einer Verweilzeit von 100 Tagen eine erhebliche Streuung auftrat. Unabhängig von der Anzahl der Prozessstufen lag bei einer Gesamtverweilzeit von 100 Tagen oder mehr das Restgaspotential in allen Fällen deutlich unter 1,0 %. Das Niveau des Restgaspotentials konnte grob anhand des FFS-Gehaltes in der Gärrestprobe beurteilt werden.

Die Methanproduktivität der Pilotanlagen wurde zu 0,65 bis $1,2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-3}$ ermittelt. Lediglich zwei Anlagen produzierten knapp unter $0,7 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ Methan, die Hälfte der Anlagen erreichte einen Wert von über $0,9 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

Im Biogas der Pilotanlagen wurden mittlere Methangehalte zwischen 50 und 57 Vol.-% gemessen. Der mittlere Methananteil im Biogas der NAWARO-Anlagen war nicht signi-

fikant verschieden vom entsprechenden Wert der Anlagen mit Verwertung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft.

Ausgedrückt als spezifische installierte elektrische Leistung bezogen auf das Nutzvolumen der Fermenter ergab sich für die Pilotanlagen ein Spektrum von 0,10 bis 0,37 kW_{el}*m⁻³; tatsächlich erreicht wurden 0,08 bis 0,25 kW_{el}*m⁻³. Das Verhältnis entspricht der erzielten Arbeitsausnutzung des BHKW, die zwischen 59 und 98 % lag. Sechs der zehn Pilotanlagen erzielten eine überdurchschnittlich gute Arbeitsausnutzung des BHKW von 91 % oder mehr (entsprechend 8000 theoretische Jahresvolllaststunden), eine weitere Anlage lag mit 89 % Auslastung im noch tolerierbaren Bereich. Oberhalb einer installierten elektrischen Leistung von 0,25 kW*m⁻³ fiel die Auslastung so deutlich ab, dass bei den betreffenden zwei Anlagen eine technologische Begrenzung erkennbar war. In den übrigen drei Fällen resultierte die mangelhafte Auslastung aus längerfristigen prozessbiologischen oder technischen Problemen.

Der ermittelte Anteil des Strombedarfs der Pilotanlagen an der Brutto-Stromproduktion zeigte eine breite Streuung von 3,7 bis 17,4 % bei einem Mittelwert von 8,8 %. Eine Abhängigkeit des Stromeigenbedarfs von der Bemessungsleistung war für die Pilotanlagen nicht erkennbar. Ebenso war während des ausgewerteten Zeitraums keine Abhängigkeit des prozentualen Stromeigenbedarfs von der Arbeitsausnutzung nachweisbar.

Der absolute und substratspezifische Strombedarf der Rührwerke übertraf in allen Fällen den Strombedarf des Feststoffeintrags deutlich. Für beide Komponenten streute der Strombedarf im Vergleich der Anlagen erheblich. Beim Feststoffeintrag war vor allem die Förderhöhe für den Strombedarf entscheidend, bei den Rührwerken der Typ. Schnell laufende Rührwerke zeigten die geringste Energieeffizienz.

Der durchschnittliche prozentuale Wärmebedarf von acht Pilotanlagen lag bei 14,5 %. Der spezifische Wärmebedarf erschien mehr durch bauliche Faktoren als durch die Substratwahl beeinflusst. Der Anteil der externen Wärmenutzung an der verfügbaren BHKW-Wärme betrug für die Pilotanlagen zwischen 2,1 und 60 % (ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Effizienz der Wärmenutzung), Nutzungsgrade größer 40 % wurden nur mit einem mehrgliedrigen Verwertungskonzept erzielt. Die auf den Pilotanlagen ermittelten Gesamt-Nutzungsgrade des Biogases von ca. 30 bis 65 % zeigen, dass noch ein enormes Potential besteht, die Effizienz der Biogasverwertung zu steigern.

Für die Stromproduktion aus Biogas wurden für alle Pilotanlagen erhebliche Reduktionen an THG-Emissionen im Vergleich zur Stromproduktion aus einem fossilen Referenzsystem errechnet. Allerdings ergaben sich zwischen den Anlagen erhebliche Unterschiede. Die THG-Reduktionen gegenüber der Referenz betrugen zwischen 614 und 869 g CO₂-Äq*kWh_{el}⁻¹. Auch der kumulierte Energieaufwand (KEA) lag bei den betrachteten BGA erheblich niedriger als bei der fossilen Referenz. Hier wurden Einsparungen von 2,29 bis 2,93 kWh_{fossil}*kWh_{el}⁻¹ erzielt.

Die im Vergleich der Pilotanlagen aber auch für die einzelnen Anlagen sehr unterschiedliche Zusammensetzung der Gärrestproben erlaubt es nicht, allgemein gültige „Faustzahlen“ wie für die Nährstoffgehalte tierischer Ausscheidungen abzuleiten. Für eine sinnvolle und effiziente Düngeplanung ist zu jedem der Hauptausbringtermine eine Gärrestuntersuchung erforderlich. Im Durchschnitt der Betriebe lagen die Ergebnisse des Nährstoffvergleiches bei Stickstoff weit unter den Zielvorgaben der Düngeverordnung für die Jahre 2009 bis 2011. Einzelne Betriebe überschritten den Zielwert von 60 kg*ha⁻¹ auf Grund des Zukaufs von Stickstoff über Mineraldünger bei gleichzeitigen hohen Gärrestausbringmengen.

1 Einleitung

Die deutsche Biogasbranche ist Turbulenzen gewöhnt. Zu Beginn dieses Projektes Mitte 2005 befand sie sich mitten im Boom, der durch die erste Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes vom 21.7.2004 ausgelöst worden war. In 2006 erreichte dann der Zubau an Biogasanlagen den bisherigen Höchstwert von 820 (Abb. 1).

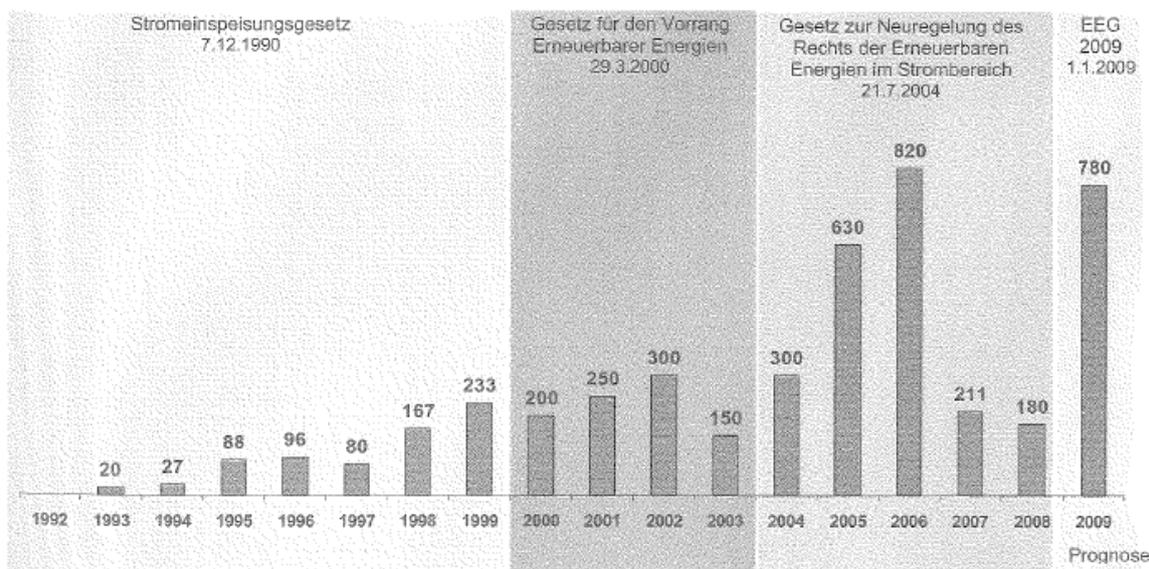


Abb. 1: *Rechtliche Rahmenbedingungen und jährlicher Zubau von Biogasanlagen in Deutschland: 1992 – 2009 (Fachverband Biogas, 2008)*

Im darauf folgenden Jahr brachen die Umsätze der Anlagenhersteller jedoch deutlich ein, nachdem die Vorbereitung der zweiten EEG-Novelle in Verbindung mit dramatischen Preisverschiebungen bei den Agrarrohstoffen für Unsicherheit bei den potentiellen Investoren sorgte. Mit den verbesserten rechtlichen Rahmenbedingungen des EEG 2009 ist das Geschäft mit der Biogasproduktion wieder in Fahrt gekommen und es wird für das laufende Jahr ein weiterer Zubau von knapp unter 800 Biogasanlagen in Deutschland prognostiziert (Abb. 1).

In Bayern verlief die beschriebene Entwicklung qualitativ praktisch in gleicher Weise wie auf Bundesebene, wobei hier jedoch die bisherige Spitze des Anlagenneubaus bereits in 2005 erreicht wurde (Abb. 2). Im Jahr 2006 wurde in Bayern auf Grund einer repräsentativen Umfrage ein Bestand von 1.354 Biogasanlagen ermittelt (LfL, 2007). Dies entsprach im besagten Jahr knapp 40 % des Anlagenbestandes in Deutschland. In 2007 brach der Zubau mit lediglich 45 Anlagen ebenfalls dramatisch ein (Röhling & Wild, 2008).

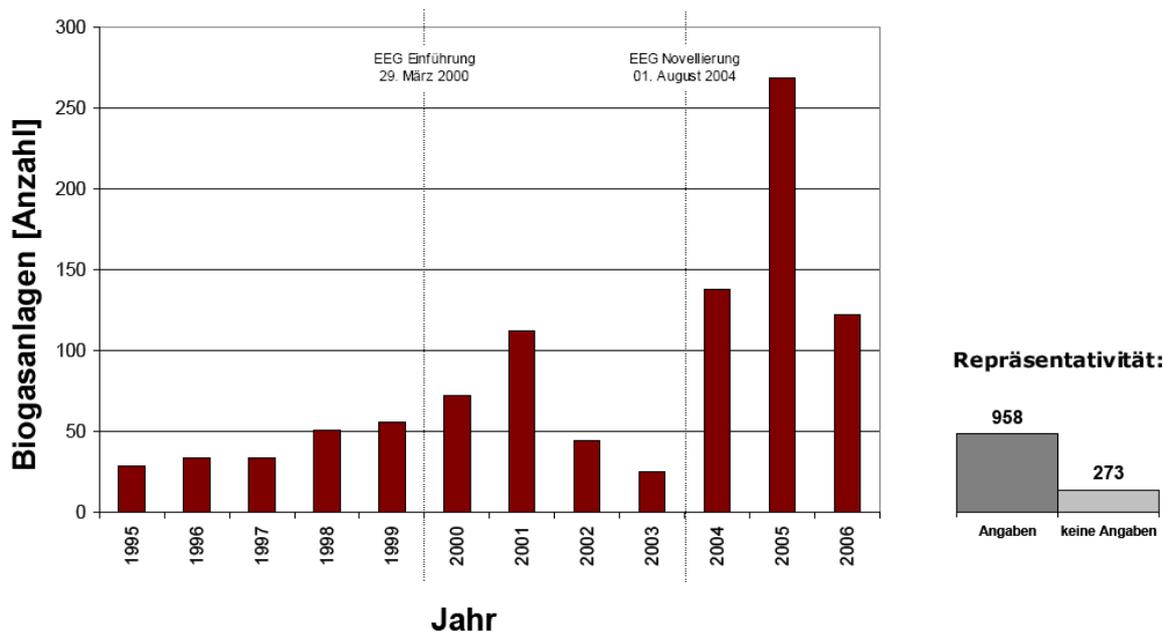


Abb. 2: Anzahl der in Bayern neu errichteten Biogasanlagen pro Jahr in den Jahren 1995 bis 2006 (LfL, 2007)

Im Durchschnitt Bayerns deckte die Stromproduktion aus Biogas in 2006 rund 1,9 % des Strombedarfs und damit einen etwa doppelt so hohen Anteil wie im Bundesdurchschnitt. Die landwirtschaftliche Biogaserzeugung zur Bereitstellung von Strom und Wärme, welche vor 15 Jahren noch im Wesentlichen ein Betätigungsfeld für Idealisten war, ist mittlerweile zu einem wichtigen Produktionszweig der Landwirtschaft geworden, dessen Bedeutung weiter zunehmen wird. Angesichts der erheblichen Investitions- und Betriebskosten einer Biogasanlage sind hohe Anforderungen an deren Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu stellen. Hier hat es in den letzten Jahren durch konstruktive Weiterentwicklung und teilweise Standardisierung der Komponenten deutliche Verbesserungen gegeben. Gleichzeitig hat die Komplexität der Anlagen zugenommen.

Die oben beschriebene dynamische Entwicklung der Branche hat zur Folge, dass die unabhängige Forschung und Beratung zur landwirtschaftlichen Biogastechnologie der Praxis des Anlagenbaus teilweise hinterher hinkt. Belastbare Daten zum Betriebserfolg von Biogasanlagen in der landwirtschaftlichen Praxis sind rar. Eine adäquate Beratung von Betreibern bereits in der Phase der Projektierung und bei Problemen nach Inbetriebnahme der Biogasanlage ist damit nicht immer gewährleistet.

Um den technischen Fortschritt und den Betriebserfolg landwirtschaftlicher Biogasanlagen abzubilden, sind Messungen und Beobachtungen in der Praxis erforderlich. Die LfL wurde daher vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten innerhalb des Aktionsprogramms Biogas beauftragt, zehn landwirtschaftliche Biogasanlagen, die so genannten „Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion“, wissenschaftlich zu begleiten und hinsichtlich verfahrenstechnischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte zu bewerten. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse dieser Arbeiten für Zwecke der Wissenschaft, der Beratung und der Bildung zusammen und enthält grundlegende Dokumentationsmaterialien der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen. Darüber hinaus sind umfangreiche Dokumentationen der einzelnen Anlagen bei der LfL auf Anforderung erhältlich (siehe „Weitere Materialien“).

2 Stand des Wissens

Im Folgenden wird ein grober Überblick über die anerkannten Regeln und den Stand der Biogastechnik in der Landwirtschaft gegeben und auf einschlägige Literatur verwiesen. Unter den „anerkannten Regeln der Technik“ werden hierbei diejenigen Anwendungen verstanden, die sich in der Praxis bewährt haben und breite Anwendung finden. Im Übrigen ist es ein Hauptziel dieses Berichts, diese Regeln der Biogastechnik anhand der zehn ausgewählten Betriebe detailliert darzustellen. Der „Stand der Technik“ geht darüber hinaus und bezeichnet die aktuellen technischen Möglichkeiten des Biogasanlagenbaus unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen (DBFZ, 2008). In einem weiteren Unterkapitel wird auf die Umweltwirkungen der Biogastechnologie und deren Bewertung eingegangen.

2.1 Entwicklungspfade der landwirtschaftlichen Biogastechnik

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Biogastechnik begann in Deutschland in den 1950er Jahren. Damals wurden etwa 50 Biogasanlagen errichtet, von denen aber viele nach kurzer Betriebszeit wegen mangelhafter Funktion wieder stillgelegt wurden (LfU, 2007). Mit der Ölkrise Anfang der 1970er Jahre begann eine zweite Biogas-Bewegung, so dass 1985 in Deutschland 75 Anlagen erfasst wurden. Der endgültige Aufschwung für die Biogasnutzung seit Beginn der 1990er Jahre wurde durch die gesetzliche Regelung der Einspeisevergütung für Strom aus Biogas und die Rahmenbedingungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes angestoßen.

Von den wichtigsten verfügbaren Verfahrensvarianten der anaeroben Behandlung spielt in der landwirtschaftlichen Biogastechnologie die kontinuierliche „Nassvergärung“ die Hauptrolle (Abb. 3). Von „Nassvergärung“ wird i. A. dann gesprochen, wenn der Trockenmassegehalt (TM) im Gärgemisch unter 13-15 % liegt und dieses mit herkömmlichen Aggregaten gepumpt werden kann (Weiland, 2001). Mit diesem Verfahren werden aus den in der Landwirtschaft gängigen Substraten hohe Methanausbeuten bei wirtschaftlich vertretbaren Baukosten erzielt.

Demgegenüber liegt eine sogenannte „Trockenfermentation“ vor, wenn das Substrat entsprechend seines Wassergehaltes bei 30-35 % TM-Gehalt vergoren wird (Ottow & Bidlingmaier, 1997). In dieser Verfahrensschiene spielt in der Landwirtschaft bisher nur das sogenannte Perkolationsverfahren eine Rolle. Hierbei wird die Biomasse gemischt mit Gärrest in Boxenfermentern gestapelt und berieselt. Für die Vergärung nachwachsender Rohstoffe, die typischerweise relativ strukturarm sind, ist dieses Verfahren wenig geeignet und erfordert einen sehr hohen Anteil an Gärrest als Impfmateriale (Kusch, 2007).

Die Biogastechnik entwickelte sich ausgehend von einfachen individuellen Lösungen der Betreiber und einiger weniger Planer zunächst relativ unkoordiniert. In den 1990er Jahren entstanden die ersten Komplettanbieter als Neugründungen oder aus dem Behälterbau kommend. Die Komponenten dieser Biogasanlagen basierten zu einem guten Teil auf der Gülletechnik. Mit dieser Technik ließen sich auch die relativ häufig zum Einsatz kommenden flüssigen und pastösen Abfallstoffe aus der Lebensmittelbranche verarbeiten. Nach Einführung des EEG wuchs mit der Zahl der Biogasanlagen auch die der Anbieter, wobei eine relativ deutliche geographische Zweiteilung in Nord- und Süddeutschland bestehen blieb.

Von den möglichen Verfahrensvarianten der Nassvergärung (Abb. 4) kommt in der Landwirtschaft das Durchfluss- und das Durchfluss-Speicher-Verfahren zum Einsatz. Letzteres unterscheidet sich vom Durchfluss-Verfahren lediglich dadurch, dass das in einem gasdicht verschlossenen Gärrestlager gebildete restliche Biogas ebenfalls erfasst wird. In Bayern wurden laut der letzten repräsentativen Umfrage knapp 29 % der Biogasanlagen im Durchfluss-Speicher-Verfahren betrieben (LfL, 2007). Anlagen, die einer Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz bedürfen, sind praktisch nur noch in dieser Verfahrensweise genehmigungsfähig. Auch aus Gründen des Klimaschutzes ist diese Bauweise zu bevorzugen. Im Falle kleiner Biogasanlagen, die auf Tierhaltungsbetrieben errichtet werden und dort bestehende Lagerbehälter nutzen, ist aus Gründen der wirtschaftlichen Verhältnismäßigkeit unter Umständen das Durchfluss-Verfahren akzeptabel.

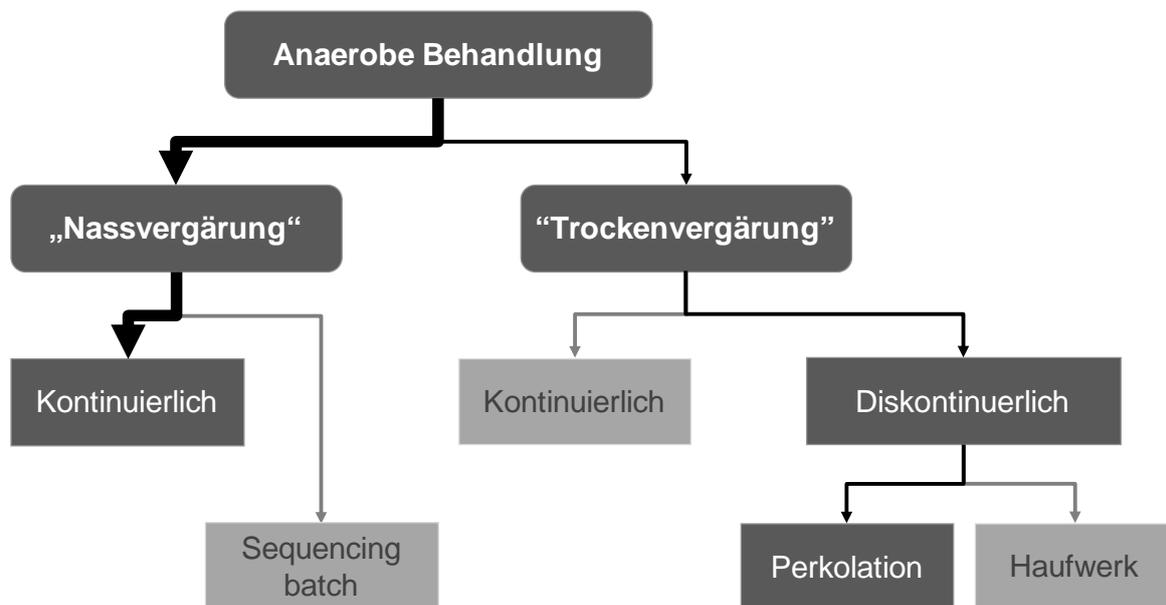


Abb. 3: Grobe Kategorisierung von Verfahren der anaeroben Behandlung (Die derzeitige Verbreitung der Verfahren in der Landwirtschaft ist durch die Stärke der Pfeile sowie die Schraffur angedeutet)

Ein deutlicher Entwicklungsschub der Technologie der Biogasproduktion wurde durch die erste Novelle des EEG ausgelöst, da man sich nun sehr stark auf die Verwertung trocken-substanzreicher und stark Lignocellulose haltiger Einsatzstoffe wie Ganzpflanzensilagen und Festmist konzentrierte. In Bayern setzten im Jahr 2007 77,2 % der Biogasanlagen nachwachsende Rohstoffe in Mischung mit tierischen Fäkalien und 7,8 % der BGA ausschließlich NAWARO ein (Röhling & Wild, 2008). Häufigster nachwachsender Rohstoff war Mais mit 58,2 % Einsatzhäufigkeit, gefolgt von Getreidekörnern, Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage, Sonnenblumen und Sudangras/Hirse. Mais ist nach dem aktuellen Stand der Forschung unter den verschiedenen Standortbedingungen in Deutschland sowohl als Hauptkultur als auch in Zweikulturnutzung die ertragsstärkste und ökonomisch vorteilhafteste Energiepflanze für die Biogasgewinnung (FNR, 2008).

Die technologischen Herausforderungen bei der Vergärung Lignocellulose reicher Einsatzstoffe liegen vor allem in der Eintragstechnik für die feste Biomasse sowie in der Rührtechnik. Der Technologiebonus für Verfahren der sogenannten „Trockenfermentation“ führte zur Weiterentwicklung von Anlagenkonzepten mit liegenden Fermentern, in denen Gärgemische mit deutlich höheren Trockenmassegehalten verarbeitet werden kön-

nen. Seit ca. zwei bis drei Jahren versuchen nun auch Anbieter von Verfahren aus dem Bereich der Biomüll-Vergärung im Bereich der Landwirtschaft Fuß zu fassen. Deren Anlagen haben allerdings auf Grund ihrer aufwändigen Verfahrenstechnik vergleichsweise hohe Baukosten. In Bayern waren Anfang 2007 in 94 % der Biogasanlagen die Gärbehälter der ersten Stufe nach wie vor in klassischer stehender Bauweise ausgeführt (LfL, 2007). Wo vorhanden (ca. 2/3 der Anlagen) waren Nachgärbehälter in der Regel ebenfalls als Rührkessel ausgestaltet.

Der Boom der Nachfrage nach Biogasanlagen in den Jahren 2004 bis 2006 ließ die Zahl und Größe der Anbieter am Markt sprunghaft ansteigen. Die technische Weiterentwicklung fand zum Teil in den Entwicklungsabteilungen der Unternehmen (soweit vorhanden), zum Teil auf den Betrieben statt. Ausführliche Informationen über die verfügbare Technik der Biogasproduktion in der Landwirtschaft finden sich z. B. in FNR (2005b), Hopfner-Sixt (2005) und Johann Heinrich von Thünen-Institut (2009).

Bezeichnung	Ablauf des Verfahrens	Bemerkungen
Durchflussverfahren	<p>Das Diagramm zeigt drei Behälter in Reihe: Vg (Vorgärbehälter), F.1 (Fermenter) und Lb (Nachgärbehälter). Pfeile zeigen einen kontinuierlichen Substratfluss von links nach rechts durch alle Behälter. Über dem F.1-Behälter sind zwei Pfeile nach oben gezeichnet, die eine gleichmäßige Gasproduktion andeuten.</p>	Kontinuierlicher Substratfluss, gleichmäßige Gasproduktion, keine gesicherte Verweilzeit, hohe Faulraumeffizienz
Speicherverfahren	<p>Das Diagramm zeigt zwei Zustände: 'Beginn' und 'Ende'. Im 'Beginn' ist ein Behälter (F.1) fast voll mit Substrat, daneben ein kleinerer Behälter (Vg). Im 'Ende' ist der Behälter (F.1) fast leer, daneben ein größerer Behälter (Vg). Ein Pfeil über dem F.1-Behälter zeigt keine kontinuierliche Gasproduktion an.</p>	Fermenter = Lagerbehälter, keine kontinuierliche Gasproduktion, hohe Verweilzeit, mittlere Faulraumeffizienz, hohe Behältervolumina
Durchfluss-Speicherverfahren	<p>Das Diagramm zeigt drei Behälter in Reihe: Vg, F.1 und Lb. Die Behälter sind teilweise gefüllt. Pfeile zeigen einen kontinuierlichen Substratfluss durch alle Behälter. Über dem F.1-Behälter sind zwei Pfeile nach oben gezeichnet, die eine gleichmäßige Gasproduktion andeuten.</p>	Vorgrube und Fermenter im Durchfluss, gleichmäßige Gasproduktion, keine gesicherte Verweilzeit, hohe Faulraumeffizienz

Abb. 4: Überblick über die häufigsten Verfahren der Nassvergärung (verändert nach LfU, 2007)

Auf Seiten der Biogasverwertung dominieren bisher Blockheizkraftwerke auf Basis von Verbrennungsmotoren (Fremdzünder oder Selbstzünder mit Stützfeuerung) auf der wirtschaftlichen Grundlage der Vergütungsregelungen des EEG für den eingespeisten elektrischen Strom. Mikrogasturbinen werden seit einigen Jahren als Alternative zu Kolbenmotoren im unteren und mittleren Leistungsbereich (bis 500 kW_{el}) diskutiert, wobei die hauptsächlichlichen Vorteile im wesentlich geringeren Wartungsbedarf bei längeren Standzeiten und in der Tatsache liegen, dass die Wärme ausschließlich im Abgas und auf höherem Temperaturniveau gebunden ist (Müller, 2005).

In jüngster Zeit hat die Entwicklung alternativer Technologien zur energetischen Verwertung des Biogases an Bedeutung gewonnen, namentlich Verfahren zu Aufbereitung des Biogases mit dem Ziel der Einspeisung in das Erdgasnetz. Die technisch ausgereiften Ver-

fahren der Druckwasserwäsche und der Druckwechseladsorption sind hierfür am gängigsten, aber erst für Anlagen mit einer Rohgasproduktion deutlich oberhalb von $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ wirtschaftlich darstellbar. Eine Alternative ist insbesondere die Aminwäsche, die allerdings noch der Weiterentwicklung bedarf. Diese weist hinsichtlich der vorgenannten Verfahren die Vorteile einer besseren Produktqualität, eines geringeren Methanschlupfes, eines niedrigeren Eigenstromverbrauchs sowie geringerer Kosten für kleinere Anlagen ($\leq 500 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ Rohbiogasproduktion) auf (Fraunhofer UMSICHT, 2008).

Die Verwendung von aufbereitetem Biogas als Kraftstoff ist in Deutschland noch marginal und hängt an der Verbreitung von Erdgasfahrzeugen. Seit Juni 2006 existiert eine Biogastankstelle in Jameln/Wendland. Seit März 2009 bietet eine Tankstelle am Münchner Flughafen Erdgas mit einem Anteil von 20 % Biogas an. Biogas weist unter allen derzeit verfügbaren Biokraftstoffen die höchste Flächenproduktivität auf (FNR, 2009). Unter den Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz ist die stationäre Verwendung von Biogas zur Bereitstellung von Strom und Wärme dennoch günstiger zu bewerten (Öko-Institut, 2004).

Um die auftretenden Schwachstellen von Biogasanlagen neuerer Bauart systematisch zu analysieren, wurde eine vertiefte Auswertung der Daten von 31 Biogasanlagen durchgeführt, die am Bundesmessprogramm Biogas II teilgenommen hatten. Diese Anlagen wurden mit zwei Ausnahmen in den Jahren 2004 und 2005 in Betrieb genommen. Der größte Anteil der insgesamt 1.168 registrierten Störfälle entfiel auf die folgenden Funktionsbereiche (KTBL, 2009):

- Blockheizkraftwerk (45,5 %)
- Feststoffeintrag (12,9 %)
- Pumpen, Rohrleitungen und Armaturen (8,2 %)
- Rührwerk (7,1 %)
- Gärprozess (4,6 %).

Damit trat fast die Hälfte der Störungen nicht an der Anlagentechnik für die Biogasproduktion, sondern an der gasverwertenden Einheit auf. Um hieraus keine falschen Schlüsse zu ziehen, muss allerdings berücksichtigt werden, dass letztere Komponenten eine sensible Regelungstechnik aufweisen und entsprechende Ansprüche an die Aufstellungsbedingungen (Belüftung und Kühlung) und die Brennstoffqualität (d. h. die Biogaszusammensetzung) stellen. Des Weiteren waren diese Störungen meist kurzfristig zu beheben und wirkten sich weitaus weniger auf den Ausnutzungsgrad der Anlage und damit die Einnahmen aus dem Stromverkauf aus, als Störfälle im Bereich der Anlagentechnik und insbesondere die Destabilisierung des Gärprozesses (KTBL, 2009).

An zweiter Stelle in der obigen Rangfolge der Störungshäufigkeit stehen die maschinenbaulichen Hauptkomponenten der gasproduzierenden Anlage. Hier spiegeln sich die erwähnten gestiegenen technischen Anforderungen durch die Auswahl der Substrate wider. Bei den Systemen für den Feststoffeintrag waren typischerweise die Förderschnecken nicht ausreichend aufeinander abgestimmt und zu schwach dimensioniert. Außerdem wurde der Verschleiß durch die säurehaltigen Silagen der Energiepflanzen unterschätzt. Das feststoffreiche Material verursachte häufig Verstopfungen in den Pumpen und Rohrleitungen. Störfälle an den Rührwerken traten meist in der höher belasteten ersten Vergärungsstufe auf Grund von Überhitzung, Lagerdefekt oder Verschleiß auf (KTBL, 2009).

Probleme mit der Gärbiologie beeinträchtigen die Anlagenverfügbarkeit am stärksten. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und reichen von einer schlichten Überlastung des Gärprozesses auf Grund zu schnellen Anfahrens oder eines zu raschen Substratwechsels über Sink- und Schwimmschichten oder Schaumbildung bis hin zu einem Mangel an Spurenelementen oder einem Übermaß an Hemmstoffen. Der Gärprozess stellt ein komplexes biochemisches System dar, das einzelne „Kippunkte“ aufweist und zwischen diesen Kippunkten relativ träge ist. Wird eine Destabilisierung der Gärbiologie mangels kontinuierlicher Prozesskontrolle nicht rechtzeitig bemerkt, ist daher mit erheblichen Einnahmeausfällen zu rechnen (Effenberger et al., 2007; KTBL, 2009).

Für eine automatisierte Prozessregelung der Biogasproduktion mangelt es derzeit noch an einsatzreifen Sensoren für die direkte Messung biochemischer Prozessindikatoren in der Gärsuspension. Relativ weit fortgeschritten ist die auf Mikrowellen basierende Inline-Bestimmung des Trockenmassegehaltes der Gärsuspension und deren Einbindung in ein Regelsystem (Nacke et al., 2008). Auch die Messung des Redoxpotentials im Gärgemisch wird als geeignet für eine Prozessregelung beschrieben (Weiland, 2008).

Die Inline-Bestimmung von Prozessindikatoren mittels Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) und darauf aufbauend die Entwicklung von Regelstrategien werden derzeit von mehreren Forschergruppen bearbeitet, wobei bereits ein NIRS-Messsystem für die Installation auf Biogasanlagen angeboten wird. Für eine prädikative Steuerung der Vergärung nachwachsender Rohstoffe kann man prinzipiell auf existierenden mathematischen Modellen aus der Abwasserbehandlung aufbauen, welche allerdings an die veränderten Substrateigenschaften angepasst werden müssen (Wichern et al., 2008).

2.2 Umweltwirkungen der Biogastechnologie und deren Bewertung

Die Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Biogas werden sowohl in der Öffentlichkeit als auch in Wissenschaftskreisen seit Jahren diskutiert. In der Öffentlichkeit ist insbesondere die Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Zusammenhang mit der Diskussion über die Flächenkonkurrenz des Anbaus von Nahrungsmittel- und Energiepflanzen in die Kritik geraten. Daneben gibt es naturschutzfachliche Vorbehalte, die sich vor allem auf die Ausweitung des Maisanbaus für die Biogasproduktion beziehen. Mit der zunehmenden Verbreitung von Biogasanlagen treten auch vermehrt Akzeptanzprobleme auf. Diese beziehen sich bei siedlungsnahen Standorten auf Lärm- und Geruchsemissionen, bei größeren Anlagen im Außenbereich eher auf das Verkehrsaufkommen.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu den Umweltwirkungen der Biogasproduktion in der Landwirtschaft verwenden durchweg eine Methodik, die sich an die Vorgaben der Ökobilanzierung nach DIN ISO 14040 und 14044 anlehnt. Unterschiede zwischen den Arbeiten betreffen vor allem den gewählten Untersuchungsrahmen und die Methode der Wirkungsabschätzung. Da die Ergebnisse von Ökobilanzen stark davon abhängig sind, welcher Bilanzierungsrahmen, welches Verfahren zur Bewertung der Umwelteffekte und welche sonstigen Annahmen zur Berechnung getroffen wurden, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse wenig sinnvoll. In der folgenden Literaturübersicht sollen aus diesem Grund die Ergebnisse der einzelnen Studien nicht in Zahlen, sondern argumentativ erläutert werden. Bei allen zitierten Arbeiten ist das Bilanzierungsobjekt eine modellhafte Biogasanlage. In keiner der Veröffentlichungen werden Praxisanlagen bilanziert.

Jungmeier et al. (1999) verglichen anhand eines Rechenmodells mit Biogas befeuerte wärmegeführte Blockheizkraftwerke mit fossilen Energiesystemen. Energie aus Biogas reduzierte hierbei die Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Nutzung fossiler Energie-

träger um 82 bis 93 %. Wurden zusätzlich Referenznutzungen (z.B. Vergärung versus Güllelagerung oder Brache versus NAWARO-Anbau) und die Nutzung von Nebenprodukten (Düngergutschrift) berücksichtigt, überstieg die Einsparung von Treibhausgasen durchweg die bei der Energieproduktion aus Biogas frei werdenden Emissionen. Auch der Ersatz fossiler Energiesysteme wurde über eine Gutschrift berücksichtigt.

Edelmann et al. (2001) überprüften die Eignung von Strom aus Biogas als Ökostrom nach den Vorgaben des Vereins Ökostrom in der Schweiz. Die Untersuchung erfolgte mit der Bilanzierungsmethode „Ecoindicator '99“. In der Studie wurden einstufige landwirtschaftliche Anlagen betrachtet, die Rindergülle, Schweinegülle und organische Reststoffe (z.B. Panseninhalt, Öl, Gemüseabfälle) einsetzen. Dabei wurden offene Gärrestlager und die Gärrestausrückführung als Quellen klimaschädlicher Gase und von Ammoniak identifiziert. Es wurde daher die Abdeckung des Gärrestlagers und eine bodennahe Ausbringung des Gärrests empfohlen. Bei Berücksichtigung der Gutschrift für die zu Heizzwecken genutzte BHKW-Abwärme erfüllte Strom aus Biogas die Bedingungen der Ökostrom-Zertifizierung. Es wurde angeregt, im Falle der Zertifizierung „Minimalbedingungen“ zu fordern (Edelmann et al., 2001: S. 80) – unter anderem ein gasdichtes Gärrestlager und die Verpflichtung zur emissionsarmen Gülleausbringung.

Nach den Ausführungen von Wilfert et al. (2004) trägt eine „Stromerzeugung aus Biogas merklich zu einer Reduktion der energiebedingten Klimagasfreisetzungen und zur Einsparung von fossilen Energieträgern“ bei. Untersucht wurden modellhafte Biogasanlagen verschiedener Größen mit den Substraten Rindergülle, pflanzliche Nebenprodukte und Maisilage. Eine zusätzliche Wärmenutzung sowie eine Abdeckung des Gärrestlagers erhöhte die Einsparungen. Die versauernd wirkenden Emissionen bei der Stromproduktion aus Biogas übertrafen die Emissionen der Nutzung fossiler Energieträger. Für die versauernde Wirkung wurden vor allem Ammoniumemissionen bei der Gärrestlagerung und Stickoxid- und Schwefeldioxidemissionen bei der Biogasverbrennung verantwortlich gemacht. Die Annahmen, die bezüglich der Emissionen bei Lagerung und Ausbringung von Gärresten und unvergorener Gülle getroffen wurden, hatten wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz. Optimierte Lagerungs- und Ausbringungsverfahren für die vergorene Gülle würden daher merklich zu Minderemissionen bei der Biogasnutzung beitragen.

In einer Untersuchung von Möller et al. (2006) wurden die Auswirkungen einer Biogasanlage auf die Stoffkreisläufe in einem ökologisch wirtschaftenden Betrieb betrachtet. Die Biogastechnologie wurde positiv bewertet, da durch die Vergärung von Zwischenfrüchten vor allem Stickstoff vermehrt im System gehalten werden kann und auch über den Gärrest eine gezieltere Düngergabe als durch Gründüngung möglich ist. Auch wurde vermutet, dass sich durch die Vergärung der Zwischenfrüchte an Stelle deren Einarbeitung in den Boden Lachgas- und Nitratemissionen vermindern lassen. Ein weiterer Vorteil kann für tierhaltende Betriebe die Umwandlung von Festmist in der Biogasanlage zu flüssigem Gärrest sein, welcher sich zielgerechter zur Düngung einsetzen lässt. Zusammenfassend lässt sich demnach mit einer Verminderung der Emissionen und mit einer Ertrags- und Effizienzsteigerung von ökologisch wirtschaftenden Betrieben rechnen, wenn eine Biogasanlage integriert wird.

Scholwin et al. (2006) berechneten die Ökobilanz verschiedener modellhafter Biogasanlagen und führten eine Reihe von Sensitivitätsanalysen durch. Als Substrate wurden verschiedene Anteile von Rinder- und Schweinegülle, Maissilage, Getreideganzpflanzensilage und Grassilage angenommen. Der Bilanzierungsrahmen der Ökobilanz umfasste den gesamten landwirtschaftlichen Betrieb. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass durch die Integration einer Biogasanlage in einen tierhaltenden Betrieb die Treibhausgasemissi-

onen, der Primärenergieaufwand sowie Versauerung und Eutrophierung reduziert und aufgrund von Gutschriften sogar Senken gebildet werden können. Biogasanlagen, die ausschließlich mit pflanzlichen NAWARO betrieben werden, könnten im schlechtesten Fall für die Treibhausgasemissionen an das Niveau der Erdgasnutzung heranreichen. Auch die versauernden und eutrophierenden Umweltwirkungen reiner NAWARO-Anlagen wurden als erheblich eingestuft. Im Vergleich verschiedener NAWARO schnitten Pflanzen mit hoher Biomasseproduktion hinsichtlich der betrachteten Umweltwirkungen besser ab - wenn auch einschränkend erwähnt wird, dass sich dieses Bild für nicht erfasste Umweltwirkungen eventuell gegenteilig darstellt (z.B. für Erosion, Verdichtung oder Humuszehrung). Für Biogasanlagen mit hohen NAWARO-Anteilen wurden zur Minimierung der Umweltwirkungen von den Autoren die folgenden Forderungen formuliert: effiziente Vergärung, Erfassung der Gasbildung im Gärrestlager und eine Wärmenutzung, die in möglichst großem Maße fossile Energieträger ersetzt.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Umweltwirkungen, berücksichtigte Hartmann (2007) den Flächenverbrauch der Biogasanlagen, hier allerdings im industriellen Maßstab. Die verwendete Methodik kumuliert die Umweltwirkungen der verschiedenen Wirkkategorien. Dabei hatte der Flächen- und Energiebedarf der Biomasseproduktion den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Nachwachsende Rohstoffe mit hohen Flächenerträgen, der Einsatz biogener Abfälle und die Nutzung der BHKW-Wärme konnten die Gesamtbilanz erheblich verbessern. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass bei Nutzung aller Möglichkeiten zur Optimierung die Stromproduktion aus Biogas sehr geringe ökologische Effekte verursacht.

In der Arbeit von Pölking et al. (2006) wurde das „veränderte Anbauverhalten und die Nutzung biologischer Reststoffe auf die Landwirtschaft [...] und deren Auswirkungen auf Natur und Landschaft sowie andere natürliche Umweltkompartimente“ untersucht (z. B. Grund- und Oberflächengewässer). Die größten Veränderungen in der Landbewirtschaftung ergaben sich für Biogasanlagen, die nur mit pflanzlichen NAWARO beschickt wurden. Die Produktionsumstellung bei Inbetriebnahme der Biogasanlage zog hier oft negative ökologische Begleiterscheinungen nach sich. Biogasanlagen, die in einen landwirtschaftlichen Betrieb integriert sind und vorwiegend anfallende Reststoffe verwerten, verändern die Landbewirtschaftung wenig und leisten aus ökologischer Sicht oft zusätzliche positive Effekte (z. B. verringerter Mineraldüngereinsatz).

Hub (2007) weist am Beispiel der Biogastechnologie auf grundlegende Probleme bei der Erstellung und Interpretation von Ökobilanzen hin. Vor allem muss der Bilanzrahmen das gesamte System und nicht nur einige Ausschnitte umfassen. Die in den jeweiligen Bilanzen getroffenen Annahmen sind kritisch zu prüfen. Nach Aussage des Autors bewerten „die heutigen Ansätze zur Ökobilanzierung [...] alle Arten von Biogasanlagen von den Umweltauswirkungen tendenziell besser als dies im Praxisbetrieb möglich oder realisiert ist“ (Hub, 2007: Seite 37). Hieran wird deutlich, dass insbesondere für die Bewertung der Umweltwirkungen realer Biogasanlagen erheblicher Forschungsbedarf besteht.

3 Zielsetzung

Die Begleitung der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion („Pilotanlagen“) durch die LfL verfolgte im Wesentlichen zwei Ziele: Zum einen sollte der Kenntnisstand über den Betriebserfolg landwirtschaftlicher Biogasanlagen unterschiedlicher Konzeption und an verschiedenen Standorten in Bayern erweitert und vertieft werden. Mit der ausführlichen Dokumentation und Bewertung nach wissenschaftlichen Kriterien sollte eine unabhängige Informationsquelle für potentielle Investoren bzw. Betreiber von Biogasanlagen geschaffen werden. Damit können Defizite bei der Planung von Biogasanlagen vermieden werden und es kann Problemen beim Betrieb vorgebeugt werden.

Zum anderen sollten möglichst vorbildliche Biogasbetriebe dokumentiert werden, wodurch von vorneherein besondere Anforderungen an die Betriebe zu stellen waren. An Biogasanlagen mit Vorbildfunktion wurden dabei folgende Ansprüche formuliert:

- hohe Betriebssicherheit
- hoher erzielter Abbaugrad der organischen Substanz bzw. weitgehende Ausschöpfung des Gasertragspotentials der Einsatzstoffe
- weitgehende Ausschöpfung des Potentials zur Verringerung der Treibhausgasemissionen
- hoher energetischer Nutzungsgrad
- minimierte Emissionsraten
- rentabler und arbeitswirtschaftlich vorbildlicher Betrieb.

Darüber hinaus sollten die Ergebnisse unter Wahrung der Rechte der Betreiber der Biogas-Pilotanlagen grundsätzlich für die Öffentlichkeit bzw. für besonders interessierte Zielgruppen zugänglich gemacht werden.

4 Material und Methoden

Die Arbeiten im Projekt begannen mit der Suche nach geeigneten Biogasanlagen und der Auswahl der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion nach vorgegebenen Kriterien. Daher wird an dieser Stelle zunächst kurz auf das Auswahlverfahren eingegangen, bevor das Vorgehen zur Dokumentation und Bewertung der Pilotbetriebe detailliert beschrieben wird.

4.1 Auswahl der Biogasanlagen für die wissenschaftliche Begleitung

Gemäß der Zielsetzung des Projektes musste die Auswahl der Betriebe unter mehreren Gesichtspunkten erfolgen. Es wurden daher für das Auswahlverfahren bestimmte Rahmenbedingungen gesetzt, um dann auf der Grundlage von Vorbedingungen und Bewertungskriterien geeignete Betriebe auszuwählen.

Die Rahmenbedingungen waren die Folgenden:

- Die zehn Pilotbetriebe sollten geographisch einigermaßen über Bayern verteilt sein.
- Es sollten unterschiedliche Verfahrenskonzepte und Hersteller vertreten sein, wobei ein Hersteller jeweils nur einmal vertreten sein kann.

Die Fachberater für Landtechnik an den Ämtern für Landwirtschaft und Forsten wurden angefragt, unter Verwendung eines standardisierten Steckbriefes (siehe Anhang) aus ihrer Sicht geeignete Biogasbetriebe an das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) zu melden, welches die Anlagenspiegel an die LfL weiterleitete. Vorbedingungen für die Meldung von Anlagen waren:

- die ausschließliche Verwertung von Substraten nach § 8 (2) EEG („NAWARO-Anlagen“),
- die zumindest teilweise Verwertung der Wärmeenergie (§ 8 (3) EEG: „KWK-Bonus“) und
- die persönliche Eignung des Betreibers für die Unterstützung der Arbeiten im Projekt.

Auf Basis dieser Angaben wurden die gemeldeten Betriebe in ihrer Konfiguration einander gegenübergestellt und aufgrund einer qualitativen Bewertung eine erste Vorauswahl getroffen. Die Bewertungskriterien waren:

- messtechnische Ausstattung, im einzelnen: Gasanalysator, Gasmengenmesser, Stromzähler, Wärmemengenzähler, Substratmengenerfassung
- externe Wärmenutzung
- Jahr der Inbetriebnahme
- geschätzte spezifische Stromproduktion bezogen auf das Gärraumvolumen
- innovative technische Lösungen / Besonderheiten.

Die so ausgewählten Biogasanlagen wurden von Vertretern der LfL-Landtechnik besichtigt und fotografisch dokumentiert. Der Anlagenbetreiber wurde hinsichtlich seiner Bereitschaft zur Mitwirkung am Projekt und zur Öffnung seiner Biogasanlage für Informations- und Beratungszwecke befragt.

Für die endgültige Auswahl der Pilot-Biogasanlagen wurde vom BayStMELF ein externer Fachbeirat einberufen, der sich aus Vertretern verschiedener Institutionen und der Biogasbranche zusammensetzt. Der Fachbeirat bestand aus 13 Mitgliedern.

Die Auswahl der zehn Pilot-Biogasanlagen erfolgte in drei Runden. Hierzu fanden Sitzungen des Fachbeirates am 03.08.2005, am 15.11.2005 und am 29.03.2006 statt. Dem Fachbeirat wurde in diesen Sitzungen jeweils die von der LfL-Landtechnik getroffene Vorauswahl an Biogasanlagen zur Diskussion gestellt. Die endgültige Auswahl erfolgte durch Abstimmung.

In der ersten Sitzung des Fachbeirates wurden drei Pilotanlagen ausgewählt. Ein Betreiber sagte jedoch im Spätherbst aus persönlichen Gründen die Teilnahme am Projekt wieder ab. In der zweiten Sitzung stellte sich heraus, dass viele der gemeldeten Anlagen noch nicht fertig gestellt waren bzw. sich noch in der Anfahrphase befanden. Daraufhin wurden lediglich drei weitere Pilotanlagen ausgewählt und die Auswahl der restlichen Anlagen auf eine weitere Sitzung im Frühjahr verschoben. Eine Anlage, die für die Auswahl favorisiert wurde, jedoch zum Zeitpunkt der Sitzung noch nicht angefahren war, wurde für die dritte Auswahlrunde zurückgestellt. Außerdem wurde beschlossen, gezielt weitere Anlagenmeldungen anzufordern.

In der dritten Sitzung des Fachbeirates wurden schließlich weitere fünf Pilot-Biogasanlagen ausgewählt. Aufgrund der gestellten Bedingungen hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Anlagen und der Beschränkung auf maximal eine Anlage je Hersteller, ergab sich mit jeder Auswahl automatisch auch ein Ausschluss bestimmter Meldungen. Neue Anlagenmeldungen wurden noch bis Februar 2006 akzeptiert. Einen Überblick über das gesamte Auswahlverfahren gibt Abb. 5.

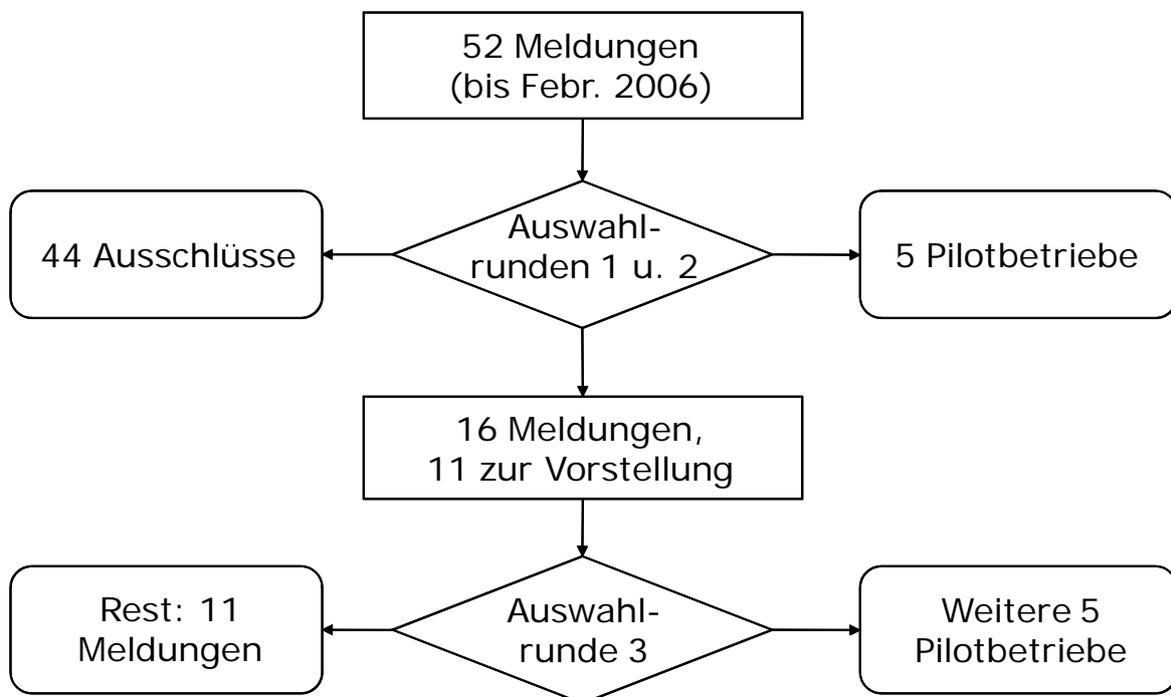


Abb. 5: Ablauf des Auswahlverfahrens für die Bayerischen Biogas-Pilotanlagen

4.2 Zusammenarbeit mit den Anlagenbetreibern

Mit den Betreibern der Biogasanlagen wurde eine schriftliche Vereinbarung zur Zusammenarbeit im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durch die LfL getroffen, die die Leistungen beider Seiten regelt. Ein Muster dieser Vereinbarung ist im Anhang zu diesem Bericht abgedruckt.

Die Betriebe wurden regulär einmal im Monat besucht, um Proben zu nehmen bzw. von den Betreibern entnommene Proben abzuholen, Datenlogger auszulesen und ggf. Tagebuchblätter mitzunehmen. Bei dieser Gelegenheit wurde normalerweise vor Ort der Betriebsverlauf ggf. anhand der vorliegenden Analyseergebnisse besprochen.

Während der Projektlaufzeit wurden die Betreiber der Pilot-Biogasanlagen zu drei Seminaren an die LfL eingeladen. Beim ersten Termin Anfang 2007 wurde den Betreibern die Gelegenheit gegeben, ihre Biogasanlage und die persönlichen Beweggründe für den Einstieg in die Biogasproduktion selbst vorzustellen. Bei den weiteren Terminen stand die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse aus der Datenerhebung der LfL und der Erfahrungsaustausch zwischen den Landwirten im Vordergrund.

4.3 Modellierung der Prozesskette Biogas und Erfassung von Betriebsdaten

Biogasanlagen lassen sich ökonomisch, ökologisch oder verfahrenstechnisch nur dann vergleichen, wenn die Bilanzierung und Analyse der Einzelanlagen nach einheitlichen Kriterien erfolgt. Die vergleichende Bewertung der Pilot-Biogasanlagen erfolgt auf der Basis von Kennzahlen, die zu Beginn des Projektes mit LfL-Agrarökonomie abgestimmt wurden. Grundlage der Kennzahlendefinition ist ein Modell, das die betrachtete Verfahrenskette der Biogasproduktion in die vier Bilanzräume Substratbereitstellung, Biogasproduktion, Biogasverwertung und Gärrestverwertung gliedert (Abb. 6). Hierbei waren von Seiten der LfL-Tier und Technik insbesondere die Bilanzgruppen Biogasproduktion und –verwertung im Fokus. Zwischen den Bilanzräumen wurden eindeutige Stoffströme festgelegt. Diese Stoffströme wurden durch die direkt auf den Anlagen erfassten Kenngrößen (=absolute Kenngrößen) charakterisiert. Aus diesen absoluten Kenngrößen konnten beliebige abgeleitete Kenngrößen errechnet werden.

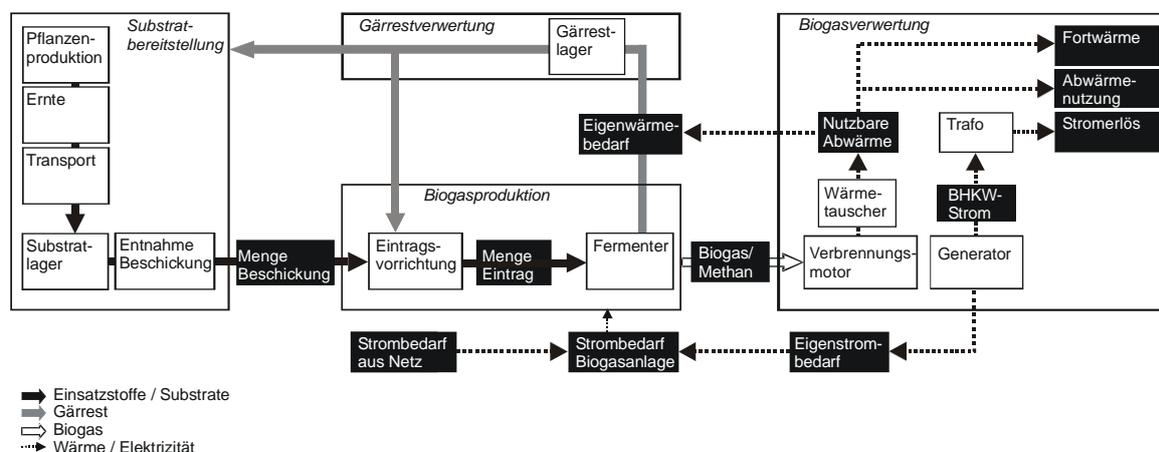


Abb. 6: Modell der Prozesskette der Energiegestehung aus Biogas (verändert nach Strobl & Keymer, 2006)

Die Bilanzierung der Pilot-Biogasanlagen stützte sich auf die fortlaufende Erfassung der Bewegungs- oder Betriebsdaten während des Beobachtungszeitraums. Die relevanten Bewegungsdaten wurden in unterschiedlicher Häufigkeit und mit verschiedenen Methoden erfasst. Kernstück der fortlaufenden Datenerfassung auf den Pilot-Biogasanlagen war dabei das Betriebstagebuch.

4.3.1 Betriebstagebuch

Die Betriebstagebücher wurden von den Betreibern der Pilotanlagen nach den Vorgaben der LfL-Landtechnik geführt. Die Aufzeichnungen wurden auf allen Betrieben zunächst handschriftlich vorgenommen (jeweils Wochenblätter). Die Übermittlung der Tagebücher erfolgte entweder per Fax oder - nach Eingabe vor Ort - in elektronischer Form (MS-Excel-Datei). Die im Betriebstagebuch erfassten Bewegungsdaten können der Übersicht in Tab. 1 entnommen werden.

4.3.2 Automatisierte Messwerterfassung und -aufzeichnung

Für Zwecke der kontinuierlichen Messwerterfassung wurden auf den Pilot-Biogasanlagen Datenlogger (Theodor Friedrichs & Co., Schenefeld) installiert. Die Datenlogger stammen aus der meteorologischen Messtechnik und verfügen über vielfache Eingänge für Digital- und Analogsignale. Je nach Kanalbelegung und Aufzeichnungsintervall beträgt die interne Speicherkapazität bis zu mehrere hundert Tage. Die Auslesung der Daten erfolgte anlässlich der monatlichen Besuche auf den Anlagen über eine RS232-Schnittstelle. Die Daten wurden als csv-Dateien der weiteren Verarbeitung zugeführt.

Die installierten Messgeräte verfügten teilweise auch über eigene Messwertspeicher. Hier sind insbesondere die Gasanalyse-Geräte zu nennen, die meist mit einem zweistündigen Messintervall betrieben wurden. Auch die Auslesung dieser Daten erfolgte anlässlich der regelmäßigen Ortsbesuche. Die automatisch erfassten Messwerte können der Übersicht in Tab. 1 entnommen werden. Aufgrund der baulichen Situation, der nicht immer gegebenen Notwendigkeit und beschränkter Mittel für die messtechnische Ausrüstung wurden nicht auf allen Pilot-Biogasanlagen alle aufgeführten Daten erfasst.

Über ein zentrales Prozessleitsystem, in dem alle Komponenten zusammengefasst waren, verfügten lediglich die Anlagen E, I und J. In den meisten Anlagen waren mehrere, nicht miteinander vernetzte Steuer- und Regelsysteme vorhanden, beispielsweise für das BHKW, die Eintragstechnik und die Rührwerke. Ein direkter Abruf von Betriebsdaten aus dem Prozessleitsystem der BGA per DFÜ wurde nur im Falle des Betriebes J erprobt.

Tab. 1: Übersicht über die auf den Pilot-Biogasanlagen erfassten Betriebsdaten (Kenngrößen) in den Bereichen Biogasproduktion und -verwertung

Objekt /Stoffstrom Eigenschaft	Betriebstagebuch	Datenlogger	Sonstiges
Häufigkeit der Erfassung	täglich	je nach Messintervall	
Zeitstempel der Erfassung	x	x	
Eintragsvorrichtung			
Betriebsstunden	x		
Strombedarf (kWh)	(x)	(x)	Einzelmessungen
Intervall und Laufzeit	x		
Menge Eintrag (kg)	x	(x)	
Gärbehälter			
Wärmebedarf (kWh)	(x)		
Gärbehälter /Gärgemisch			
Gärtemperatur (°C)	x		
Füllstand	(x)		
Entnahme Rückführung	(x)		
Gärbehälter /Biogas			
Methangehalt (Vol.-%)	(x)	(x)	
CO ₂ -Gehalt (Vol.-%)	(x)	(x)	
O ₂ -Gehalt (Vol.-%)	(x)	(x)	
H ₂ S-Gehalt (ppm)	(x)	(x)	
H ₂ -Gehalt (ppm)	(x)	(x)	
Gasmenge (m ³ oder kg)	(x)	(x)*	
Gärbehälter /Rührwerke			
Betriebsstunden	x		
Strombedarf	(x)	(x)	Einzelmessungen
Intervall und Laufzeit	x	(x)	
Gassack /Füllstand			
	(x)		
BHKW			
Betriebsstunden	x		
Zündölverbrauch (l)	(x)		aus Lieferscheinen
BHKW-Wärme (kWh)	(x)		
BHKW-Strom (kWh)	x	(x)	
Stromeinspeisung (kWh)	x	(x)	aus Jahresabrechng.
BHKW /Biogas			
Gasmenge (m ³ oder kg)	x	(x)*	
Methangehalt (Vol.-%)	x	x	
CO ₂ -Gehalt (Vol.-%)	(x)	(x)	
O ₂ -Gehalt (Vol.-%)	x	x	
H ₂ S-Gehalt (ppm)	x	x	
H ₂ -Gehalt (ppm)	(x)	(x)	
Gastemperatur (°C)	(x)	(x)*	
Gasüberdruck (hPa)	(x)	(x)*	
Gasfackel			
Gasmenge (m ³)	(x)		
Betriebsstunden	(x)		
Gärrestlager			
Entnahme flüssig (m ³)	x		
Entnahme fest (t)	(x)		
Entnahme Rückführung (m ³)	(x)		
Gärrestseparator			
Betriebsstunden	(x)		
Strombedarf (kWh)	(x)		
Pumpen			
Betriebsstunden	(x)		
Strombedarf (kWh)	(x)		
Weitere Aggregate			
Betriebsstunden	(x)		
Strombedarf (kWh)	(x)		

*) Stundenmittel- bzw. summe auf Basis kontinuierlicher Messwerte; x = auf allen Anlagen; (x) = soweit vorhanden

4.4 Probenahme und chemische Analytik

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Stabilität des Gärprozesses sowie für die energetische Bilanzierung war die Entnahme und chemische Analyse von Proben der Substrate, der Gärgemische in den einzelnen Prozessstufen und der Gärreste erforderlich. Die Probenahme erfolgte im Falle der Substrate und der Gärgemische normalerweise monatlich. Proben der Gärreste wurden nach Möglichkeit anlässlich der Entnahme aus dem Gärrestlager vor der landwirtschaftlichen Ausbringung genommen. Eine Übersicht zu den an den einzelnen Proben untersuchten Parametern zeigt Tab. 2.

Tab. 2: Übersicht über Analysenparameter für Proben der Substrate, der Gärgemische und der Gärrückstände

Probenart	Feste Biomasse	Gülle	Gärgemisch	Gärrückstand
TM (Massen-%)	x	x	x	x
oTM (% TM)	x	x	x	x
CSB (g/kg)	x		x	(x)
K _{S4,3} (mmol/l)			x	
FFS gesamt (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
pH (-)	(x)	x	x	x
Essigsäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
Propionsäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
iso-Buttersäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
Buttersäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
iso-Valeriansäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
Valeriansäure (mg/l)	(x)	(x)	x	(x)
NH ₄ -N (mg/l)	(x)	(x)	x	x
Rohprotein (% TM)	(x)	(x)	(x)	(x)
Rohfaser (% TM)	(x)	(x)	(x)	(x)
Rohfett (% TM)	(x)	(x)	(x)	(x)
NDF	(x)	(x)	(x)	(x)
ADF	(x)	(x)	(x)	(x)
ADL	(x)	(x)	(x)	(x)
Gesamt-C (% TM)	x	(x)		(x)
N _{org.} (% TM)	(x)	(x)		x
P (% TM)				x
K (% TM)				x
Ca (% TM)				x
S (% TM)				x
FOS/TAC (-)			x	
Spezif. Volumen (kg*m ⁻³)	(x)			

x = Bestimmung in allen Proben; (x) = Bestimmung in einem Teil der Proben

Die chemische Analyse der Proben erfolgte teilweise im Labor der LfL-Tier und Technik, teilweise im Zentrallabor der Abteilung für Qualitäts- und Untersuchungswesen (LfL-AQU) nach einschlägigen Vorschriften (VDLUFA, 1997). Aufgrund eingeschränkter Kapazitäten war eine zeitnahe Analyse der Proben (innerhalb von 1-2 Tagen) und damit eine direkte prozessanalytische Betreuung der Pilot-Biogasanlagen in der Regel nicht möglich. Die Betreiber wurden zu diesem Zweck gegebenenfalls an kommerzielle Auftragslabors verwiesen.

Die repräsentative Probenahme war insbesondere im Falle der Fahrtilos äußerst schwierig und stellte eine bedeutende Fehlerquelle dar. Da die Probenahme oft durch die Betreiber selbst erfolgte, wurden diese entsprechend instruiert. Um den Einfluss des Vorgehens zur Probenahme von fester Biomasse abzuschätzen, wurde auf einem der Pilotbetriebe ein Test zur Beprobung von Maissilage in zwei Varianten durchgeführt. Zunächst erfolgte eine direkte zehnfache Beprobung des Silostocks an der Anschnittfläche mit einem Bohrer

(Variante „Bohrer“, Abb. 7). Anschließend wurde der Bereich um die Bohrung mit einem Bagger vorsichtig in die Schaufel eines Radladers abgegraben. Aus der Radladerschaufel wurden nun ca. 15 Teilproben an verschiedenen Stellen entnommen und zu einer Probe vereint (Variante „Hand“). Die so gewonnenen 2 x 10 Proben wurden im Labor auf ihren Gehalt an TM und oTM untersucht (jeweils zwei Parallelbestimmungen).



Abb. 7: Probebohrungen an der Anschnittfläche eines Silostocks (Maissilage)

Die Analyseergebnisse wurden zunächst auf Normalverteilung getestet (Testverfahren nach Shapiro-Wilk). Sowohl für die Daten des TM- als auch des oTM-Gehalts konnte keine Normalverteilung nachgewiesen werden, gleichgültig welche Methode der Entnahme gewählt wurde. Auch nach Bereinigung der Daten um Ausreißer blieb es bei diesem Ergebnis. Da keine Normalverteilung vorlag, war eine anschließende varianzanalytische Auswertung nicht zulässig.

Stattdessen wurde ein Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt und anhand dieses Testverfahrens überprüft, ob die Variante der Probenahme einen Einfluss auf die beiden Merkmale TM- und oTM-Gehalt hatte. Dies konnte bei beiden Varianten weder für das Prüfmerkmal TM noch für oTM nachgewiesen werden. Vielmehr unterschieden sich die Verteilungen der Prüfmerkmale TM bzw. oTM in beiden Fällen nicht signifikant voneinander. Auch die Bereinigung der Daten um Ausreißer beeinflusste dieses Ergebnis nicht. Die Streuung der Ergebnisse aus der Variante „Bohrer“ war jedoch größer als für die Variante „Hand“ (Abb. 8).

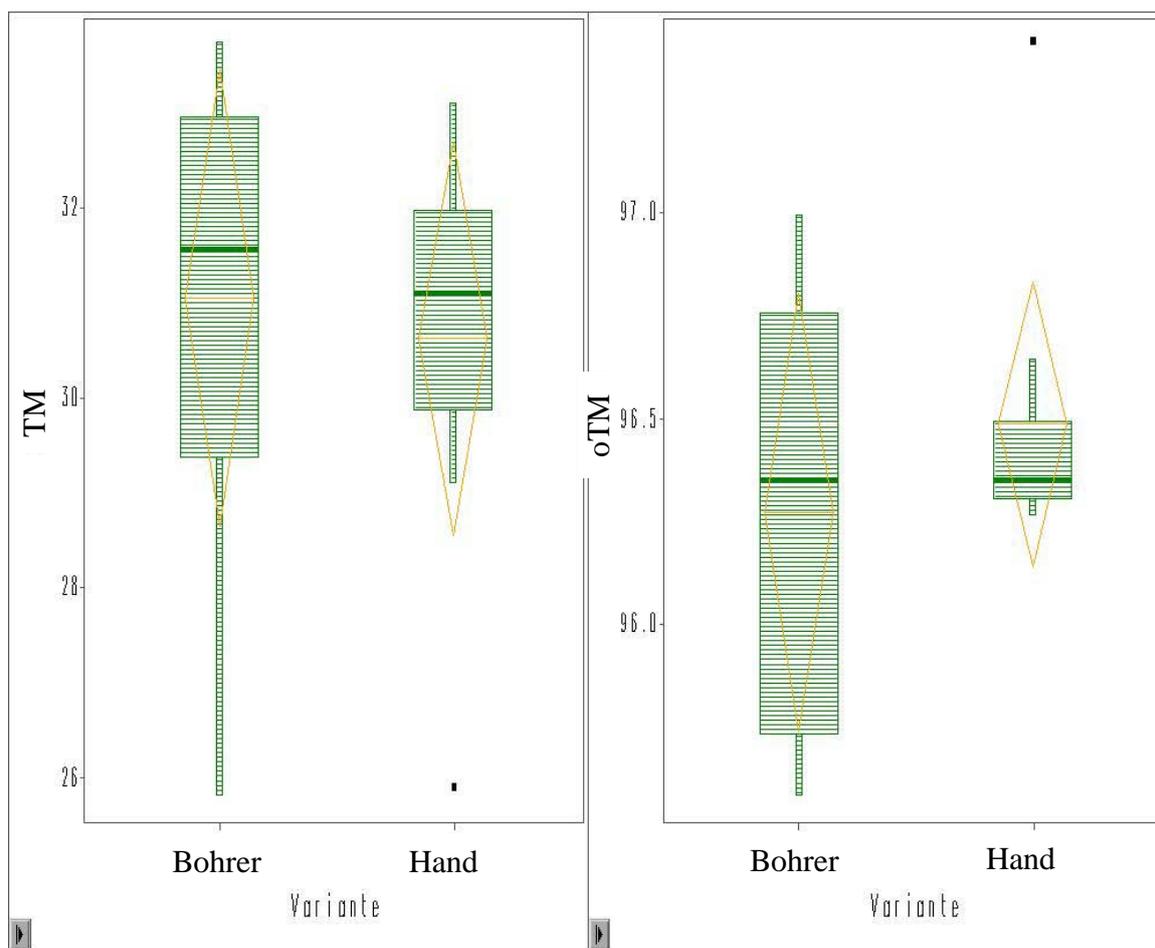


Abb. 8: Boxplots der Verteilung der Analyseergebnisse für TM- und oTM-Gehalt in jeweils zehn Proben von Maissilage für zwei Probenahmevarianten

Auf Grund dieses Ergebnisses wurde von den festen Einsatzstoffen vorzugsweise eine Mischprobe aus der Schaufel des für die Beschickung verwendeten Laders oder dem Vorratsbehälter des Feststoffeintrags entnommen. Proben von Gärgemischen wurden vorzugsweise aus den Überläufen oder Pumpleitungen zwischen den einzelnen Stufen oder, falls dies nicht möglich war, aus Hähnen in der Behälterwand gezogen. Gärrestproben wurden vorzugsweise während der Abfüllung des Gärrestes in das Ausbringfahrzeug gewonnen. Hierbei wurden drei bis fünf Proben zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen.

4.5 Stammdaten und Konfiguration der Pilot-Biogasanlagen

Abb. 9 gibt eine Übersicht der Behälterausstattung der Pilotanlagen in der jeweils letzten erfassten Ausbaustufe. Als „Stufen“ werden hierbei nur diejenigen Behälter bezeichnet, die ausdrücklich der Biogasproduktion dienen und zu diesem Zweck aktiv beheizt und/oder durchmischt werden.

Anlage	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Gärrestlager
A				
B				
C				
C*				
D				
E				
F				
G				
H				
H*				
I				
J				

Legende: Behälter mit Gaserfassung; Behälter ohne Gaserfassung; Hydrolysestufe

Abb. 9: Übersicht über die Behälterkonfiguration der Pilotanlagen

Die Übersicht zeigt, dass die Auswahl der Bayerischen Pilot-Biogasanlagen einen guten Querschnitt über verschiedene, auf dem Markt befindliche Anlagenkonzepte bietet. Anlage I arbeitet als einzige nach dem zweiphasigen Verfahren, d. h. die Hydrolyse und Versäuerung finden hier in einer separaten, nicht luftdicht abgeschlossenen Stufe statt. Sechs der zehn Anlagen verfügen über ein offenes Gärrestlager, aus dem Methanemissionen in unbekannter Höhe auftreten.

Eine tabellarische Übersicht grundlegender verfahrenstechnischer Daten der Bayerischen Pilot-Biogasanlagen zeigt Tab. 3 auf der folgenden Seite. In diese Tabelle wurde auch das gesamte Spektrum der Substrate aufgenommen, die während der wissenschaftlichen Begleitung der Betriebe zum Einsatz kamen. In zwei der zehn Anlagen wurden in diesem Zeitraum regulär überhaupt keine tierischen Exkrememente eingesetzt (D und H), in weiteren zwei Anlagen nur geringe Mengen an Gülle oder Mist (B und C). In vier Anlagen wurden tierische Exkrememente aus dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb verwertet (B, E, G und J).

Lediglich zwei der zehn Anlagen wurden durchgängig auf thermophilem Temperaturniveau (hier: $> 50^{\circ}\text{C}$) betrieben (D und H). Bei den BHKW überwiegen die Gas-Otto-Motoren gegenüber den Zündstrahl-Motoren klar mit zwölf von 15 Aggregaten (Tab. 3).

Tab. 3: Grundlegende verfahrenstechnische Daten der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen

ID Anlage	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Jahr der Inbetriebnahme	2005	2005	2004		2004	2005	2002	2005	2004		2005	2001
Einsatzstoffe:	RG, RM, HTK	RM	RG	-	-	HTK	HTK	SG, RG, RM	-		RG, RM	RG, RM
Tierische Exkremente ¹												
Einsatzstoffe: Nachwachsende Rohstoffe ²	SM, GS, GR, GPS	KGS, SM, MSO, CCM, ReGe, GPS	SM, GS, GPS, CCM, GK		SM, WW, GS, WG, GR, SG, CCM	SM	SM, MK, GPS, GS, GK	SM, MK, GPS, GS, GK, GR, TC, SG	SM, GR, SG, RS		GK, MK, SM, ZR	SM, GS, GPS, GK
Anzahl Prozessstufen	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3
Prozesstemperaturniveau	mes	mes	mes		therm	mes	mes	mes	therm		mes	mes
Nutzvolumen Hauptgärbehälter	2.010	1.357	1.608		1.145	396	1.650	770	276		995 ³	2.751
Nutzvolumen Nachgärbehälter	1.005	1.428	1.134	2.268	1.145	2.091	2.090	770	396	1.502	-	662
Gesamt-Nutzvolumen Gärraum ¹	3.015	2.605	2.542	3.676	2.290	2.487	3.740	1.540	672	1.778	1.095	3.413
Gärrestlager: Abdeckung	Gaserf.	offen	Gaserf.		offen	Gaserf.	offen	Gaserf.	offen		offen	Gaserf.
Gärrestlager: Gesamt-Nutzvolumen	1.146	1.294	1.134	4.029	800	2.300	4.988	3.289	739		1.791	2.688
BHKW: Motortyp	G-O ²	G-O	G-O		G-O	G-O	G-O	ZS ³	ZS		G-O	G-O
BHKW: Anzahl Motoren	1	1	2	3	2	1	1	2	1		1	2
BHKW: Elektrische Nennleistung	329	333	380	630	420	347	526	280	250		324	380
BHKW: Thermische Nennleistung	447	232	486	757	472	432	566	300	262		250	486
BHKW: Feuerungswärmeleistung	776	565	866	1387	892	779	1092	580	512		574	866

*) Bauliche Änderung während der Projektlaufzeit, eingetragen sind nur die geänderten Kennwerte; ¹) in der Reihenfolge abnehmender Masseanteile ; ²) zuzüglich Nutzvolumen Vorgärbehälter (Hydrolysegrube); 100 m³; ³) Summe der Nutzvolumina aller Prozessstufen (ohne Gärrestlager); ⁴) Gas-Otto-Motor; ⁵) Zündstrahlmotor; mes: mesophil (25-45°C); therm: thermophil (>50°C); Gaserf.: Gaserfassung;
n.v.: nicht verfügbar; RG: Rindergülle; SG: Schweinegülle; RM: Rindermist; HTK: Hähnchentrockenkot; SM: Silomais; CCM: Corn-Cob-Mix; MK: Maiskörner; GK: Getreidekörner; WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; GR: Grünroggen; SG: Sudangras; TC: Triticale; MSO: Mais-Sonnenblumen-Gemenge; ReGe: Resele-Gemenge; GS: Grassilage; KGS: Kleegrassilage; GPS: Getreide-Ganzpflanzensilage; WGS: Weidelgras; RS: Rasenschnitt; ZR: Zuckerrüben

4.6 Messtechnische Ausstattung der Pilot-Biogasanlagen

Auf den Biogasanlagen waren zum Zeitpunkt der Auswahl zum Teil deutliche Unterschiede in der Ausstattung mit Messtechnik zu verzeichnen. Die messtechnische Ausstattung der Pilotanlagen wurde daher im Laufe des ersten Projektjahres auf einen einheitlichen Standard gebracht. Einheitslösungen gab es hierbei jedoch nicht, da jeweils auf die baulichen und technischen Gegebenheiten Rücksicht genommen werden musste. Im Durchschnitt wurden je Anlage 12.800,- EUR an Sachmitteln für die Ausstattung mit Messtechnik und Datenloggern einschließlich Installationsmaterial aufgewandt.

Tab. 4 auf der folgenden Seite fasst die messtechnischen Einrichtungen auf den Pilot-Biogasanlagen zusammen. Eine Übersicht über die zum Einsatz kommenden Messverfahren gibt Tab. 5. Für die Temperaturmessungen im Gärgemisch und im Biogas kamen PT 100-Fühler zum Einsatz. Für die Messung von Differenz- und Absolutdruck wurden piezoresistive Druckmessumformer eingesetzt.

Stromverbräuche wurden teils mit herkömmlichen elektromagnetischen Stromzählern, teils mit elektronischen Zählern und teils mit Wandlerzählern gemessen. An einzelnen Aggregaten konnte aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen der Stromverbrauch nicht kontinuierlich gemessen werden. Dort wurde ein Messkoffer mit integriertem Datenlogger verwendet. Einzelne Aggregate wurden hiermit jeweils über einen Zeitraum von etwa einem Monat gemessen, ehe das Messgerät umgeklemmt oder auf eine andere Anlage umgesetzt wurde.

Die Biogasanalysatoren wurden vor Ort halbjährlich überprüft und kalibriert. Ausgenommen waren die Messgeräte auf den Anlagen H und I, die nur vom Hersteller kalibriert werden können und daher lediglich überprüft wurden.

Tab. 4: Messtechnische Ausstattung der Pilotanlagen und Messorte

ID Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Biogasanamennestzug	BHKW	BHKW	Stufe 1 BHKW	BHKW	Stufe 1 BHKW	Stufe 1a/b Stufe 2 BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	Stufe 1a/b BHKW
Biogasertrag	BHKW	BHKW	BHKW 1+2/3	BHKW	BHKW	Nachgärer BHKW	BHKW 1/2	BHKW	BHKW	BHKW 1/2
Biogasberdruck	BHKW	BHKW	-	BHKW	Fermenter 1 BHKW	-	BHKW 1/2	BHKW	-	Stufe 1 BHKW 1/2
Umgebungsdruck	BHKW	BHKW	-	BHKW	BHKW	-	BHKW	BHKW	-	BHKW
Biogastemperatur	BHKW	BHKW	-	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW 1/2	BHKW	-	BHKW 1/2
Menge Eintrag	Eintrags- vorrichtung	Eintrags- vorrichtung	Eintrags- vorrichtung	Eintrags- vorrichtung	Radlader	Beschicker	Radlader	Eintrags- vorrichtung	Eintrags- vorrichtung	2x Eintrags- vorrichtung
Wärmemenge	Stufe 1a/b Stufe 2 Notkühler Fernwärme	Primärkreislauf auf Gärbehälter Notkühler	2x Fernwärme	Stufe 1 Stufe 2 2x Notkühler 2x Fernwärme	Stufe 1 Stufe 2 Notkühler Fernwärme	Stufe 1a/b Notkühler Entschwefler Fernwärme	Stufe 1 Stufe 2 Notkühler Fernwärme	Stufe 1 Stufe 2 Notkühler Fernwärme	Stufe 1 Stufe 2 Notkühler Fernwärme	2x Primärkreislauf auf 2x Sekundärkreislauf Fernwärme

Tab. 5: Übersicht über Messverfahren

ID Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Gasanalyse: CH ₄ , CO ₂	IR	IR	IR	IR	IR	IR	IR	WL	WL	IR
Gasanalyse: H ₂ S, O ₂ , H ₂	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC
Biogasvolumen	V: Drall	Drehkolben			Drehkolben					
Biogasdurchfluss	V: Drall		m: thermisch	V: Drall		m: thermisch	V: Wirbelstrom	V: Wirbelstrom	m: thermisch	V: Drall
Menge Eintrag fest	m: Wägezellen	m: Wägezellen	m: Wägezellen	m: Wägezellen	m: dynamisches Wägesystem	m: Wägezellen	m: dynamisches Wägesystem	m: Wägezellen	V: Füllstand (Druckdose) MW	m: Wägezellen
Menge Eintrag flüssig	V: Pumpenlaufzeit	-	V: Pumpenlaufzeit	-	V: MID	-	V: Pumpenlaufzeit	-	-	V: Pumpenlaufzeit
Wärmemengen	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100	PT 100
	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad	V: Flügelrad
				Ultraschall					Ultraschall	

EC: elektrochemisch, IR: Infrarot, m: Masse, MID: Magnetisch-induktive Durchflussmessung, MW: Mikrowellen, V: Volumen, WL: Wärmeleitfähigkeit

4.7 Fließbilder der Pilot-Biogasanlagen

Die Anlagenschemata, auch Fließbilder genannt, dienen in erster Linie der Darstellung der funktionalen Zusammenhänge der Pilot-Biogasanlagen, enthalten jedoch nicht alle Schnittstellen im Sinne eines verfahrenstechnischen Fließbildes. Dargestellt sind auch alle relevanten messtechnischen Einrichtungen (Abb. 10).

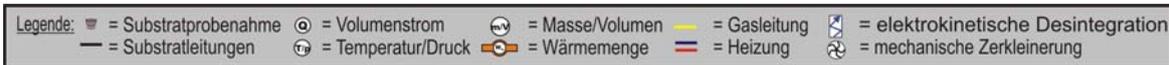


Abb. 10: Legende der nachfolgenden Fließbilder der Pilotanlagen

4.7.1 Pilot-Biogasanlage A

Die Pilot-Biogasanlage A wurde von einem kommerziellen Planungsbüro geplant und weitgehend in Eigenleistung errichtet. Die Anlage verfügt über zwei parallel geschaltete baugleiche Fermenter (Stufe 1a/b) mit Feststoffeintrag aus einem Vertikalmischer, einen Nachgärer (Stufe 2) sowie ein Gärrestlager mit Gaserfassung. Eine Vorgrube dient der Annahme von Gülle (Abb. 11).

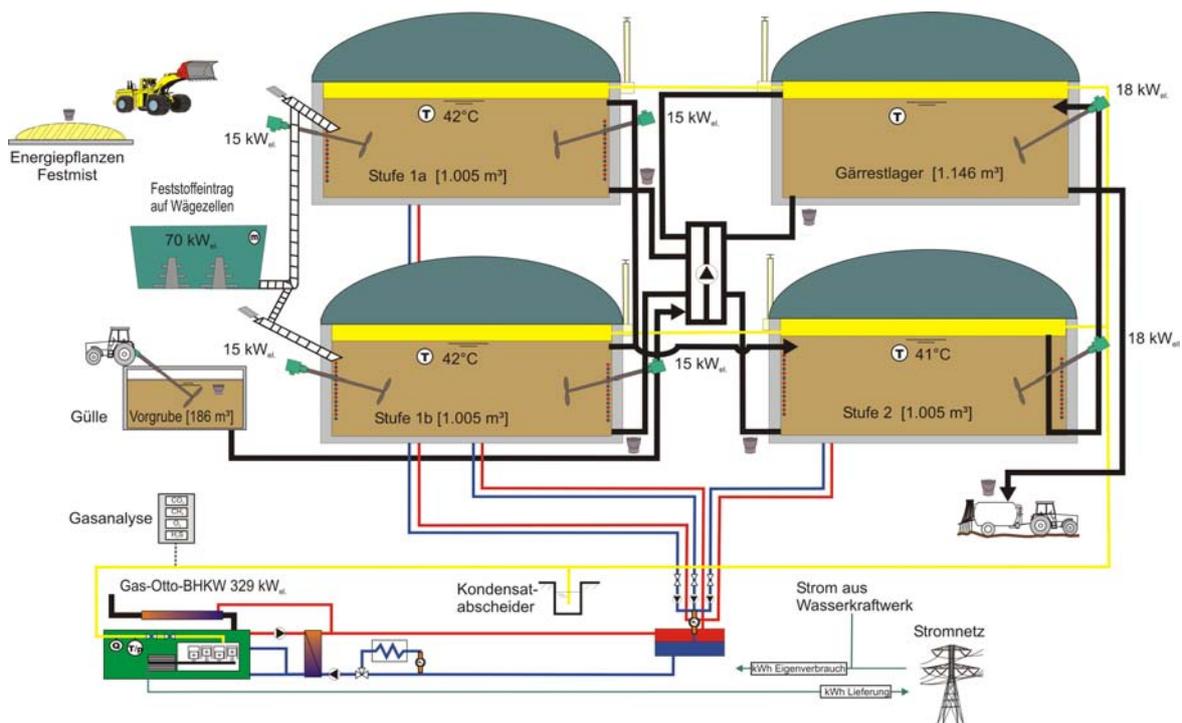


Abb. 11: Fließbild der Pilotanlage A

Die Behälter sind als stehende Zylinder in Stahlbeton ausgeführt und im Grundriss in Kleeblattform angeordnet. Die beiden Hauptgärbehälter und der Nachgärer verfügen über Foliendächer mit „Lunge“, das Gärrestlager über ein Foliendach. Die Gasverwertung erfolgt in einem Gas-Otto-Motor mit 329 kW_{el} Nennleistung. Die anfallende Überschusswärme wird derzeit nur zur Beheizung des Wohnhauses des Betriebsleiters genutzt. Zukünftig soll das Biogas an einen etwa 2 km entfernt gelegenen Industriebetrieb abgegeben werden, der dieses zur Bereitstellung von Prozesswärme verwerten will. Der erzeugte

elektrische Strom wird vollständig in das Elektrizitätsnetz eingespeist. Der Strombedarf der BGA wird durch ein Kleinwasserkraftwerk und aus dem Elektrizitätsnetz gedeckt.

4.7.2 Pilot-Biogasanlage B

Die Pilot-Biogasanlage B wurde von einem kommerziellen Planungsbüro geplant. Als einzige der Pilot-Biogasanlagen wird sie überwiegend mit Substraten aus ökologischer Landwirtschaft betrieben. In Abweichung von der klassischen Bauweise landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Deutschland verfügt die Anlage über einen teilweise in den Boden eingesenkten Hochfermenter (Stufe 1) mit einem Durchmesser-Höhe-Verhältnis von 1:1, der mit einem Zentralrührwerk kontinuierlich durchmischt wird. Die Biomasse wird aus einem Schubbodencontainer eingetragen. Die Anlage besteht weiterhin aus einem Nachgärer (Stufe 2) und einem offenen Gärrestlager (Abb. 12).

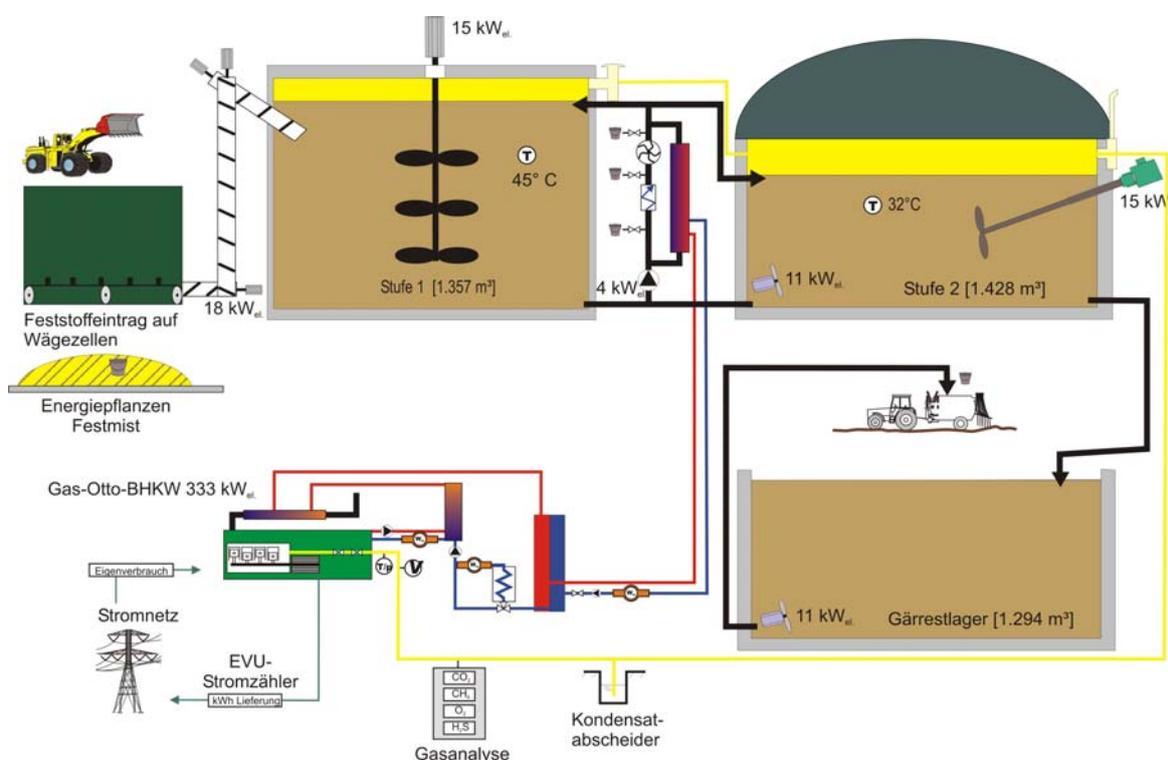


Abb. 12: Fließbild der Pilotanlage B

Alle Behälter sind als stehende Zylinder in Stahlbeton ausgeführt. Als Besonderheit werden beide Gärbehälter durch Umpumpen über einen Röhrenwärmetauscher beheizt. Die Zwischenspeicherung des produzierten Biogases erfolgt unter einer Folienhaube auf dem Nachgärer. Das Biogas wird in einem Gas-Otto-Motor mit 333 kW_{el} Nennleistung verwertet. Eine Nutzung der Abwärme außerhalb der Biogasanlage findet derzeit nicht statt. Der erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.7.3 Pilot-Biogasanlage C

Die Pilot-Biogasanlage C wurde von den Inhabern und Betreibern größtenteils in Eigenleistung geplant und gebaut. Die Anlage verfügte in der ersten Ausbaustufe über zwei parallel geschaltete baugleiche Hauptgärbehälter (Stufe 1 a/b) mit Feststoffeintrag aus einem Vertikalmischer, einen Nachgärer (Stufe 2) sowie ein Gärrestlager mit Gaserfassung (jet-

zige Stufe 3). Eine Vorgrube dient der Annahme von Gülle sowie der Entnahme von Gärrest aus den Stufen 1 bis 3. In 2007 wurde die Anlage um ein Gärrestlager mit Gaserfassung mit einem Volumen von 4.200 m³ erweitert. Der Gärrest wird in diesen Behälter gepumpt, der über eine eigene Entnahmestation verfügt. Das bestehende Gärrestlager wird jetzt als 3. Stufe betrieben (unbeheizter Nachgärer). Außerdem wurde in der Stufe 1a zusätzlich ein Stabmixer installiert (Abb. 13).

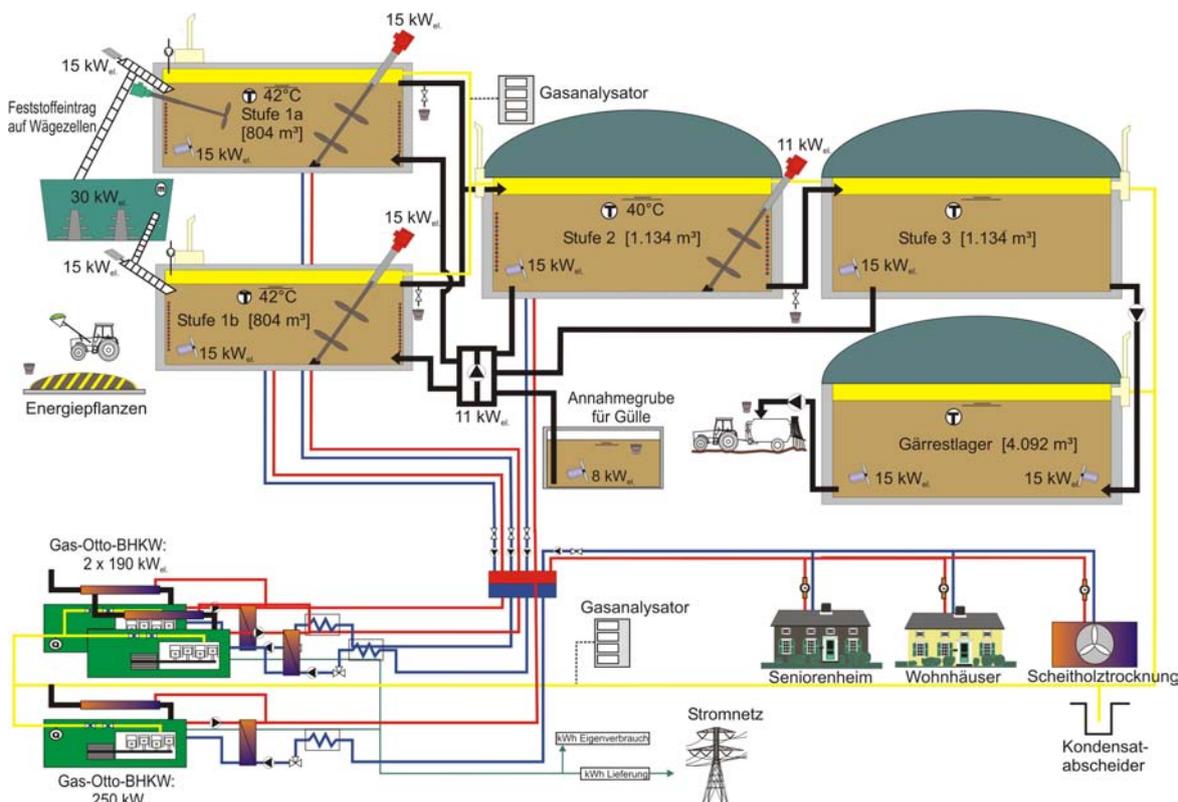


Abb. 13: Fließbild der Pilotanlage C

Alle Behälter sind als stehende Zylinder in Stahlbeton ausgeführt. Die beiden Fermenter der Stufe 1 verfügen über Massivdecken, Stufe 2 verfügt über einen Doppelmembran-Foliengasspeicher, Stufe 3 über eine Einfachfolienhaube, das Gärrestlager über ein Foliendach. Die Gasverwertung erfolgte in der ersten Ausbaustufe in zwei baugleichen Gas-Otto-Motoren mit jeweils 190 kW_{el}, in 2007 wurde ein dritter Motor mit 250 kW_{el} Nennleistung nachgerüstet. Die anfallende Wärme wird zu einem großen Teil an ein nahe gelegenes Seniorenheim abgegeben. Zur weiteren Nutzung der BHKW-Wärme wurde eine Fernwärmeleitung zu nahe gelegenen Wohnhäusern verlegt und eine Vorrichtung zur Trocknung von Scheitholz installiert. Der erzeugte elektrische Strom abzüglich des Eigenbedarfs der Biogasanlage wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist (sogenannte Überschusseinspeisung).

4.7.4 Pilot-Biogasanlage D

Die Pilot-Biogasanlage D wurde von einem Ingenieurbüro geplant und mit einem hohen Anteil an Eigenleistung errichtet. Es handelt sich um eine zweistufige Anlage mit zwei stehenden, zylindrischen Gärbehältern gleicher Baugröße. Stufe 1 wird aus einem Abschiebewagen mit Biomasse beschickt. Die Gärbehälter können über einen Schacht befüllt

bzw. entleert werden. Drei bestehende Güllegruben werden als Gärrestlager genutzt (Abb. 14).

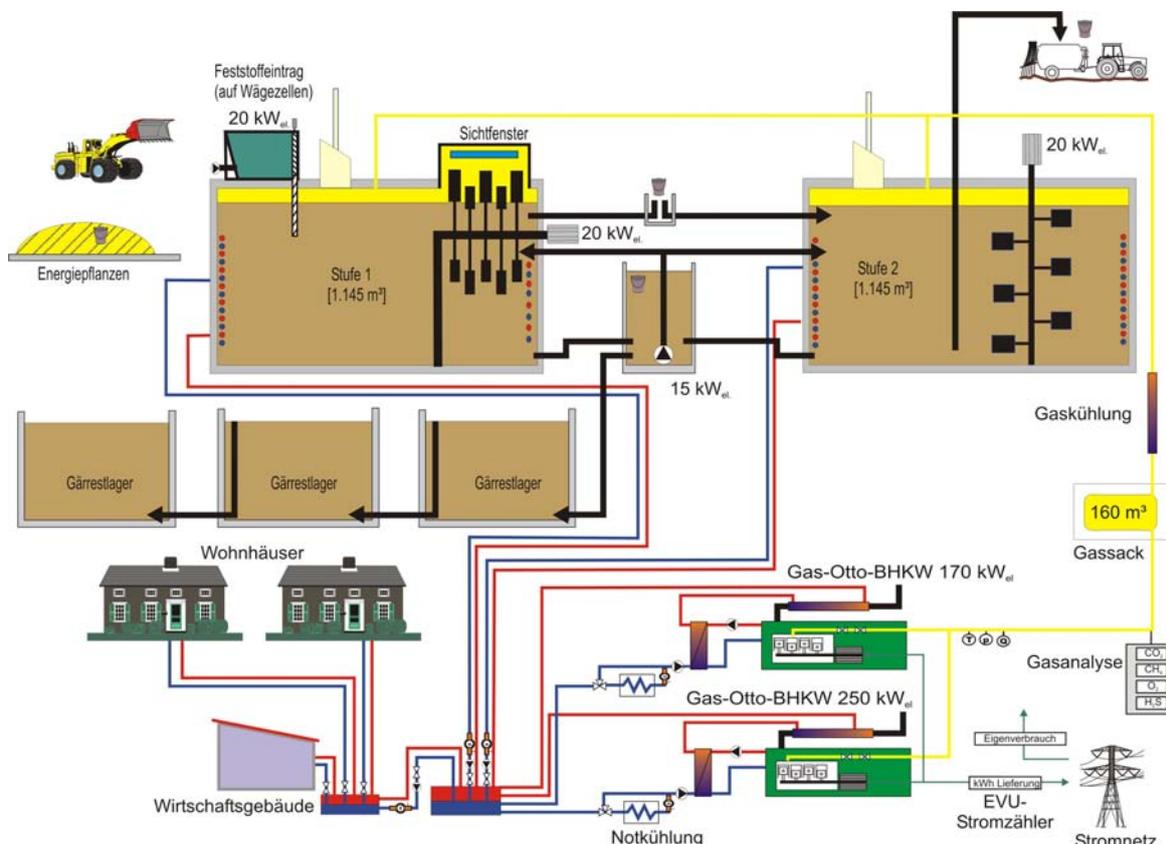


Abb. 14: Fließbild der Pilotanlage D

Zur Zwischenspeicherung des produzierten Biogases verfügt die Anlage über einen kleinen Gassack über dem BHKW-Raum. Die Gasverwertung erfolgt in zwei Gas-Otto-Motoren mit 170 bzw. 250 kW_{el} Nennleistung. Die anfallende Wärme wird für die Beheizung der Hofgebäude und eines Austragshauses genutzt. Der gesamte erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.7.5 Pilot-Biogasanlage E

Die Pilot-Biogasanlage E wurde schlüsselfertig von einem kommerziellen Anbieter errichtet. Die erste Stufe ist als liegender Quader ausgeführt, die zweite Stufe und das Gärrestlager mit Gaserfassung als stehende Zylinder. Die Biomasse wird in die Stufe 1 aus einem Vertikalmischer eingetragen. Eine Vorgrube dient gegebenenfalls der Annahme von flüssigen Substraten und der Einbringung von Wasser (Abb. 15).

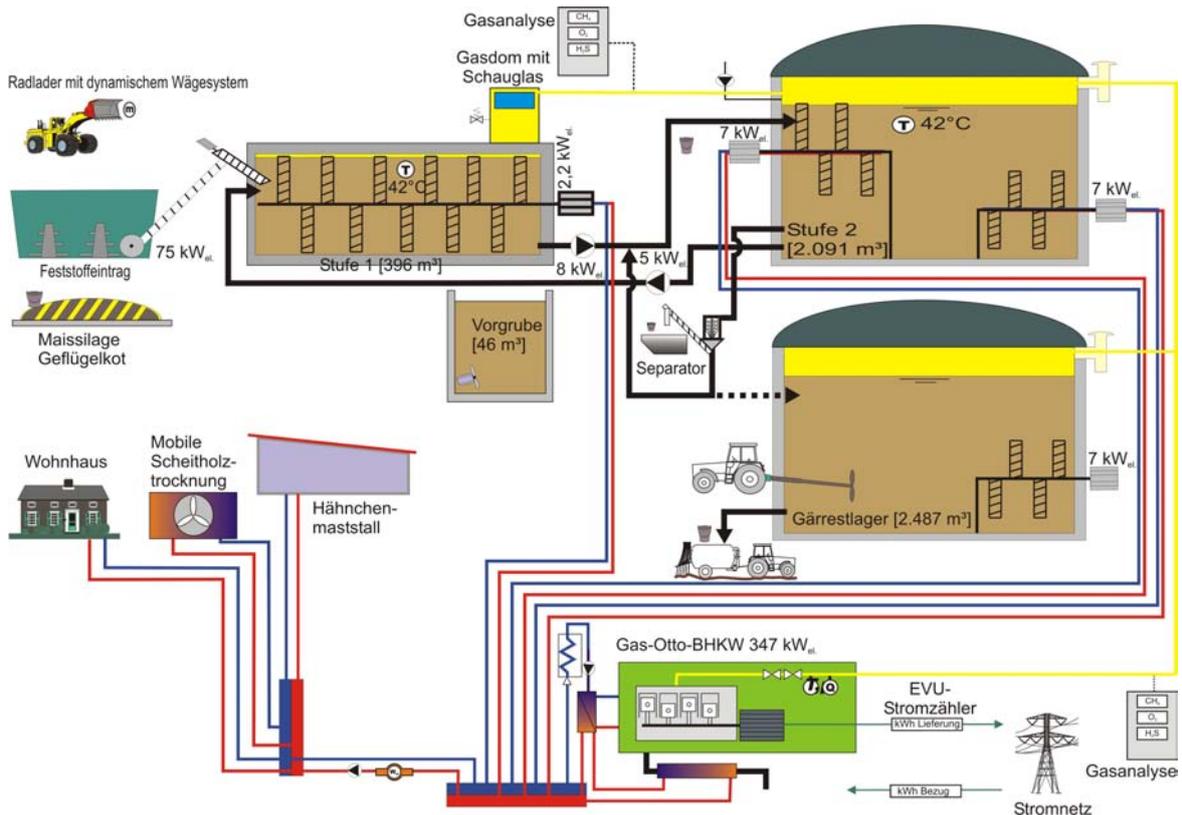


Abb. 15: Fließbild der Pilotanlage E

Alle Behälter sind in Stahlbeton gefertigt. Stufe 2 und das Gärrestlager verfügen über eine Einfachfolienhaube für die Zwischenspeicherung des erzeugten Biogases. Die Gasverwertung erfolgt in einem Gas-Otto-Motor mit 347 kW_{el} Nennleistung. Die anfallende Wärme wird für die Beheizung des benachbarten Hähnchenmaststalls und eines Wohnhauses sowie in einer mobilen Hackschnitzeltrocknungsanlage genutzt. Der gesamte erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

Um eine zu starke Eindickung des Gärgemisches in der ersten Stufe zu vermeiden und den ammoniakalischen Stickstoffgehalt zu senken, mussten der Biogasanlage große Mengen an Wasser zugegeben werden. Hieraus ergab sich das Problem, dass die Kapazität des Gärrestlagers für die erforderliche Lagerdauer nicht ausreichte. Es wurde daher vom Anlagenhersteller eine Separationsanlage (Pressschneckenseparator) nachgerüstet, in der der Überlauf aus der zweiten Stufe separiert wird.

Die flüssige separierte Phase wird in den Nachgärbehälter zurückgeführt. Hierdurch wird das Gärgemisch im Nachgärer verdünnt. Aus dem Nachgärer wird wiederum Material in den liegenden Fermenter (Stufe 1) rezirkuliert, wodurch das Gärgemisch in diesem ebenfalls verdünnt wird. Die feste separierte Phase wird auf der Anlage zwischengelagert und dann landwirtschaftlich ausgebracht.

4.7.6 Pilot-Biogasanlage F

Die Pilot-Biogasanlage F wurde bereits im Jahr 2002 in Betrieb genommen und seither mehrfach erweitert und umgebaut. Die Planung erfolgte durch ein kommerzielles Planungsbüro, der Bau überwiegend durch den Maschinenring. Die Anlage weist zwei parallel geschaltete liegende Hauptgärbehälter in Quaderform (Stufe 1 a/b) und einen stehenden, zylindrischen Nachgärer (Stufe 2) auf. Die Biomasse wird in die beiden liegenden

Hauptgärbehälter über einen Presskolben bzw. eine Pressschnecke eingetragen. Die Anlage verfügt über eine Einrichtung zur Gärrestseparation (Pressschneckenseparator). Das flüssige Separat wird in zwei Gärrestlagern gelagert, von denen eines mit einer schwimmenden Abdeckung versehen ist (Abb. 16).

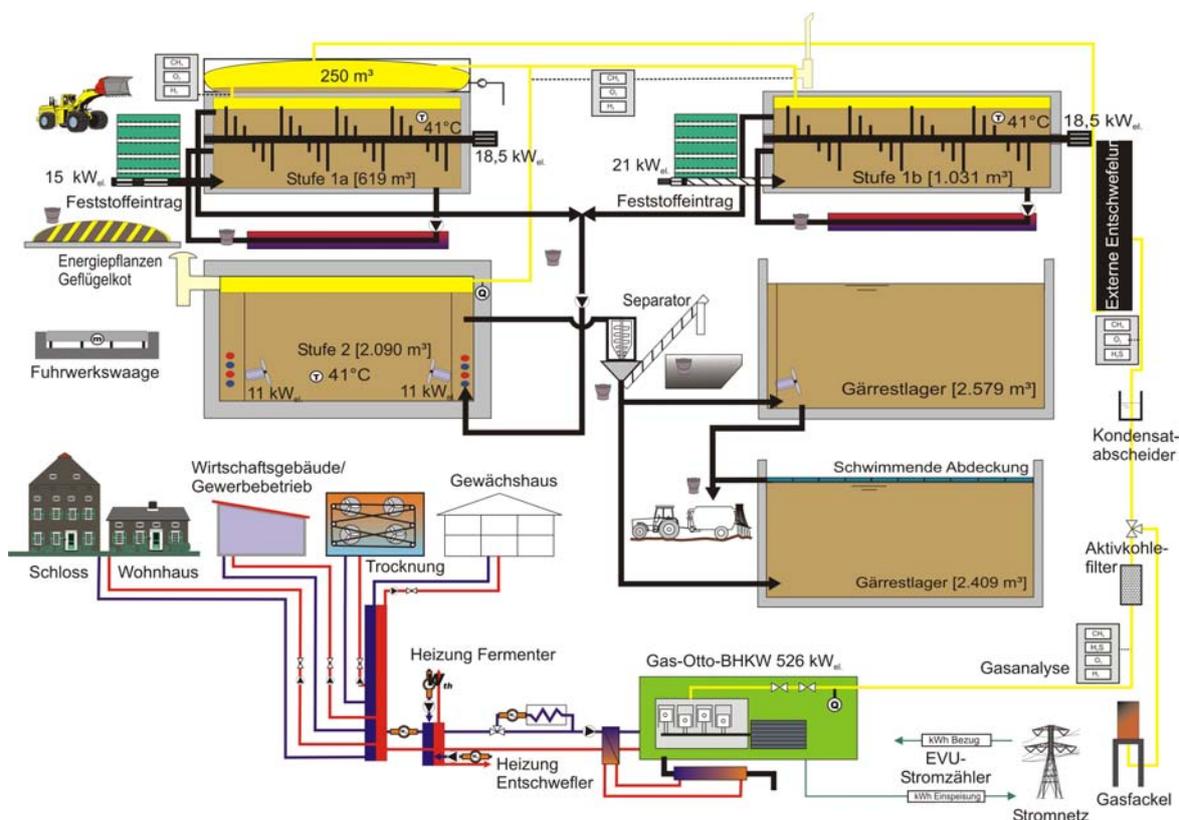


Abb. 16: Fließbild der Pilotanlage F

Alle Behälter sind in Stahlbeton ausgeführt. Die Zwischenspeicherung des Biogases erfolgt in einem Gassack über dem Fermenter 1a. Die Pilotanlage F verfügt außerdem über eine Not-Gasfackel. Das Biogas wird in einem Gas-Otto-Motor mit 526 kW_{el} Nennleistung verwertet. Mit der Abwärme werden ein Schloss, ein Wohnhaus, Wirtschaftsgebäude, ein Gewerbebetrieb sowie ein Gewächshaus versorgt. Außerdem werden zwei Anlagen zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter betrieben. Der erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.7.7 Pilot-Biogasanlage G

Die Pilot-Biogasanlage G wurde von einem kommerziellen Anbieter geplant. Die Anlage bestand zu Projektbeginn aus einem Hauptgärbehälter (Stufe 1) und einem Nachgärer (Stufe 2) gleicher Bauform. In 2007 wurde die Anlage um ein Gärrestlager mit Gaserfassung erweitert. Die Biomasse wird aus einem Trichter mit Auflöserschnecke in die Stufe 1 eingetragen. Eine Vorgrube dient der Sammlung der Gülle aus dem benachbarten Schweinestall (Abb. 17).

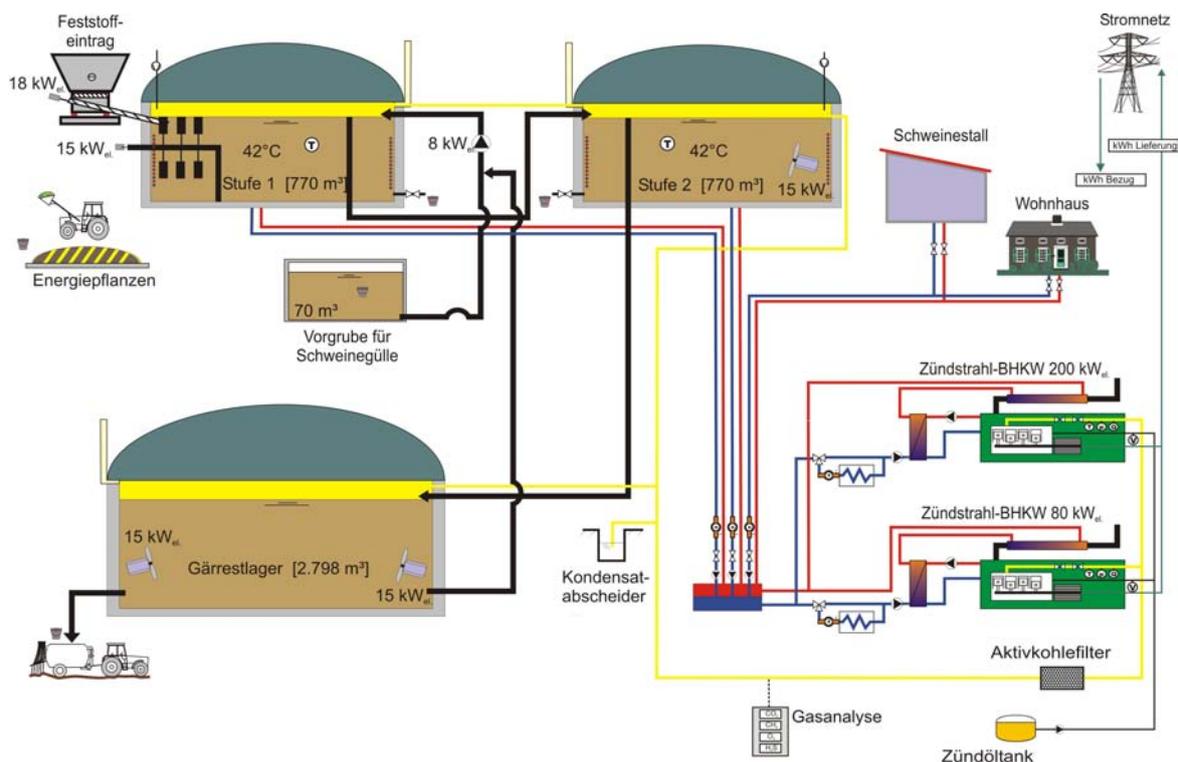


Abb. 17: Fließbild der Pilotanlage G

Alle Behälter sind als stehende Zylinder in Stahlbeton ausgeführt und verfügen über eine Folienhaube. Das produzierte Biogas wird in zwei Zündstrahl-Motoren mit 100 bzw. 190 kW_{el} Nennleistung verwertet. Die Wärme wurde während des Beobachtungszeitraums zur Beheizung des angrenzenden Schweinestalls und eines Wohnhauses genutzt, zukünftig wird über eine Fernwärmeleitung eine Klinik mitversorgt. Der erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.7.8 Pilot-Biogasanlage H

Die Pilot-Biogasanlage H wurde von einem kommerziellen Anbieter geplant und geliefert. Die Anlage bestand in der ersten Ausbaustufe aus einem liegenden, zylindrischen Hauptfermenter (Stufe 1), einem stehenden, zylindrischen Nachgärer (jetzige Stufe 3) sowie einem offenen Gärrestlager. Anfang 2007 wurde die Anlage um einen zweiten Nachgärbehälter (jetzige Stufe 2) und einen Pressschneckenseparator erweitert. Der Ablauf aus der dritten Stufe wird mit einer Pressschnecke separiert. Die flüssige Phase gelangt in das Gärrestlager, die feste Phase wird landwirtschaftlich ausgebracht, ein geringer Anteil wird der Anlage wieder zugeführt. Der Feststoffeintrag in die Stufe 1 erfolgt aus einem Vertikalmischer (Abb. 18).

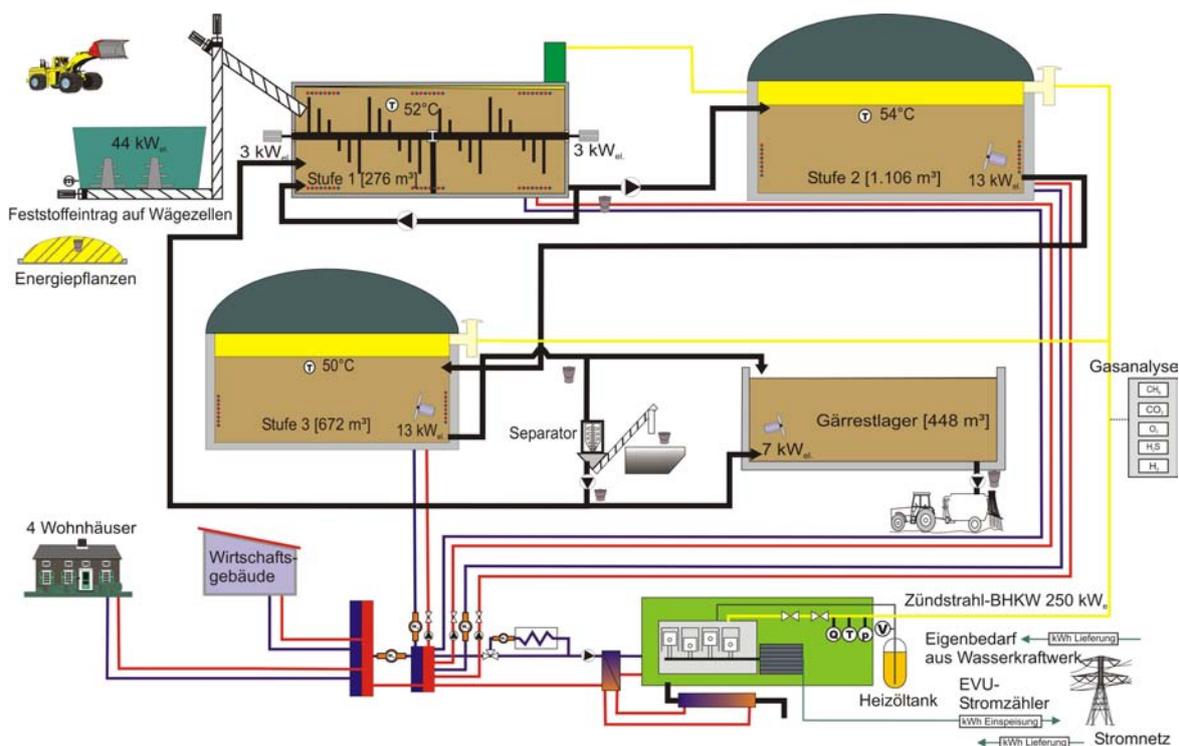


Abb. 18: Fließbild der Pilotanlage H

Der Hauptfermenter und die beiden Nachgärer sind in Edelstahl ausgeführt, das Gärrestlager in Stahlbeton. Die Zwischenspeicherung des Biogases erfolgt unter Folienhauben auf den beiden Nachgärbehältern. Die Anlage wies ursprünglich eine sogenannte thermische Desintegrationseinheit zwischen Stufe 1 und 2 auf, die dem Aufschluss partikulären Materials durch Einwirkung einer Temperatur von 70°C dienen soll. Dieses Modul wurde jedoch nie genutzt und daher in 2007 entfernt. Das produzierte Biogas wird in einem Zündstrahl-Motor mit 250 kW_{el} Nennleistung verwertet. Die Wärme aus dem BHKW wird zur Beheizung eines Wirtschaftsgebäudes und von vier nahe gelegenen Wohnhäusern genutzt. Der gesamte erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist. Der Strombedarf der BGA wird durch ein Kleinwasserkraftwerk und aus dem Elektrizitätsnetz gedeckt.

4.7.9 Pilot-Biogasanlage I

Die Pilot-Biogasanlage I wurde von einem kommerziellen Anbieter geplant und errichtet. Die Anlage besteht aus einer beheizten Hydrolysegrube (Stufe 1), einem stehenden, zylindrischen Hochfermenter (Stufe 2) und einem offenen Gärrestlager. Die Biomasse wird teilweise aus einem Feuchtsilo, teilweise direkt in die Hydrolysegrube eingebracht und von dort in den Hauptgärbehälter gepumpt (Abb. 19).

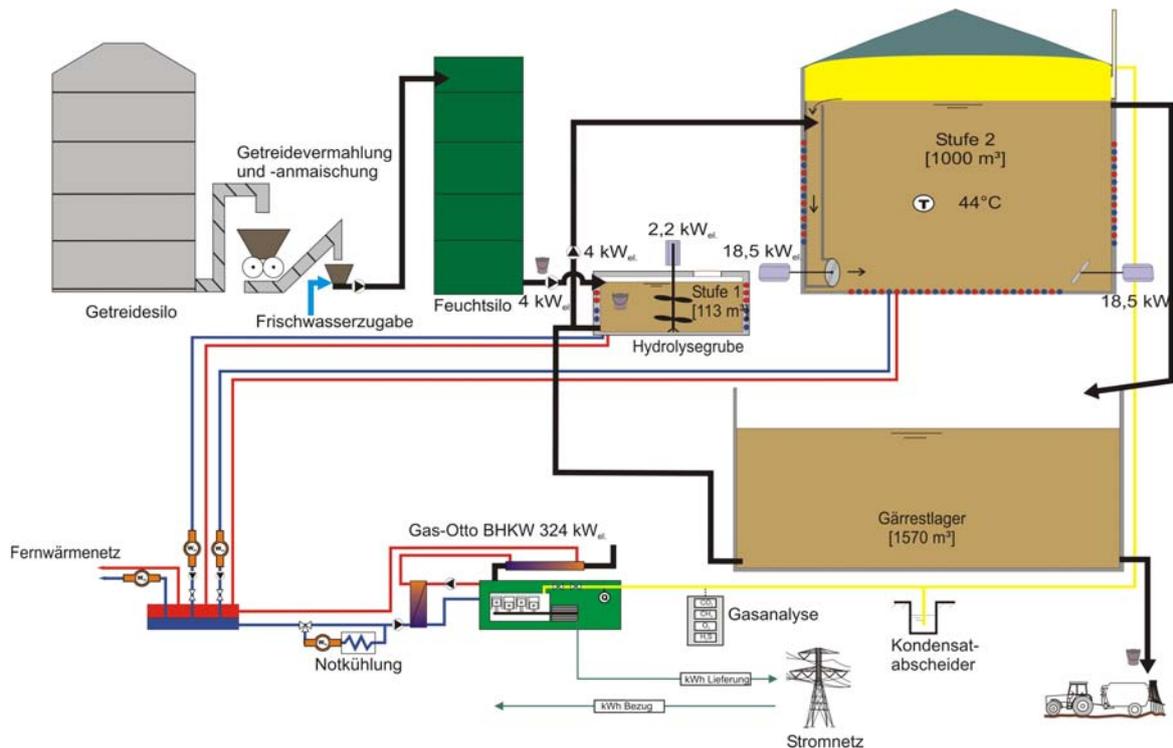


Abb. 19: Fließbild der Pilotanlage I

Die unterirdische Hydrolysegrube ist in Stahlbeton ausgeführt. Der Hochbehälter für Getreidekörner, das Feuchtsilo, der Fermenter und das Gärrestlager wurden aus Stahl in Spiraalfalztechnik errichtet. Der Fermenter verfügt über ein Stahldach und einen Foliensack als Gasspeicher. Das produzierte Biogas wird in einem Gas-Otto-Motor mit 324 kW_{el} Nennleistung verwertet. Die Wärme wird in einem Nahwärmenetz zur Versorgung von Wohnhäusern in der benachbarten Ortschaft genutzt. Der erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.7.10 Pilot-Biogasanlage J

Die Pilot-Biogasanlage J wurde bereits 2001 errichtet und seither mehrfach erweitert. Die Anlage verfügt jetzt über drei stehende, zylindrische Gärbehälter (Stufe 1, 2 und 3) und ein offenes Gärrestlager. In 2007 wurde das Gärrestlager mit einer Gaserfassung nachgerüstet. Da die Statik des bestehenden offenen Lagerbehälters ein Aufsetzen der Tragkonstruktion für das Foliendach nicht erlaubte, wurde in diesem ein neuer Behälter betoniert, der mit 7 m hohen Wänden ein Fassungsvermögen von 2400 m³ aufweist. Stufe 1 und 2 werden jeweils aus einem Vertikalmischer mit Biomasse beschickt. Die Gülle vom nahe gelegenen Hof wird über eine Pumpleitung in die Fermenter eingebracht (Abb. 20).

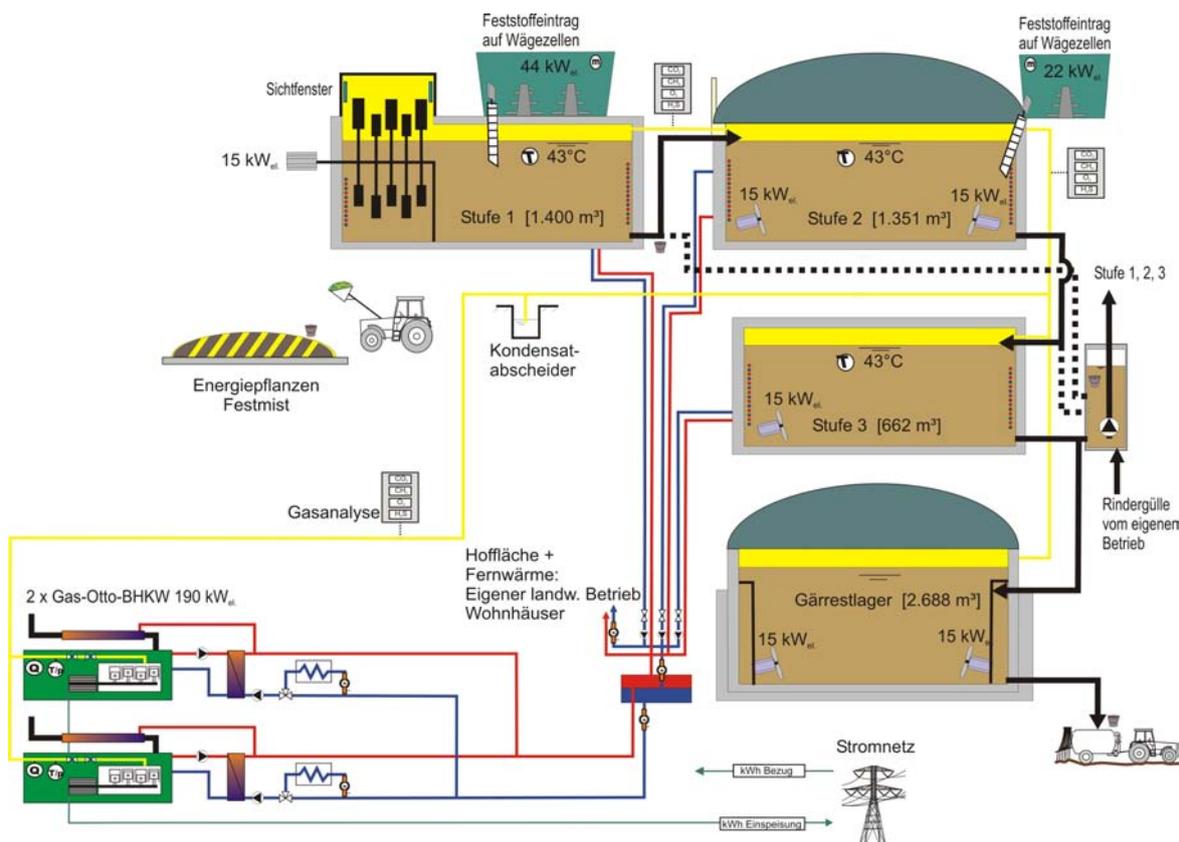


Abb. 20: Fließbild der Pilotanlage J

Alle Behälter sind in Stahlbeton ausgeführt. Stufe 1 und 3 verfügen über Massivdecken, Stufe 2 über einen Doppelmembran-Gasspeicher, das Gärrestlager über ein Zeltdach. Das produzierte Biogas wird in zwei baugleichen Gas-Otto-Motoren mit jeweils 190 kW_{el} Nennleistung verwertet. Die Wärme aus dem BHKW wird zur Beheizung der Hoffläche, der Wohn- und Wirtschaftsgebäude des landwirtschaftlichen Betriebes sowie mehrerer fremder Wohnhäuser genutzt. Der erzeugte elektrische Strom wird in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

4.8 Dokumentation baulicher und technischer Einrichtungen der Pilot-Biogasanlagen

Die verfügbaren Dokumentationsunterlagen zu den Pilot-Biogasanlagen sind zu umfangreich, um sie vollständig in diesem Bericht abzdrukken. Die Materialien können einzeln für jede Pilotanlage auf Anfrage und gegen eine Schutzgebühr von der Landesanstalt für Landwirtschaft erworben werden (siehe Anhang).

4.8.1 Planunterlagen und 3D-Modelle

Von allen BGA wurde auf Basis vorhandener Planunterlagen unter archLINE® 2006 ein dreidimensionales Modell erstellt. Zu diesem Zweck wurden die verfügbaren Baupläne durch Aufmaß vor Ort überprüft und ggf. ergänzt. Aus den 3D-Modellen können isometrische Darstellungen, Grundrisse und Schnitte der Pilotanlagen erzeugt werden.

4.8.2 Poster

Aus den erarbeiteten Planunterlagen, Stammdaten und Fotos wurden unter MS Publisher für jede einzelne Pilotanlage drei Poster (DIN A0) nach einheitlichem Aufbau gestaltet. Auf diesen Postern werden die einzelnen Anlagen mit den wichtigsten technischen Daten, einem Lageplan und einem Grundriss, zeichnerischen Darstellungen sowie Detailfotos vorgestellt.

4.8.3 3D-Darstellung der Pilotanlagen mittels Rendern

Auf Basis des 3D-Modells wurde unter Gamma-Ray® von jeder Anlage ein gerendertes Video mit einer Dauer von drei bis vier Minuten erstellt. In die Videos wurden zur Erläuterung Beschriftungen der wichtigsten Anlagenkomponenten eingefügt.

4.8.4 Dokumentationsmappen

Die Dokumentationsmappen enthalten sehr detaillierte Informationen zu den einzelnen Pilotbetrieben und sind vor allem für solche Personen gedacht, die bereits kurz vor dem Eintritt in die Planungsphase für eine Biogasanlage stehen. Die Mappen sind wie folgt gegliedert:

1. Besondere Auswahlkriterien
2. Standortbedingungen und Faktorausstattung des Betriebes
3. Motivation für den Einstieg in die Biogasproduktion
4. Detaillierte bauliche und technische Dokumentation der Biogasanlage
5. Pläne
6. Bewertung ausgewählter Umweltwirkungen des Biogasbetriebs

Die Dokumentationsmappen können von Interessierten gegen eine Schutzgebühr von der Landesanstalt für Landwirtschaft erworben werden (siehe Anhang).

4.8.5 Publikationen

In einer LfL-Informationsschrift werden die zehn Pilot-Biogasanlagen mit den wichtigsten technischen Daten, einem Grundriss und zeichnerischen Darstellungen vorgestellt. Diese Schrift kann von den Internet-Seiten der LfL kostenlos als pdf-Datei heruntergeladen oder gegen eine geringe Schutzgebühr in gedruckter Form erworben werden.

4.8.6 Grundrisse und isometrische Darstellungen der Pilot-Biogasanlagen

Von den Pilot-Biogasanlagen wurden Grundrisse mit farblicher Kennzeichnung der funktionalen Einheiten angefertigt. Aus dem 3D-Modell wurden isometrische Darstellungen erstellt. Die folgenden Abbildungen geben einen Einblick in die bauliche und architektonische Vielfalt der Pilotanlagen.

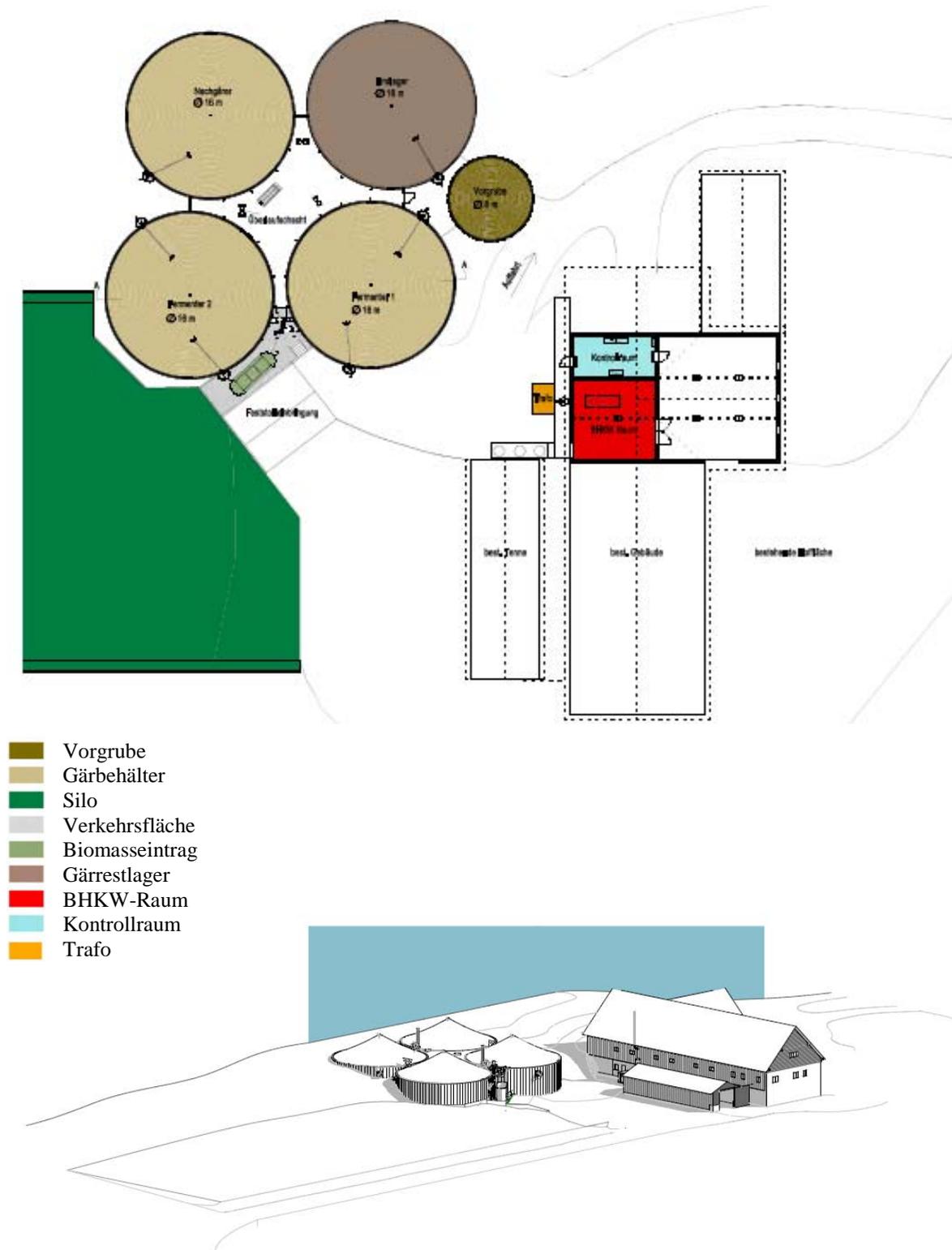


Abb. 21: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage A

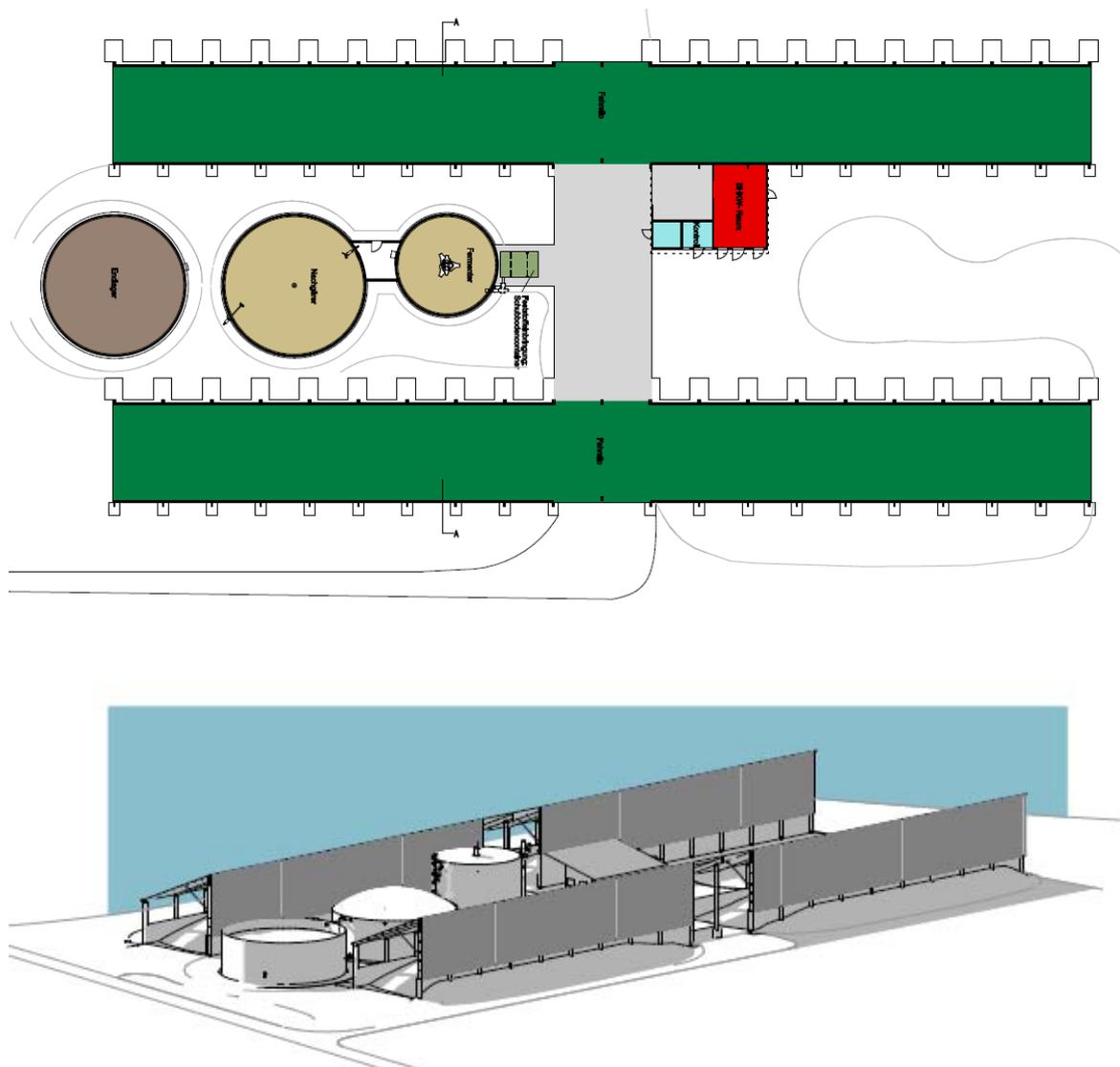


Abb. 22: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage B

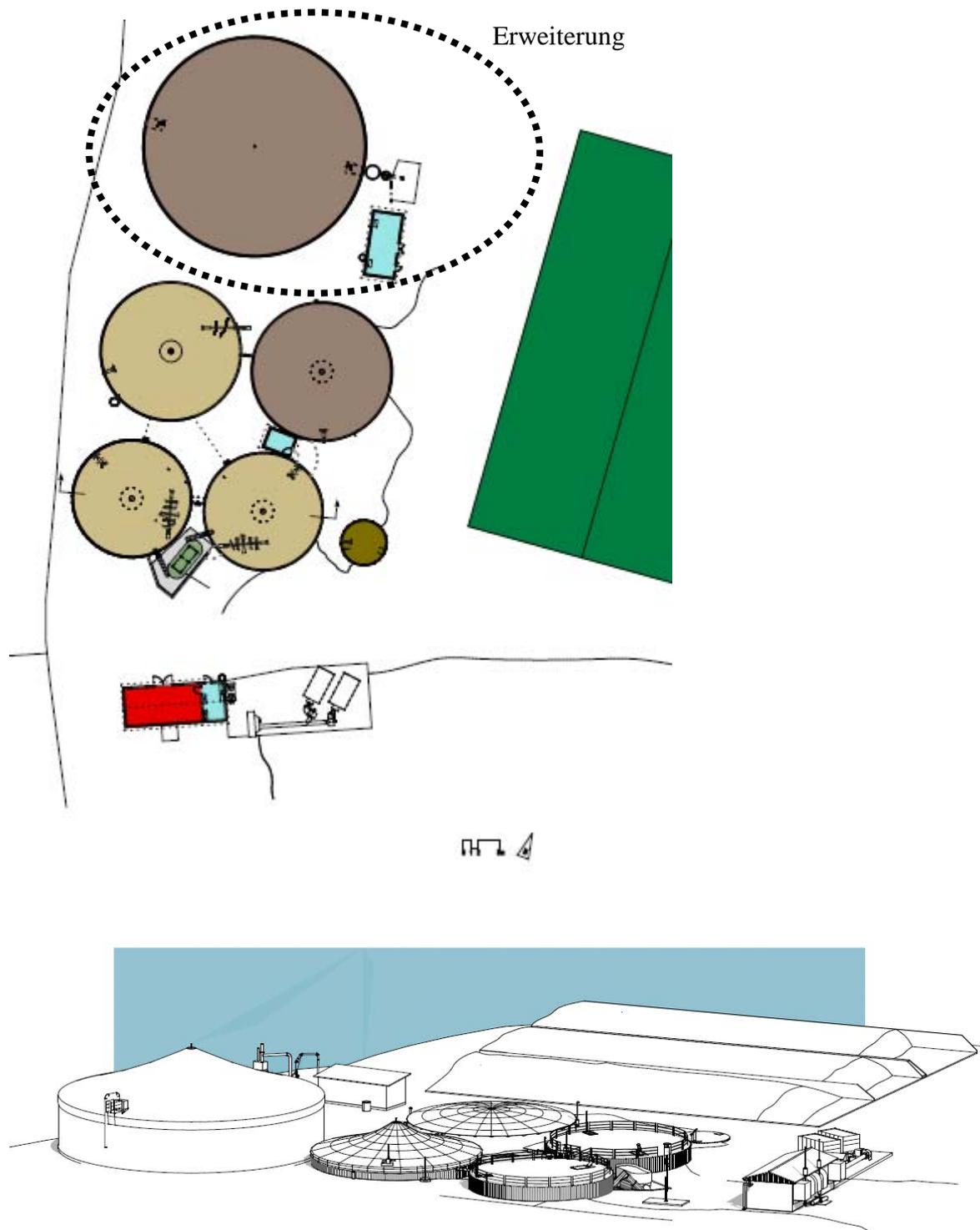


Abb. 23: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage C/C*

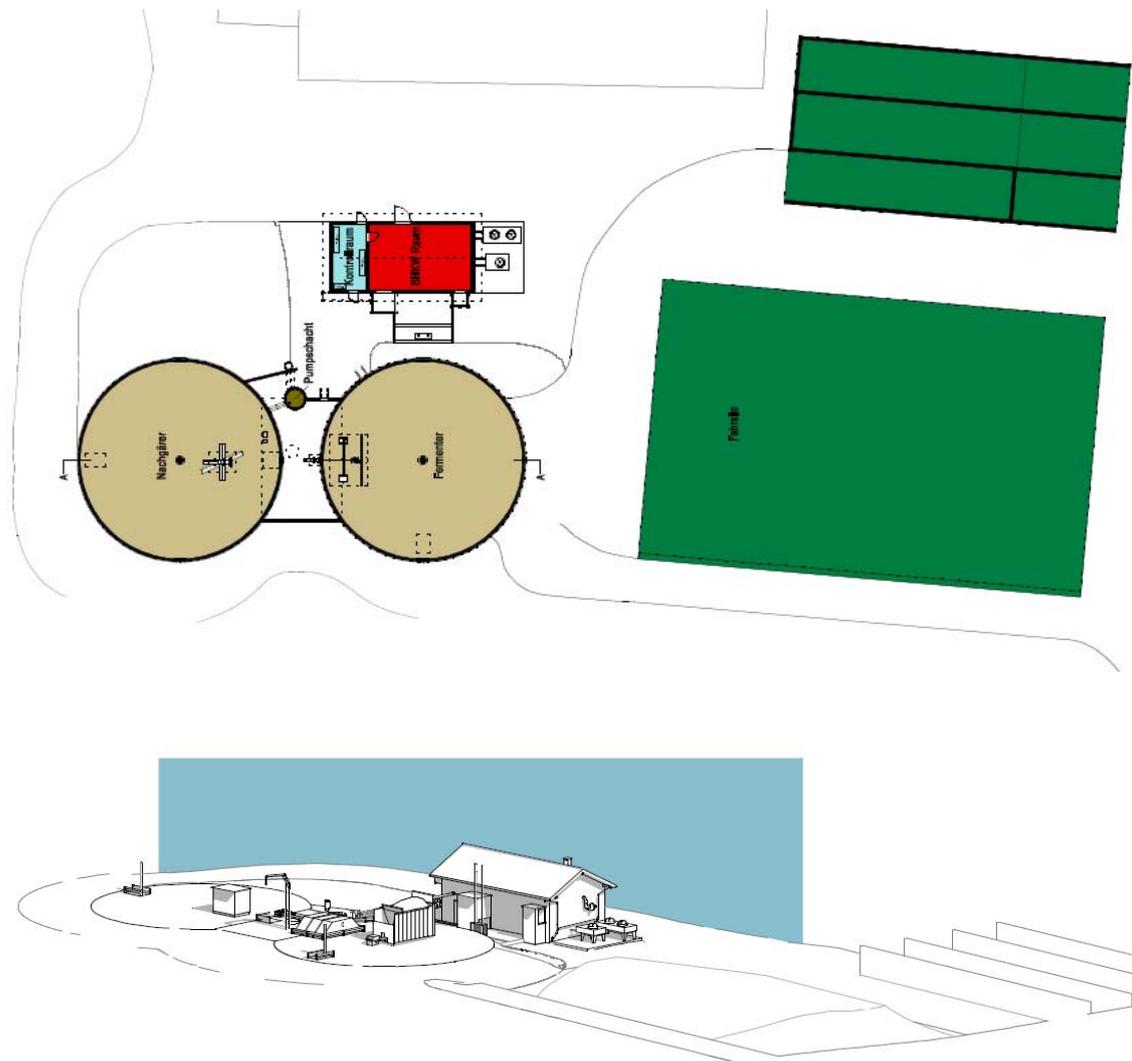


Abb. 24: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage D

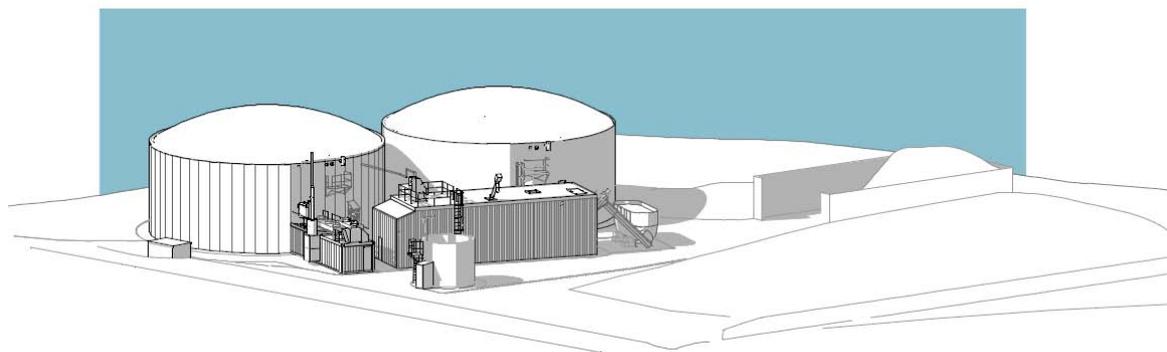
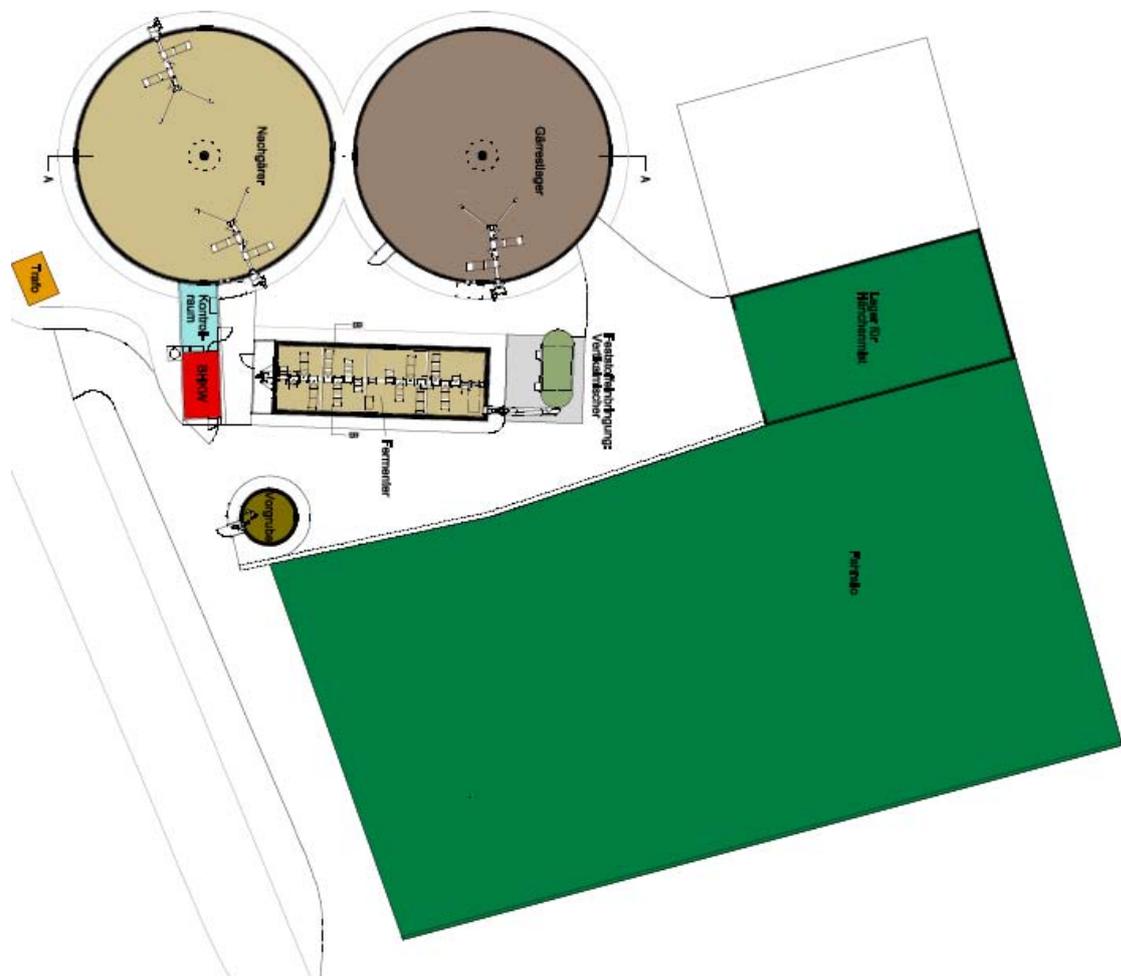


Abb. 25: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage E

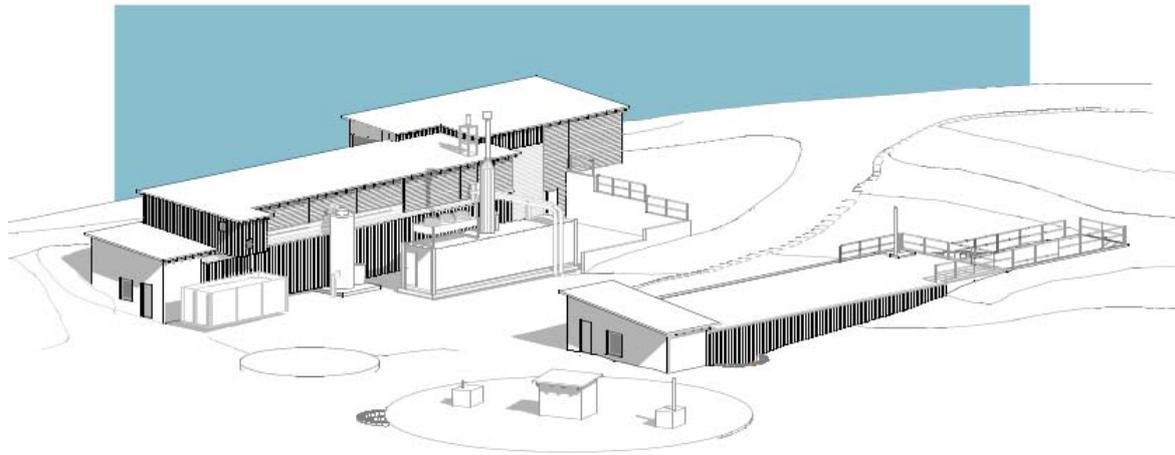
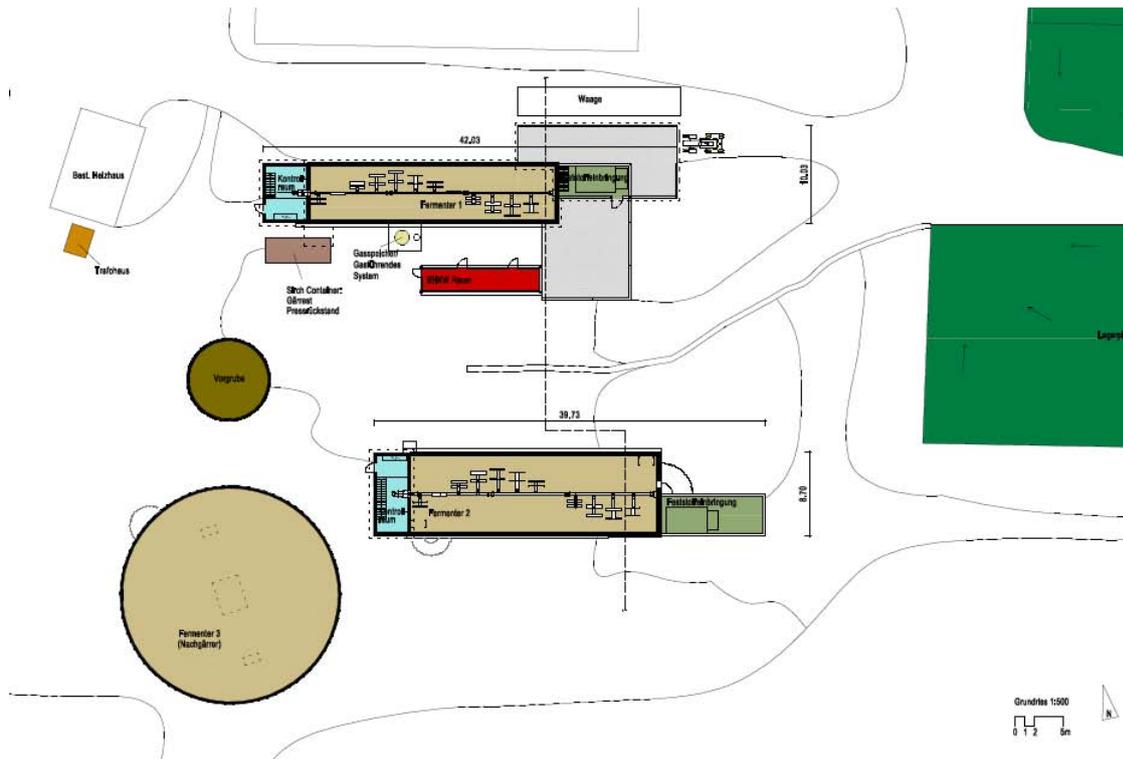


Abb. 26: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage F

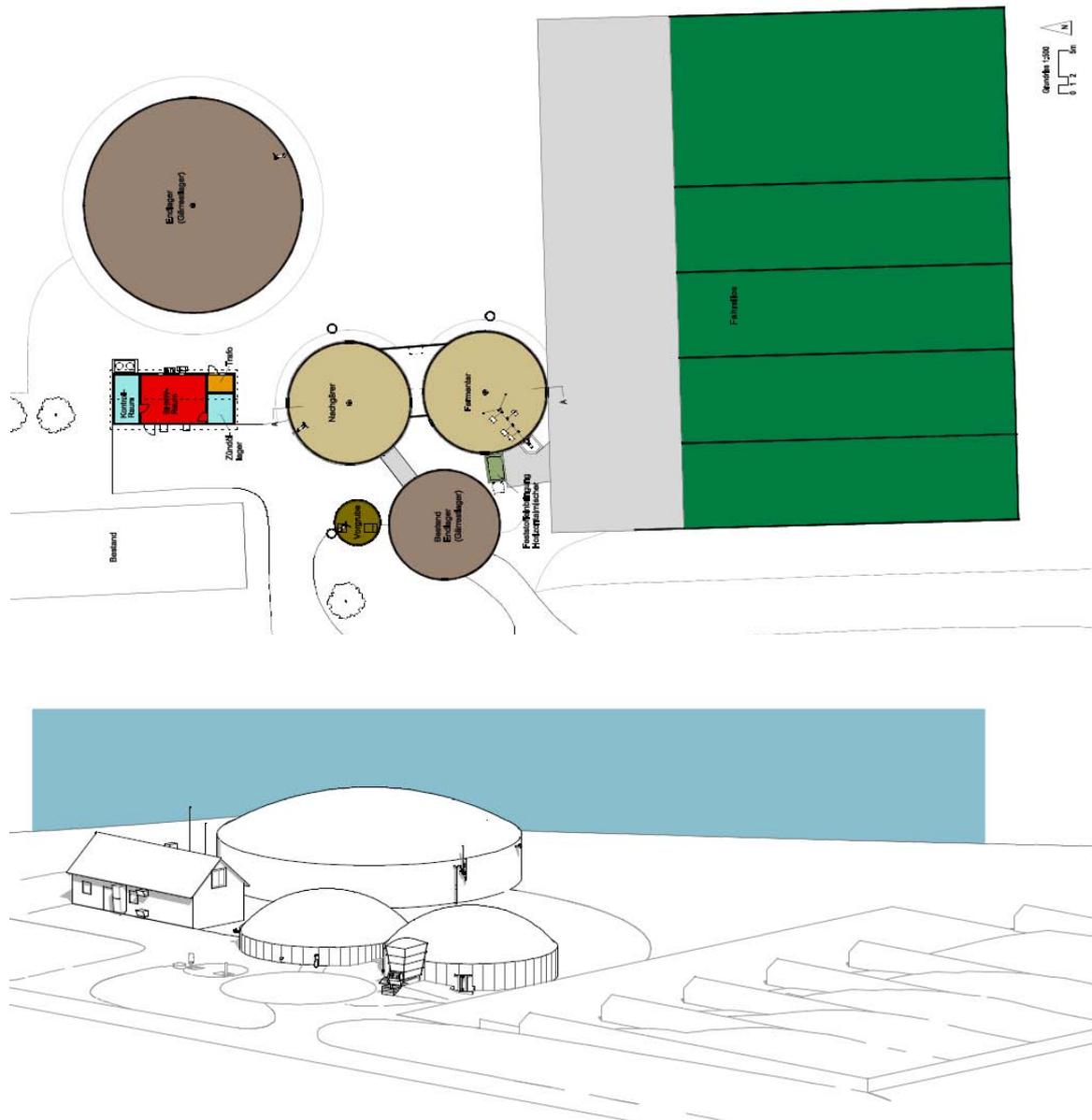


Abb. 27: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage G

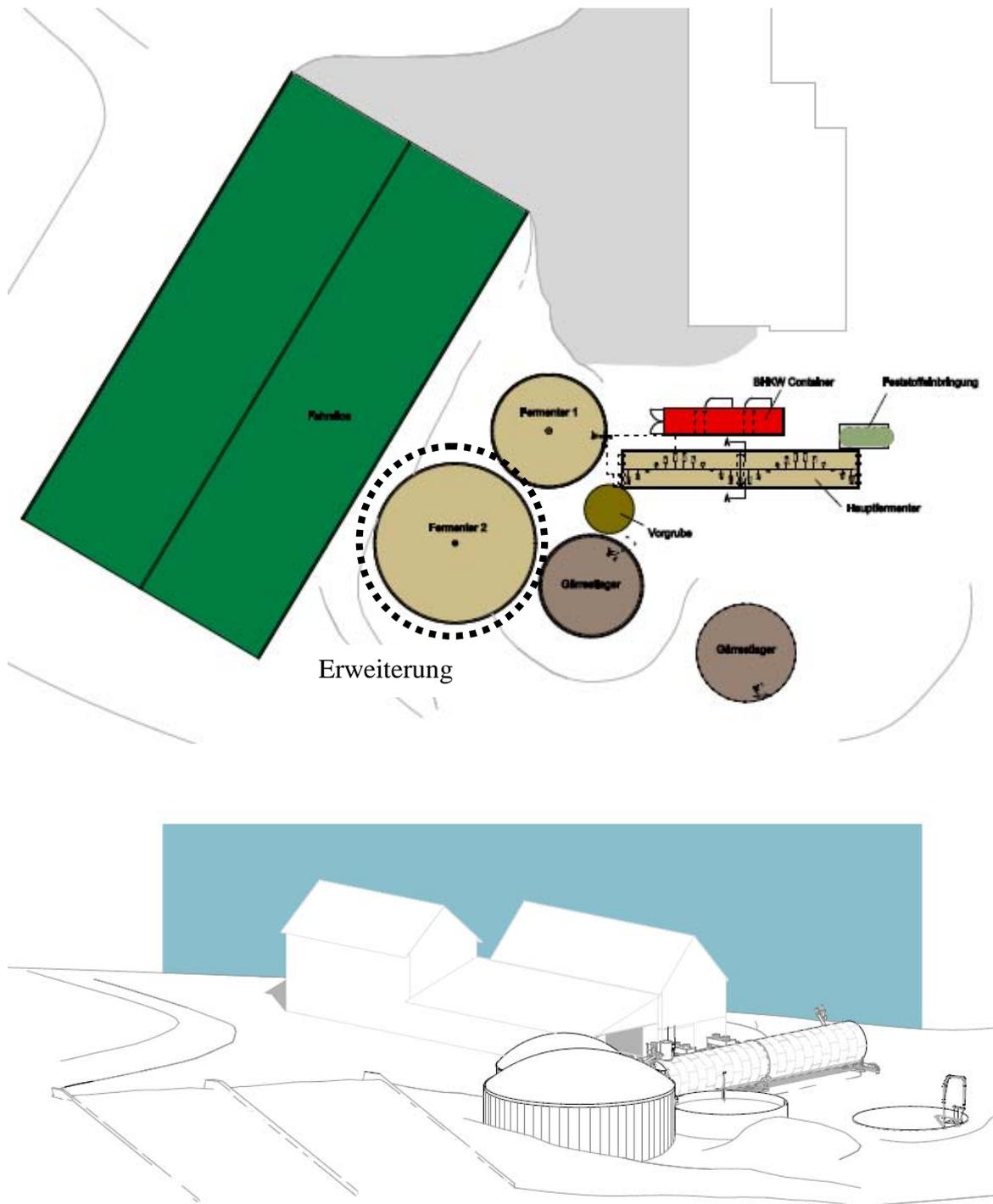


Abb. 28: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage H/H*

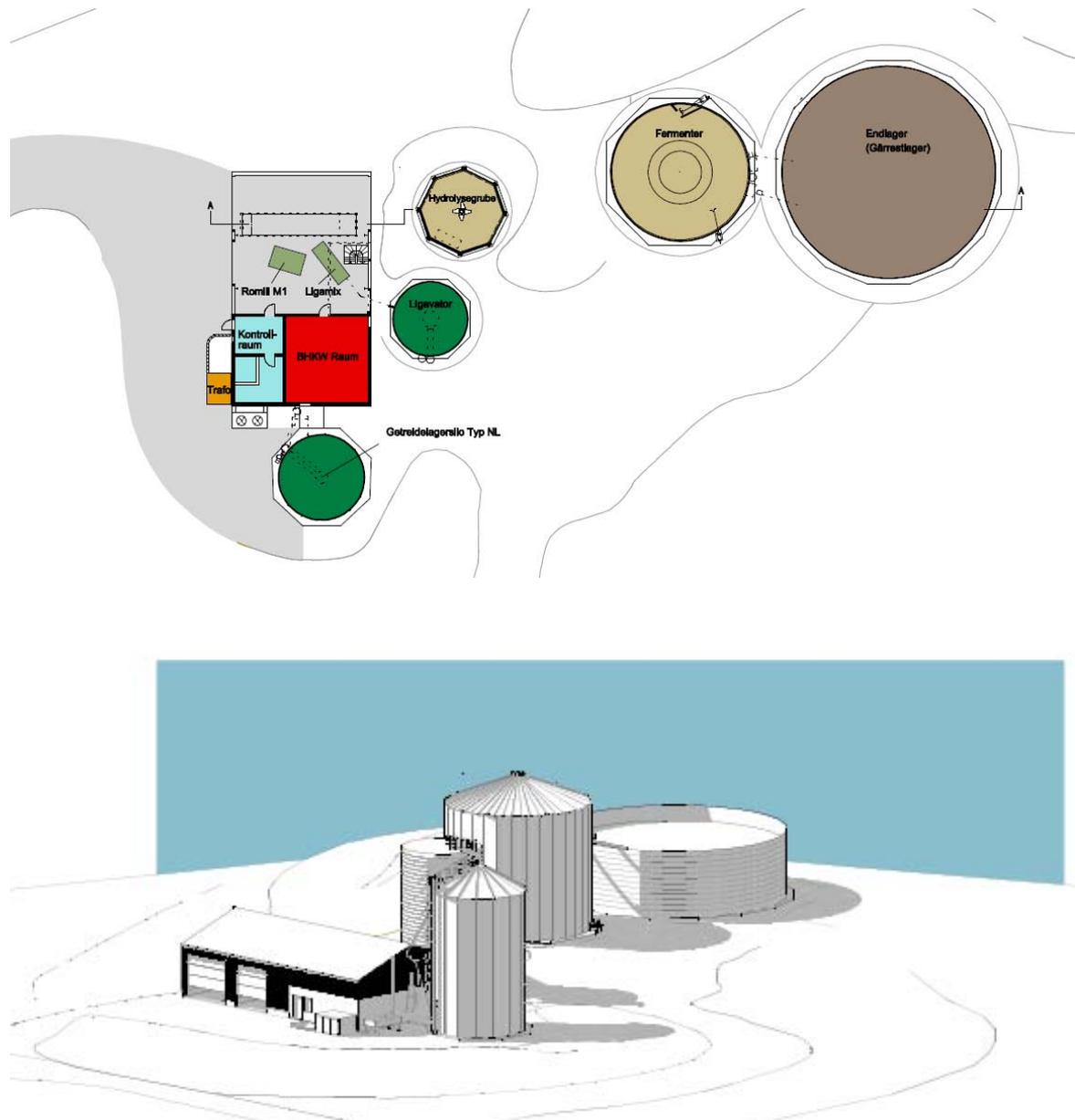


Abb. 29: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage I

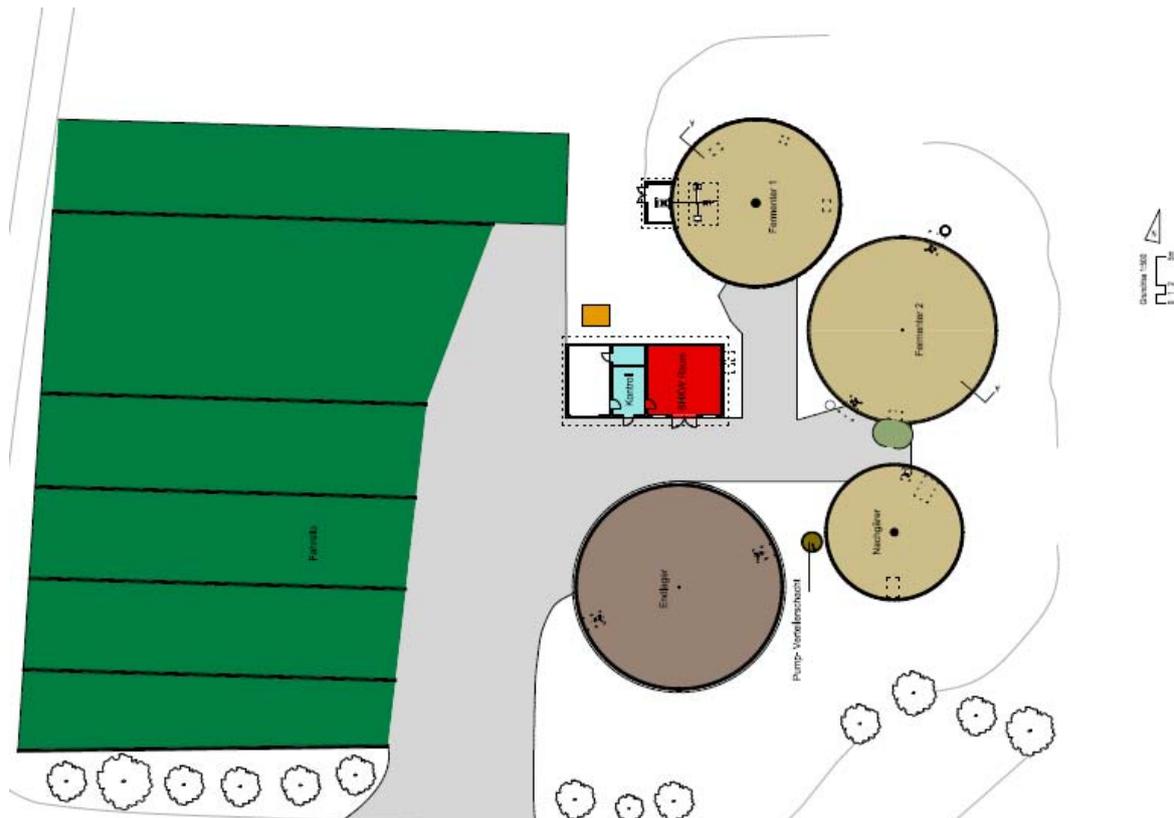


Abb. 30: Grundriss und isometrische Darstellung der Pilotanlage J

4.8.7 Grundfläche und Rauminhalt der Pilot-Biogasanlagen

Grundflächen und Rauminhalte sind maßgeblich für die Ermittlung der Kosten im Hochbau und für den Vergleich von Bauwerken. Die Regeln für deren Berechnung sind in der DIN 277 festgelegt. Die Brutto-Grundfläche (BGF) bezeichnet diejenige Fläche, welche sich aus der Summe aller Grundflächen aller Grundrissebenen eines Gebäudes errechnet. Der Brutto-Rauminhalt (BRI) ist der Rauminhalt eines Baukörpers, der durch die Unterfläche der konstruktiven Bauwerkssohle und die äußeren Begrenzungsflächen des Bauwerkes begrenzt wird. BGF und BRI der zehn Pilot-Biogasanlagen sind in Tab. 6 gegenübergestellt. Die folgenden Abbildungen stellen die der Berechnung zu Grunde liegenden Baukörper schematisch dar. Nicht enthalten sind Fahrsilos und Bestandsgebäude.

Tab. 6: *Brutto-Grundflächen und Brutto-Rauminhalte der Pilot-Biogasanlagen*

ID Anlage	A	B	C*	D	E	F	G	H*	I	J
BGF, m ²	1.002	771	1.917	680	769	1.323	1.095	529	817	1.353
BRI, m ³	7.234	5.459	9.533	3.867	5.852	5.175	6.382	2.709	6.287	8.881

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

Abb. 31: Schematische Darstellung der Baukörper der Pilot-Biogasanlagen (nicht maßstabsgetreu)

4.9 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen der Stromproduktion und des Kumulierten Energieaufwands für die Pilotanlagen

Für die Bewertung der Umweltwirkungen wurde die Ökobilanzmethode gewählt (DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. (2006 a+b)). In einer Ökobilanz werden die Umweltwirkungen eines Produkts oder eines Verfahrens über den gesamten Lebensweg von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion bis zur Entsorgung untersucht. Bei dieser ganzheitlichen Betrachtung kann weitgehend ausgeschlossen werden, dass ein eventuell bestehendes Umweltproblem aus dem betrachteten Bilanzrahmen in einen angrenzenden Bilanzrahmen, der nicht Teil der Bewertung ist, verschoben wird.

Die Durchführung einer Ökobilanz gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst werden das Ziel, der Untersuchungsrahmen und der Untersuchungszeitraum festgelegt. Im Anschluss werden sämtliche Energie- und Stoffflüsse in einem Datensatz zusammengefasst (Sachbilanz). Nach dieser Bestandsaufnahme werden die möglichen Umweltwirkungen, die aus dem ermittelten Rohstoffverbrauch und den Emissionen resultieren, abgeschätzt und bewertet (Wirkungsabschätzung). Abschließend werden die Ergebnisse interpretiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet (Auswertung). Für die Wirkungsabschätzung wurde die Methode des Umweltbundesamtes verwendet (Umweltbundesamt, 1999).

Als Rahmen für die Bilanzierung der Umweltwirkung „globale Erwärmung“ oder „Treibhauseffekt“ wurde die Biogasanlage inkl. Vorkette gewählt. Die Vorkette entspricht dabei dem „Klima-Rucksack“, den Produkte mitbringen, die in den Bilanzierungsrahmen importiert werden (v. a. Mineraldünger, Dieselmotorkraftstoff und elektrische Energie). Eine detailliertere Beschreibung der Methodik findet sich in den Veröffentlichungen, die in Abschn. 8 dokumentiert sind. Die Methodik wurde im Verlauf des Projektes fortlaufend verfeinert.

4.9.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In diesem Schritt wird das Ziel der Ökobilanz formuliert, die untersuchte Verfahrenskette beschrieben und das betrachtete System abgegrenzt.

4.9.1.1 Zieldefinition

Die Ökobilanz soll die Treibhausgasemissionen und den Verbrauch fossiler Ressourcen bei der Bereitstellung von Strom und Wärme auf den Pilotanlagen ermitteln. Ein Vergleich der Anlagen soll Hinweise zur Spannweite bestimmter Größen und zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch liefern.

4.9.1.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit stellt ein Maß für den Nutzen des betrachteten Prozesses dar und dient als Bezugsgröße für In- und Outputflüsse. Das Hauptprodukt der betrachteten Biogasanlagen ist elektrischer Strom. Als funktionelle Einheit wurde daher eine Kilowattstunde Strom gewählt, der in das Stromnetz eingespeist wird. Alle Stoff- und Energieströme werden auf diese Einheit bezogen.

4.9.1.3 Untersuchungsrahmen und Untersuchungszeitraum

Der Untersuchungsrahmen umfasst alle zur Energieproduktion notwendigen Prozesse und die sie verbindenden Material- und Energieflüsse. Die Verfahrenskette Biogas wurde dazu in folgende Abschnitte aufgeteilt: Erzeugung, Transport und Konservierung der pflanzlichen Rohstoffe sowie Transport der Wirtschaftsdünger; Betrieb der Biogasanlage; Gär-

restbehandlung; Errichtung der Biogasanlage. Eventuell vorhandene weitere landwirtschaftliche Betriebszweige auf den Pilotbiogasanlagen waren nicht Teil der Betrachtung. Als Untersuchungszeitraum wurde das Kalenderjahr 2007 gewählt. Die Stoffströme für die Anlagenerrichtung wurden entsprechend der technischen Lebensdauer der Bauteile nur mit dem jeweiligen Zeitwert berücksichtigt.

4.9.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz enthält die Basisdaten zur Ermittlung der Ökobilanz. Hier werden die jeweiligen In- und Outputströme der einzelnen Prozesse angegeben. Anschließend können diese Daten zur Gesamtbilanz addiert und auf die funktionelle Einheit bezogen werden.

4.9.2.1 Modellierung Biogasanlagen

Das Modell der Stoffströme der Pilot-Biogasanlagen wurde mit der Software Umberto erstellt. Die Biogasanlagen wurden dabei in großer Detailtiefe abgebildet.

4.9.2.2 Datensammlung

Hauptsächlich wurden die Material- und Energieströme aus im Rahmen des Projektes über den Untersuchungszeitraum erhobenen Daten oder auf Basis von Einzelmessungen ermittelt. Ein Teil der benötigten Daten wurde der Literatur entnommen oder abgeschätzt. Im Folgenden wird die Herkunft der Daten kurz dargestellt.

NawaRo-Anbau. Die Ernteketten für den Anbau der jeweiligen nachwachsenden Rohstoffe wurden auf Basis von Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL 2006; 2008) mit mittleren Hektarerträgen modelliert. Für den Anbau aller Feldfrüchte wurde „Wendende Bodenbearbeitung“ unterstellt.

Die gasförmigen Ammoniakverluste bei der Gärrestausrückführung hängen wesentlich von den Temperaturen zum Zeitpunkt der Ausbringung und vom Zeitpunkt der Einarbeitung des Gärrests in den Boden ab. Tab. 7 zeigt die angenommenen Anteile der Emissionsniveaus für Ackerland und Grünland. Die Werte gelten für eine Ausbringung des Gärrests mit einem emissionsintensiven Breitverteiler. Zusätzlich wurde festgelegt, dass 25 % des Gärrests mit Breitverteiler ausgebracht werden und 75 % mit Schleppschlauchtechnik. Nach KTBL (2005) lassen sich mit dieser Technik im Vergleich zur Ausbringung mit Breitverteiler im Schnitt 40 % der Emissionen vermeiden (KTBL 2008, S. 268: mittlerer Wert für Gülle). Die Emissionen bei der Ausbringung von Gärrest auf Grünland wurden im Vergleich zur Ausbringung auf Acker etwas ungünstiger angenommen, da keine Möglichkeit der Einarbeitung des Gärrests in den Boden besteht.

Der Düngbedarf wurde als Summe des Stickstoffentzugs der pflanzlichen NAWARO und der unvermeidbaren Stickstoffverluste ermittelt. Die unvermeidbaren Auswaschungsverluste von Stickstoff, die Düngewirksamkeit von organischem Stickstoff sowie die N-Lieferung von Leguminosen wurde basierend auf den Angaben in Wendland (2007: S. 21, 48 und 60) ermittelt. Der organische Stickstoff wurde zu 80 % in der Düngebilanz berücksichtigt. Es wurde weiterhin angenommen, dass die Differenz aus dem düngewirksamen Stickstoff im ausgebrachten Gärrest und dem Düngbedarf durch mineralische Dünger ersetzt wird (außer bei der ökologisch wirtschaftenden Biogasanlage B und bei Anlage F). Da bei der Vergärung die Nährstoffe Kaliumoxid und Phosphat nach Wendland (2008) in voller Höhe erhalten bleiben, wurde kein zusätzlicher Einsatz von mineralischem Kali- und Phosphatdünger unterstellt.

Tab. 7: Berechnungsgrundlage für Ammoniakemissionen auf Ackerland und Grünland

	Ammoniakemissionsstufen				
	Anteile bezogen auf die gesamte Ammoniakfracht im Gärrest bei Ausbringung mit Breitverteiler				
	10%	20%	30%	40%	50%
Anteil der Emissionsstufen auf Ackerland [%]	20	30	25	15	10
Anteil der Emissionsstufen auf Grünland [%]	10	20	30	25	15
Eingesetzte Ausbringtechnik					
Breitverteiler	25%				
Schleppschauch	75%				
Verminderung der Emissionen mit Schleppschauchtechnik					
bezogen auf Emissionen des Breitverteilers	40%				

Basierend auf den Annahmen im Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar (Umweltbundesamt, 2009: S. 365) wurde zugrundegelegt, dass 1,0 % des ausgebrachten Stickstoffs (in Mineraldünger und Gärrest) in Lachgas umgewandelt wird. Die Entfernung zwischen Feld und Silo wurde für alle Anlagen einheitlich auf drei Kilometer festgelegt. Die Masseverluste der NAWARO bei der Lagerung wurde nach KTBL (2008) für Maissilagen mit 13 %, für Getreide-Ganzpflanzsilagen mit 12 %, für Körnersilagen mit 9 % und für Rübensilagen mit 20 % angesetzt.

Betrieb der Biogasanlage. Die Substratzugabe und der Eigenenergieverbrauch, die Biogasproduktion und die Stromproduktion der Anlagen wurden tagesgenau erhoben. Es wurde jeweils berücksichtigt, woher die elektrische Energie für die Biogasanlage bezogen wurde (aus der eigenen Stromproduktion, aus dem Stromnetz oder von einer eigenen kleinen Wasserkraftanlage). Die direkten Emissionen der Biogasanlage wurden in Höhe von 1 % der Biogasproduktion angenommen. Die Anlagen C und F verfügen über eine Gasfackel, hier wurden deshalb reduzierte Emissionen in Höhe von 0,25 % der Biogasproduktion angenommen. Die Emissionen der Blockheizkraftwerke wurden in Einzelmessungen meist baugleicher Biogas-BHKW ermittelt (Aschmann, 2009). Die Leitungsverluste bis zum öffentlichen Stromnetz und die Transformationsverluste auf Mittelspannung wurden mit 1 % des produzierten Stroms angenommen.

Errichtung der Biogasanlage. Da bei der Errichtung einer Biogasanlage die Materialien Beton, Asphalt, Stahl und Ziegel den Energieaufwand bei weitem dominieren, wurde die Stoffstrombilanz für die Errichtung der Biogasanlage auf diese Materialien beschränkt.

Gärrestbehandlung. Fünf der zehn Biogasanlagen verfügten im Untersuchungszeitraum über ein offenes Gärrestlager (Anlagen B, F, H, I, J). Die Methanemissionen aus dem Gärrestlager wurden basierend auf dem in Gärversuchen ermittelten Restgaspotential abgeschätzt. Für die Gärversuche wurde Substrat aus dem Ablauf des Nachgärbehälters in Laborfermentern ohne Zusatz von Inokulum bei 22°C über einen Zeitraum von ca. 60 Tagen vergoren. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die durchschnittliche Temperatur in einem Gärrestlager im Jahresmittel mit 14 bis 15°C jedoch deutlich niedriger liegt. Da der Gärrest vor allem im Winterhalbjahr über längere Zeiträume gelagert wird und unter diesen Umständen die mikrobiologischen Umsetzungsvorgänge verlangsamt werden, wurden die Emissionen aus offenen Gärrestlagern mit 70 % des im Restgaspotentialtest bei 22°C ermittelten Gasertrags festgesetzt. Bei Anlage F findet zwischen Nachgärer und Gärrestlager eine Fest-Flüssig-Trennung statt. Die feste und die flüssige Phase wird

offen gelagert. Für die Berechnungen wurden nur Methanemissionen aus der flüssigen Phase berücksichtigt.

4.9.2.3 Allokationsverfahren

Bei der Biogasproduktion entstehen neben dem Hauptprodukt elektrischer Strom getrennt verwertbare Nebenprodukte (Wärme und Dünger). Diese Nebenprodukte wurden über Gutschriften in der Sachbilanz berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass die genutzte BHKW-Abwärme die Wärmebereitstellung eines Ölheizkessels ersetzte. Eine der Anlagen (Ökobetrieb, B) setzte als Hauptsubstrat Leguminosen ein, so dass Gärrest zur Düngung von Flächen außerhalb des Untersuchungsrahmens eingesetzt werden konnte. Für diesen abgegebenen Dünger wurde eine Gutschrift in Höhe von 80 % der äquivalenten Mineralstickstoffmenge gewährt. Anlage E setzte große Mengen an Wirtschaftsdünger ein, so dass auch hier Gärrest abgegeben werden konnte. Neben der Gutschrift für den abgegebenen Stickstoff erfolgte bei Anlage E auch eine Gutschrift für im Gärrest enthaltenes Phosphat und Kali (jeweils 100 % des mineralischen Äquivalents).

4.9.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung verdeutlicht die möglichen Umweltfolgen, die aus der Sachbilanz resultieren. Die Stoff- und Energieströme wurden im Folgenden den Umweltkategorien Treibhauseffekt und Kumulierter Energieaufwand (KEA) zugeordnet. Dabei wurden alle klimawirksamen Emissionen der Sachbilanz auf kg Kohlendioxidäquivalente umgerechnet und aggregiert (Umrechnungsfaktoren für Methan 21 und für Lachgas 310 kg CO₂-Äquivalente*kg⁻¹).

Für den kumulierten fossilen Energieaufwand wurden alle nichtregenerativen fossilen Primärenergien für Bau und Betrieb der Anlage aufsummiert. Der Rückbau der Anlage und das Materialrecycling wurden nicht berücksichtigt. Fossile Energie wird vor allem verbraucht durch den Dieseleinsatz für die Landmaschinen, den Bezug von elektrischer Energie aus dem öffentlichen Stromnetz für den Anlagenbetrieb sowie für die Herstellung mineralischer Düngemittel. Bei Biogasanlagen korreliert der KEA nicht zwingend mit der Treibhausgasbilanz, da geringe Mengen an stark klimaschädlichen Methan- bzw. Lachgasemissionen die Energiebilanz nicht beeinflussen.

4.9.4 Referenzen

Die Referenzen berücksichtigen alternative Lebenswege für ein- und ausgehende Stoffströme der Biogasanlagen. Elektrische Energie aus Biogas ersetzt Energie aus fossilen Quellen. Nach Bundesministerium für Umwelt (2007) ersetzt Biogasstrom zu 30 % Strom aus Gas- und zu 70 % aus Steinkohlekraftwerken. In diesem Kraftwerksmix wird Strom mit Emissionen in Höhe von 825 g CO_{2,äq}*kWh_{el.}⁻¹ und einem Kumulierten Fossilen Energieaufwand in Höhe von 2,55 kWh*kWh_{el.}⁻¹ erzeugt. Die Ergebnisse werden sowohl mit als auch ohne fossile Referenz dargestellt.

Die Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft in Biogasanlagen verkürzt die Dauer der alternativ notwendigen Lagerung. Die Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern wurden für Rindergülle mit 13,5 %, für Schweinegülle mit 16,3 %, für Schweine- und Rinderfestmist mit 2 % und für Hühnermist mit 2,25 % des jeweiligen Methanertragspotentials festgesetzt (Annahmen übernommen aus: Umweltbundesamt (2009): Tabelle 91ff.). Diese durch die Vergärung vermiedenen Emissionen werden in der Treibhausgasbilanz als Gutschrift berücksichtigt.

4.10 Gärrestuntersuchungen und Erstellung von Nährstoffbilanzen (LfL-Agrarökologie)

Die Probenahme erfolgte teilweise durch die Betreiber zu den von Ihnen gewünschten Terminen, teilweise durch Mitarbeiter der LfL. Daraus resultierte eine unterschiedliche Probenanzahl je Betrieb. Nach Möglichkeit wurden die Proben anlässlich der Entnahme aus dem Gärrestlager vor der landwirtschaftlichen Ausbringung genommen. Auf drei Betrieben wurden Proben von flüssigem und festem Gärrückstand nach Separation gewonnen.

Für neun der Pilotbetriebe wurde nach den Vorgaben der Düngeverordnung vom Januar 2006 ein Nährstoffvergleich auf Flächenbasis für die Kalenderjahre 2006 und 2007 gerechnet. Ein Betrieb lieferte nur unvollständige Daten und konnte daher nicht bilanziert werden. Ziel der Nährstoffbilanzierung war es, einen Überblick über die dem Betrieb bzw. der Fläche zugeführten bzw. abgeführten Nährstoffe zu gewinnen.

4.11 Vorgehen zur vergleichenden Bewertung der Pilot-Biogasanlagen

Aufbauend auf dem umfangreichen Datenpool, der auf den Pilot-Biogasanlagen gewonnen wurde, soll eine vergleichende Bewertung der Leistungsfähigkeit und des Betriebserfolgs der Anlagen erfolgen. Mit der zunehmenden Verbreitung von Biogasanlagen in Deutschland hat die wirtschaftliche Bedeutung der Energiegestehung aus Biogas in der Landwirtschaft sowohl auf betriebs- als auch auf volkswirtschaftlicher Ebene stark zugenommen. Damit rückt die Effizienz der Verfahrenskette der Produktion und Verwertung von Biogas einschließlich ihrer Umweltwirkungen immer stärker in den Vordergrund. Der Vergleich der Biogasbetriebe soll daher (sozio-) ökonomische, umweltbezogene und verfahrenstechnische Aspekte berücksichtigen. Auf Basis dieses Vergleichs sollen die unter diesen Aspekten am besten zu bewertenden Pilot-Biogasanlagen identifiziert und zu „Demonstrationsanlagen“ gekürt werden. Diese Anlagen sollen damit als empfehlenswerte Beispiele für investitionswillige Landwirte und für Beratungszwecke bekannt gemacht werden.

Die betrieblichen Rahmenbedingungen und die Technik von Biogasanlagen stellen sich in der Praxis außerordentlich vielfältig dar. Um bei dieser Vielfalt überhaupt einen zuverlässigen Vergleich unterschiedlicher Anlagen zu ermöglichen, mussten zunächst die Prozesskette modelliert und eindeutige Kennzahlen formuliert werden (s. hierzu Abschn. 4.3 und insbesondere Strobl & Keymer, 2009). Umfangreiche Arbeiten zu möglichen Kennzahlen wurden auch von Schöftner et al. (2007) vorgelegt. Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wurden Überlegungen zur Auswahl geeigneter Kennzahlen für einen Vergleich der Bayerischen Pilotanlagen angestellt und eine Methodik zur Bestimmung einer Rangfolge entwickelt, die bei der nächsten Sitzung des Fachbeirates zur Anwendung kommen soll.

Für die Bewertung wurden die drei Kategorien „Anlageneffizienz“, „Umweltbezug“ und „Sozio-Ökonomie“ festgelegt. Die Kategorie „Anlageneffizienz“ wurde in die zwei Bereiche Biogasproduktion und Biogasverwertung unterteilt. Jede Kategorie bzw. jeder Bereich wurde mit zwei Kennzahlen bewertet, so dass insgesamt acht Kriterien berücksichtigt wurden. Das so entstandene Bewertungssystem ist in Abb. 32 dargestellt.

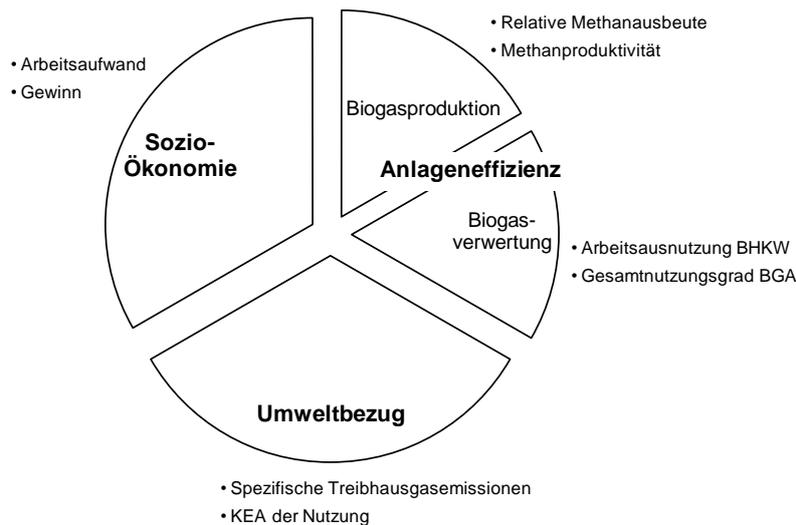


Abb. 32: Entwurf eines Bewertungskatalogs für die Pilotanlagen

Die direkte Bestimmung einer Rangfolge aller zehn Pilot-Biogasanlagen nur auf Basis einer Tabelle der jeweils acht Kennwerte ist wenig erfolgversprechend und nicht reproduzierbar. Die Einzelwertungen sollten daher zu einer Gesamtbewertung aggregiert werden. Hierzu müssen für die einzelnen Kenngrößen Wichtungsfaktoren ermittelt werden. Im einfachsten Fall, wie ihn Abb. 32 suggeriert, würden alle drei Kategorien dieselbe Gewichtung erfahren, ebenso würden die Kenngrößen in den einzelnen Kategorien jeweils gleich gewichtet.

Diese Gleichgewichtung wird der Realität jedoch nicht gerecht und berücksichtigt nicht die unterschiedliche Belastbarkeit der verwendeten Kenngrößen. Um Wichtungsfaktoren zu bestimmen, sollte daher auf Expertenwissen zurückgegriffen werden. Hierfür wurde die Methode des AHP (Analytischer Hierarchie-Prozess) ausgewählt, die es erlaubt, einen komplizierten Entscheidungsprozess auf einzelne paarweise Vergleiche zurückzuführen. Hierbei werden jeweils nur zwei Alternativen einander gegenübergestellt und der Experte bewertet, welche der beiden Alternativen aus seiner Sicht die größere Bedeutung für die jeweilige Fragestellung hat und wie stark die Ausprägung dieses Bedeutungsunterschiedes ist. Um die qualitative Einschätzung des Experten in einen Zahlenwert umzuwandeln, wurden in der Literatur verschiedene Skalen vorgeschlagen. Für die vorliegende Anwendung die Skala nach Saaty (1986) verwendet (Tab. 8).

Tab. 8: Skala für paarweise Vergleiche nach Saaty (1986)

Ausprägung	Bezeichnung	Erläuterung
		Im direkten Vergleich der beiden Kriterien hinsichtlich der Bedeutung für den Betriebserfolg bzw. die Effizienz einer Biogasanlage...
1	Gleiche Bedeutung	... sind beide von gleicher Bedeutung.
3	Geringe Bedeutung	... erscheint das erste Kriterium von etwas größerer Bedeutung.
5	Große Bedeutung	... erscheint das erste Kriterium von eindeutig größerer Bedeutung.
7	Sehr große Bedeutung	... ist das erste Kriterium nachgewiesenermaßen von größerer Bedeutung.
9	Extrem große Bedeutung	... ist das erste Kriterium eindeutig dominant.

Auf Basis insgesamt acht paarweiser Vergleiche können nun Wichtungsfaktoren für alle acht Kenngrößen ermittelt werden. Hierzu wird entsprechend Abb. 32 so vorgegangen, dass zunächst die drei Kategorien Anlageneffizienz, Umweltwirkung und Sozio-Ökonomie hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Betriebserfolg einer Biogasanlage miteinander verglichen werden. Dies erfordert drei paarweise Vergleiche, nämlich den Vergleich Anlageneffizienz versus Sozio-Ökonomie bzw. Umweltwirkung sowie den Vergleich Sozio-Ökonomie versus Umweltwirkung. Beispielsweise lautet die erste Frage: „Ist für den Betriebserfolg einer Biogasanlage die Anlageneffizienz oder die Umweltwirkung von größerer Bedeutung und wie ausgeprägt ist ggf. dieser Bedeutungsunterschied?“

Im zweiten Schritt wird die Bedeutung der Biogasproduktion und der Biogasverwertung für die Anlageneffizienz gegeneinander abgewogen (ein Vergleich). Im dritten Schritt werden schließlich jeweils die beiden einschlägigen Kenngrößen gegeneinander abgewogen (drei Vergleiche). Durch Mittelung der subjektiven Einschätzung mehrerer Experten können dann in objektiver Weise Wichtungsfaktoren errechnet werden, die eine breite Wissensbasis abbilden. Die Rangfolge der Pilotanlagen auf Basis des Betriebserfolgs wird vom Fachbeirat Biogas der LfL ermittelt werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

Dieser Bericht konzentriert sich auf die Darstellung des Betriebserfolgs der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen über die Dauer der wissenschaftlichen Begleitung, und zwar überwiegend anhand grundlegender Parameter der deskriptiven Statistik. Eine vertiefte Diskussion des Betriebsverlaufs und der Effekte von Maßnahmen zur Stabilisierung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Biogasprozesses einzelner Pilotanlagen findet sich im Abschlussbericht zum Projekt „Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen“ (Lehner et al., 2009).

Es wird zunächst ausführlich auf die verfahrenstechnischen Kenngrößen eingegangen, die der Hauptgegenstand dieser Untersuchungen sind. Anschließend wird in knapper Form die technische Zuverlässigkeit der Pilotanlagen betrachtet. Es folgen die Ergebnisse der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen aus der Stromproduktion in den Bayerischen Biogas-Pilotanlagen. Abschnitt 5.3 widmet sich der Beschaffenheit der Gärreste aus den Biogasanlagen und der Nährstoffbilanz der Pilotbetriebe.

5.1 Verfahrenstechnische Kennzahlen der Pilot-Biogasanlagen

Die verfahrenstechnischen Kennzahlen der Pilotanlagen wurden jeweils über den gesamten Zeitraum der Datenerfassung ermittelt. Die Definitionen der Kennzahlen finden sich im Glossar am Ende dieses Berichts. Wurden an einer Anlage bedeutende bauliche Änderungen vorgenommen, so erfolgte die Auswertung für den Zeitraum vor und nach der Änderung getrennt. Auswertungstechnisch liegen in diesem Fall quasi zwei Anlagen vor. Hieraus und aus der Tatsache, dass die Datenaufnahme nicht zum selben Zeitpunkt auf allen zehn Anlagen begonnen werden konnte, resultieren für die einzelnen Anlagen Beobachtungszeiträume von 200 bis 865 Tagen (Tab. 9).

Tab. 9: Dauer der Beobachtungszeiträume für die Ermittlung der verfahrenstechnischen Kennzahlen der Pilotanlagen

ID	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Dauer, d	639	672	365	305	865	793	823	609	200	488	640	609

*) Baulich geänderte Anlage

5.1.1 Kenngrößen der Biogasproduktion

Die Bilanzgruppe „Biogasproduktion“ umfasst den Verfahrensabschnitt von der Beschickung der Eintragsvorrichtung bis zur Übergabe des Biogases an die gasverwertende Einheit (vgl. Abb. 6).

5.1.1.1 Einsatzstoffe

Wie bereits in Abschnitt 4.5 erwähnt, kamen in zwei der zehn Anlagen während der Projektlaufzeit regulär überhaupt keine tierischen Exkrememente zum Einsatz (D und H/H*), in zwei Anlagen (C/C*) nur gelegentlich bzw. in geringen Mengen. In vier Anlagen wurden tierische Exkrememente aus dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb verwertet (B, E, G und J). Die restlichen drei Anlagen setzten Gülle bzw. Mist von anderen Betrieben ein.

5.1.1.2 Eintragsmenge

Wie aus Tab. 4 hervorgeht, wurde die Menge der Einsatzstoffe auf drei Anlagen am Beschicker und auf sieben Anlagen an der Eintragsvorrichtung erfasst. Abhängig von der Anlagengröße und der Auswahl der Einsatzstoffe mit unterschiedlichem TM-Gehalt ergibt sich für die Pilotanlagen ein Substrat-Eintrag von im Mittel 10,5 bis 27,2 t pro Tag (Abb. 33). Der Verlauf des Substrat-Eintrags für die einzelnen Anlagen auf Basis von Wochensummen ist in Anhang 4 dargestellt.

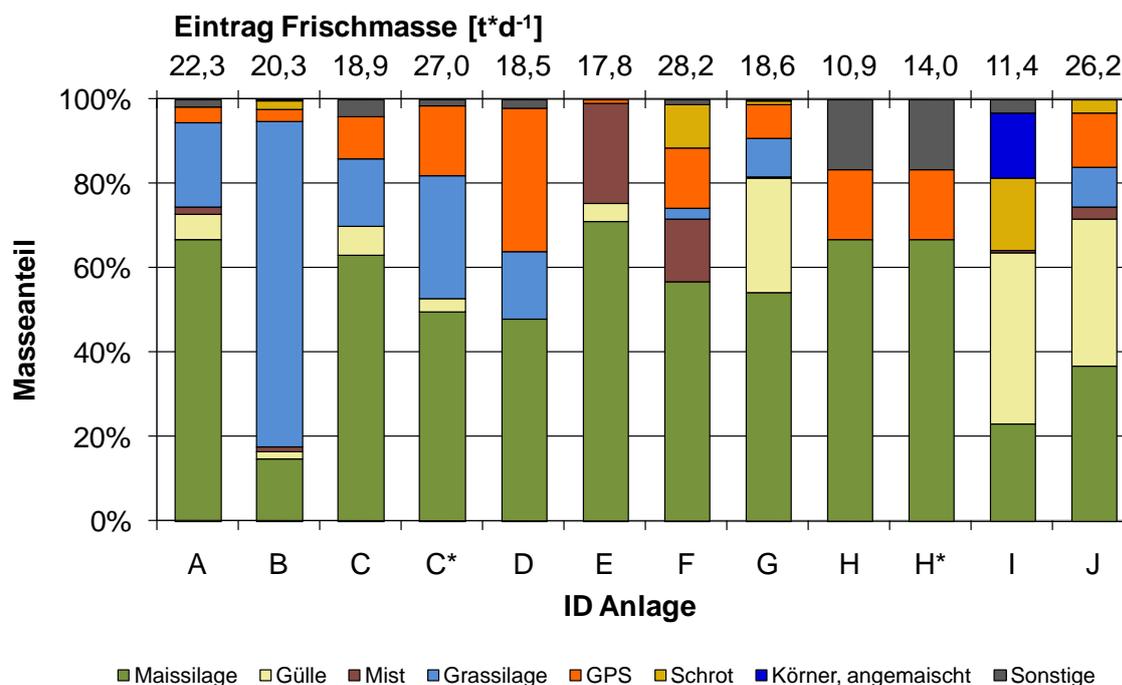


Abb. 33: Auswahl, mittlere Masseanteile und mittlere Eintragsrate der Einsatzstoffe (Substrate) auf den Pilotanlagen

5.1.1.3 Zusammensetzung der Einsatzstoffe

An dieser Stelle werden die häufigsten Substrate, die auf den Pilotanlagen zum Einsatz kamen, anhand grundlegender chemischer Parameter charakterisiert. Für die Darstellung wurden diese in die Gruppen Maissilage, Grassilage, GPS, Getreidekörnerschrot, Gülle und Mist eingeteilt. Daten zur Zusammensetzung aller eingesetzten Substrate für jede Anlage finden sich im Anhang 5. Der durchschnittliche TM-Anteil der Substratration der einzelnen Pilotanlagen lag zwischen ca. 24 und 43 %, der durchschnittliche oTM-Anteil zwischen ca. 23 und 39 % (Tab. 10).

Tab. 10: Durchschnittlicher TM- und oTM-Anteil in der Substratration der Pilotanlagen in Prozent der Frischmasse

ID	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
TM	25,7	27,4	26,4	n.v.	30,0	43,4	42,1	24,2	25,8	n.v.	30,7	26,5
oTM	24,4	25,2	24,8	n.v.	28,5	38,7	39,4	22,6	23,8	n.v.	29,2	24,6

Die **Maissilage**, die auf den Pilotanlagen beprobt wurde, hatte im Mittel einen TM-Gehalt von ca. 27 bis 34 % (Abb. 34). Den im Mittel geringsten TM-Gehalt wiesen hierbei die Proben von Anlage H auf, wobei zu berücksichtigen ist, dass hier teilweise Maissilage gemeinsam mit Sudangras einsiliert wurde. Die größte Streuung des TM-Gehaltes zeigten die Proben von Anlage I. Auf dieser Anlage wurde teilweise angekaufte Maissilage eingesetzt und es war kein Fahrsilo zur ordnungsgemäßen Einlagerung des Materials vorhanden.

Hinsichtlich des mittleren σ TM-Gehaltes, gemessen am Glühverlust, zeigten die Maissilageproben mit Werten zwischen 95,5 und 96,8 % keine Auffälligkeiten (Abb. 35). In den Proben von Anlage B und C war jedoch die Streuung nach unten erweitert, was auf eine fehlerhafte Probenahme hindeuten könnte.

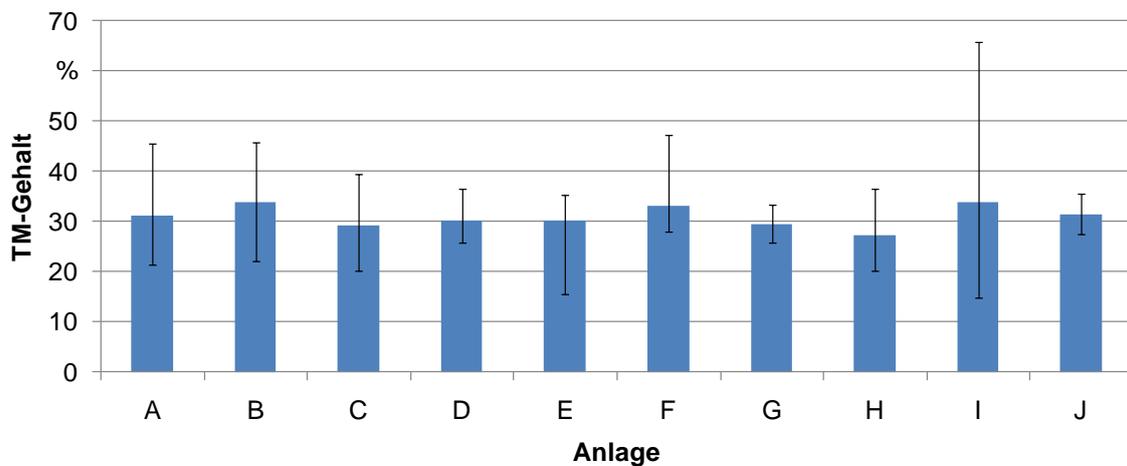


Abb. 34: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Maissilage

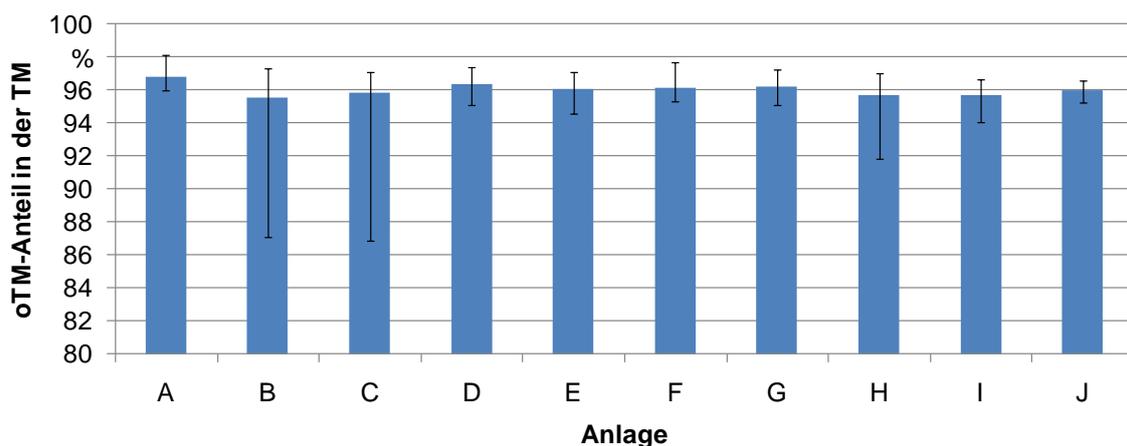


Abb. 35: σ TM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Maissilage

Die **Grassilage**, die auf den Pilotanlagen beprobt wurde, hatte im Mittel einen TM-Gehalt von ca. 24 bis 29 % für sieben Anlagen und auffällig hohen 40 % für eine weitere Anlage (J). Die Streuung der Ergebnisse war für die Anlagen A und J auffällig groß (Abb. 36). Beim oTM-Gehalt fielen nur die Proben von Anlage F mit etwas geringeren Werten auf (Abb. 37).

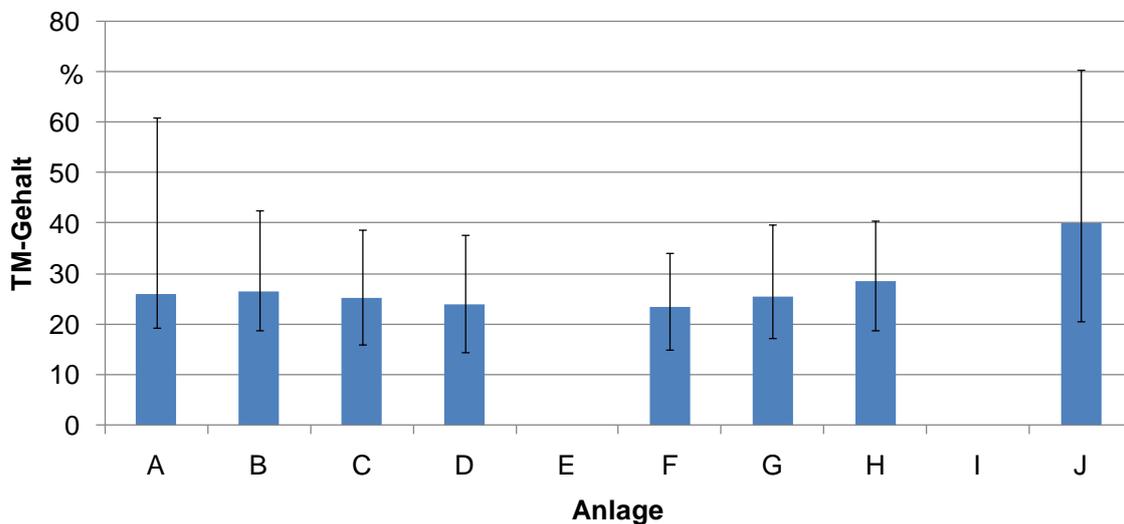


Abb. 36: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Grassilage

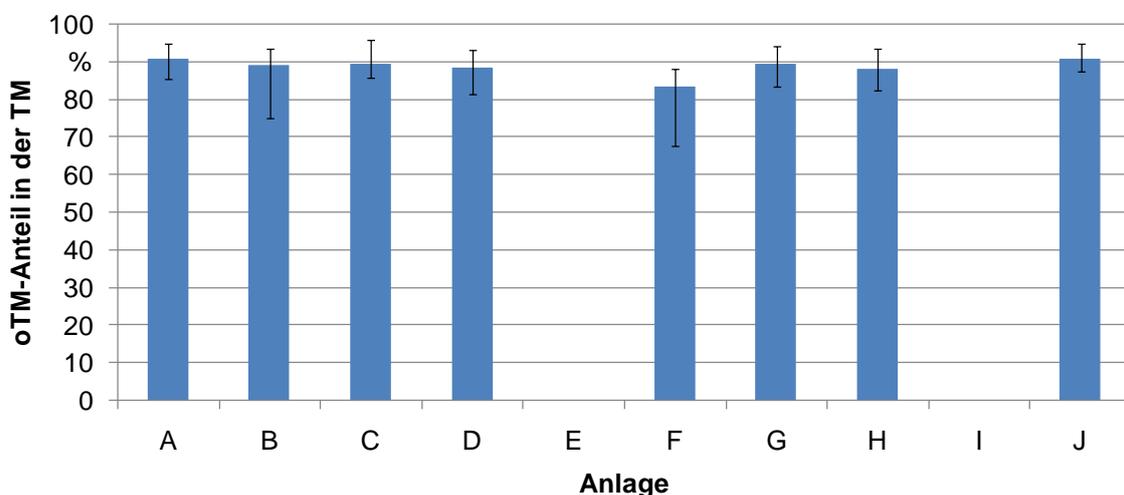


Abb. 37: oTM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Grassilage

Bei den **GPS**-Proben fielen die Ergebnisse naturgemäß sehr viel uneinheitlicher aus, da hier unterschiedliche Pflanzen zum Einsatz kamen (siehe Tab. 3). Die Mittelwerte des TM-Gehaltes lagen hier zwischen 20 und 35 % (Abb. 38). Die geringsten Werte wies die Grünroggen-GPS auf Anlage A auf. Die höchsten mittleren TM-Gehalte wurden auf den Anlagen J (Weizen) und F gemessen. Anlage E setzte nur über einen sehr kurzen Zeitraum

zugekaufte GPS ein, die lediglich zweimal beprobt wurde. Diese Proben fallen durch im Vergleich etwas geringere oTM-Gehalte auf (Abb. 39).

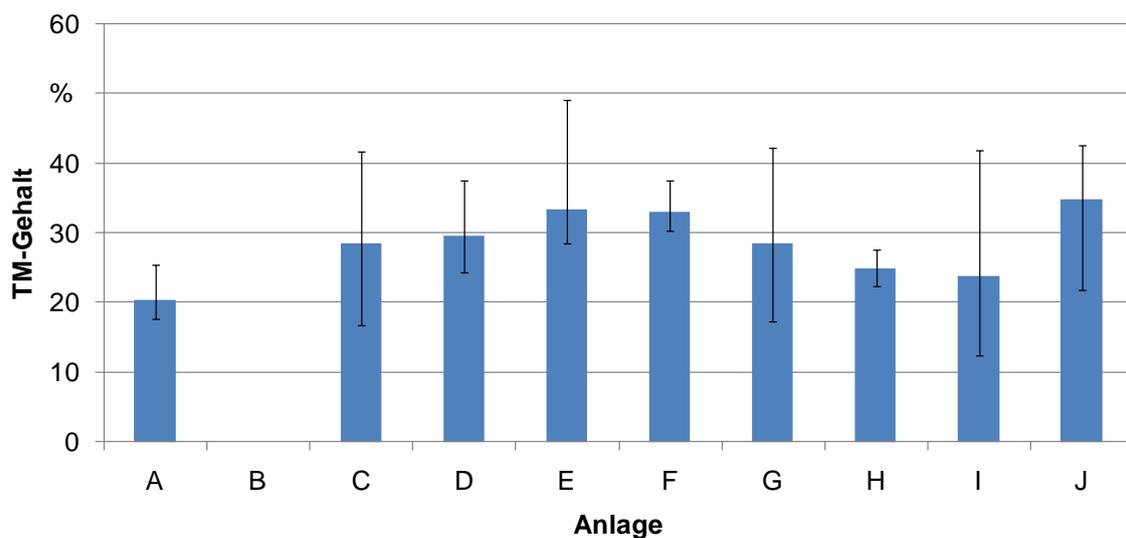


Abb. 38: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von GPS

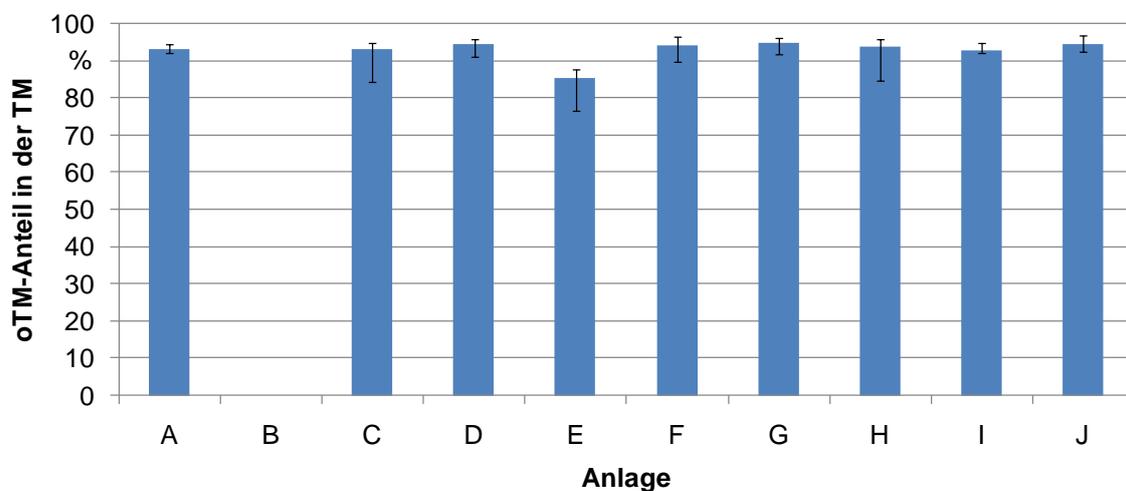


Abb. 39: oTM-Anteil in der TM (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von GPS

Getreidekörnerschrot wurde nur auf drei Anlagen in größeren Mengen eingesetzt (Abb. 40). In dieser Darstellung nicht enthalten sind die Analysen von Proben aus dem Feuchtsilo der Anlage I, wo Körnerschrot in angemischter Form eingelagert wird.

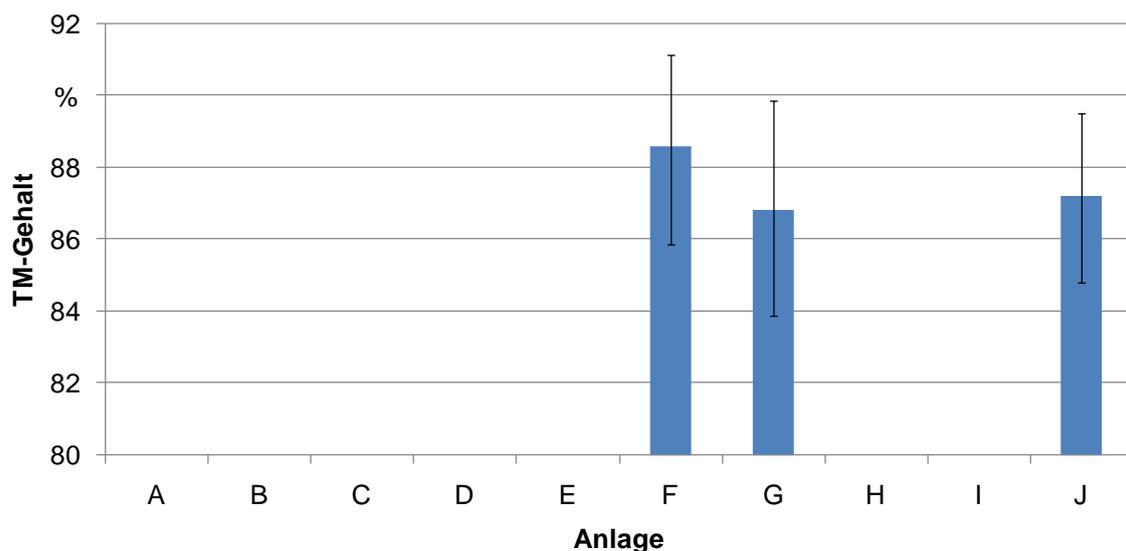


Abb. 40: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Getreidekörnerschrot

Gülle als Einsatzstoff wurde auf insgesamt fünf Anlagen beprobt, wobei auf Anlage C nur eine Probe entnommen wurde, als ein Hauptgärbehälter nach einer Prozessdestabilisierung entleert und mit Gülle neu angefahren wurde. Regulär wurde auf dieser Anlage keine Gülle eingesetzt. Die Gülleproben von den Anlagen mit regelmäßigem Gülleinsatz wiesen mittlere TM-Gehalt von 5,5 bis 8,8 % auf (Abb. 41). Die größte Streuung zeigten die Proben von den Anlagen G und A, da diese Proben aus der Vorgrube entnommen wurden, welche in diesen Fällen auch Niederschlagswasser von den Verkehrs- und Siloflächen fasste. Bei Anlage I und J wurde die Gülle direkt beprobt, Im Falle der Anlage I stammte diese von verschiedenen Lieferanten.

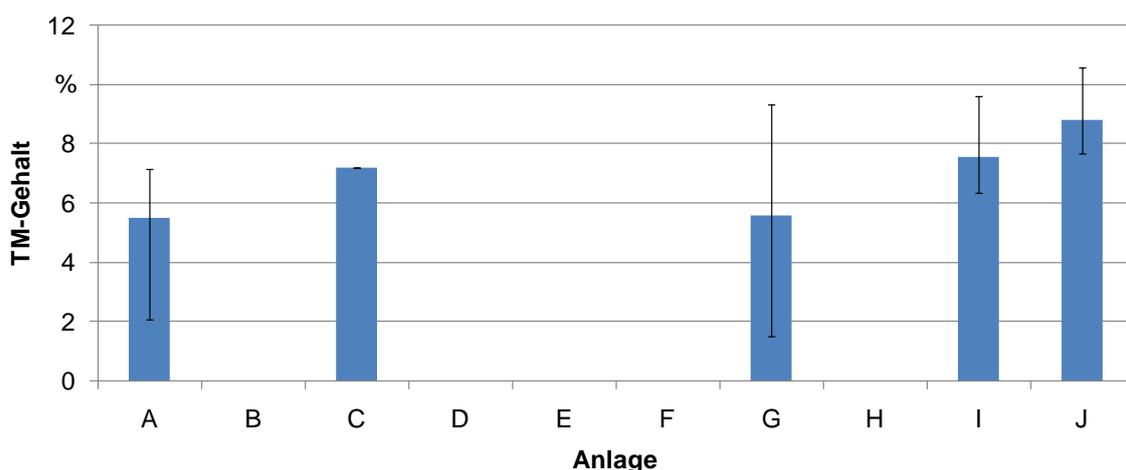


Abb. 41: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Gülle

Auf den Pilotanlagen kamen zwei Arten von **Festmist** zum Einsatz. Auf den Anlagen A, B und G wurde Rindermist mit einem mittleren TM-Gehalt von ca. 22 bzw. 25 % verwertet (Abb. 42). Die Geflügelkot-Proben von Anlage A, E und F lagen zwar mit Mittelwerten

von ca. 56 bis 57 % TM sehr nah beieinander, wiesen jedoch im Falle der Anlagen A und E eine große Streuung auf. Hier spiegelt sich die Schwierigkeit wieder, dieses sehr heterogene Material repräsentativ zu beproben. Rinder- und Geflügelmist wiesen erwartungsgemäß einen deutlichen Unterschied im N-Gehalt auf (Abb. 43).

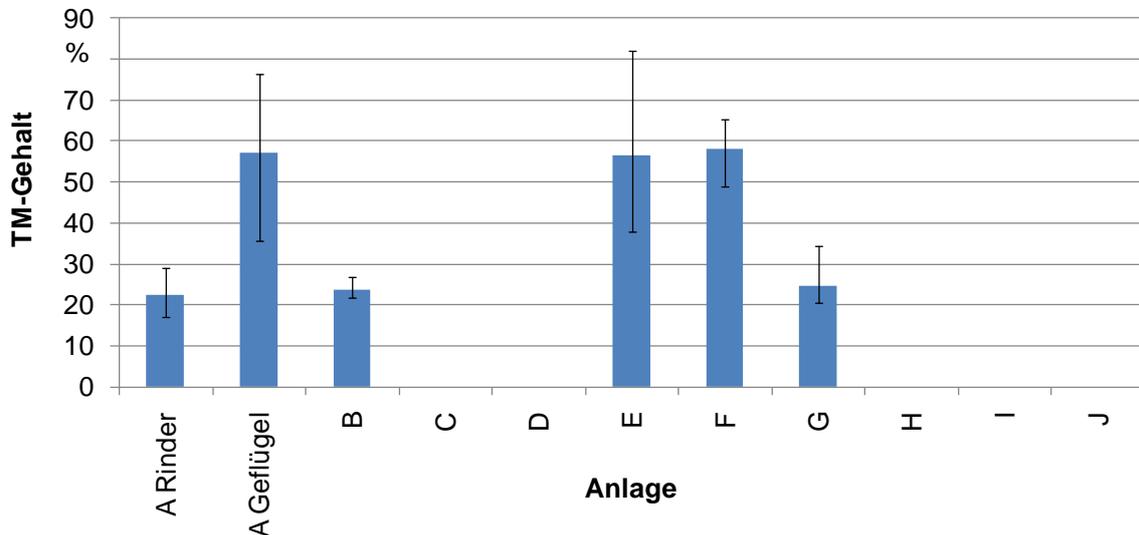


Abb. 42: TM-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Rindermist und Geflügelkot

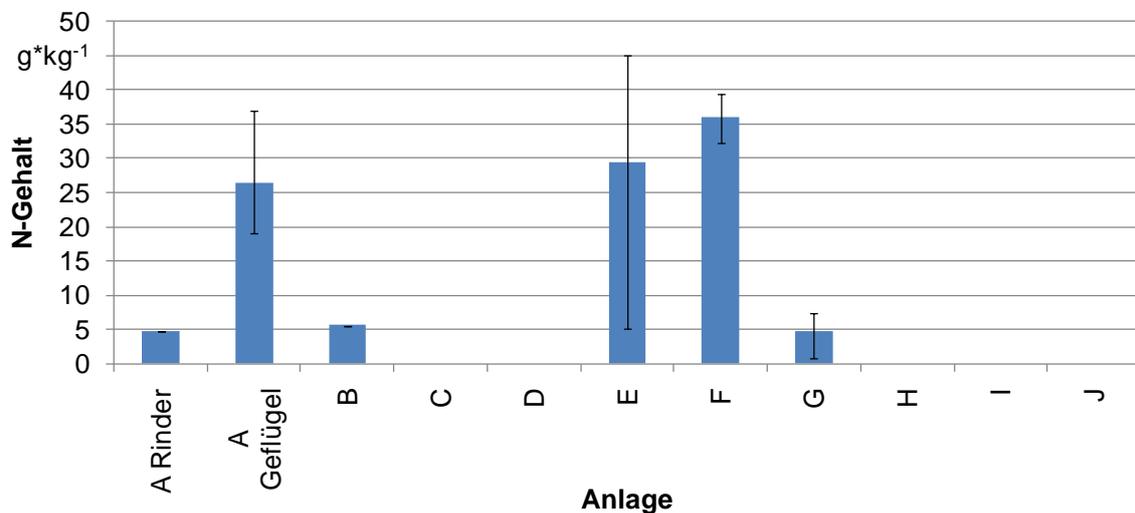


Abb. 43: N-Gehalt (Mittelwert und Streuung) der auf den Pilotanlagen gewonnenen Proben von Rindermist und Geflügelkot

5.1.1.4 Zusammensetzung des Gärgemisches

Die Mittelwerte des TM-Gehaltes in den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen überraschten insofern, als die höchsten Werte keineswegs den liegenden Fermentern vorbehalten waren (Abb. 44). Die mit Abstand höchsten TM-Gehalte von im Mittel 13,7 % wurden im Hauptgärbehälter der Anlage B gemessen, der liegende Fermenter der Anlage H erreichte den zweithöchsten Wert mit 10,5 %. Von den übrigen acht Anlagen zeigten nur zwei (C

und I) TM-Gehalte im Hauptgärbehälter von weniger als 8 %. Anlage I wies die Besonderheit auf, dass der Vorgärbehälter bei einem sehr hohen mittleren TM-Gehalt von 16,7 % betrieben wurde, während im Hauptgärbehälter der TM-Gehalt auf im Mittel 6,2 % reduziert war. Den höchsten mineralischen Anteil (gemessen als Glührückstand) an der Trockenmasse wies das Gärgemisch in Anlage B auf (Abb. 44).

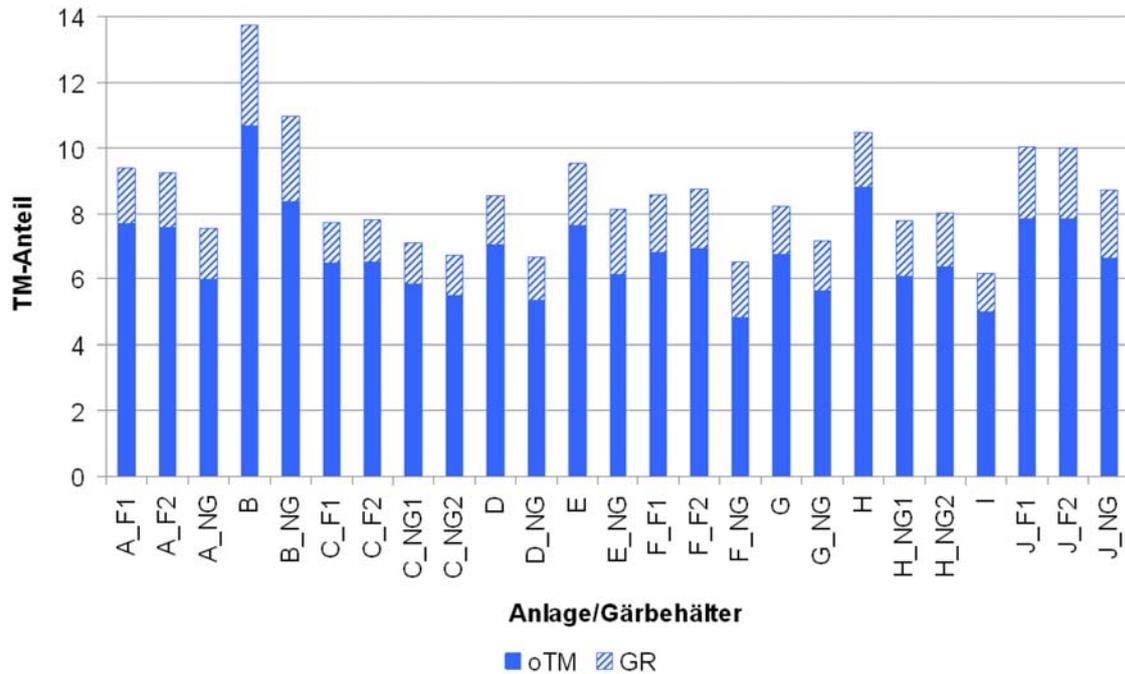


Abb. 44: Mittlerer TM-Anteil (Masse-%) als Summe der oTM und des Glührückstands (GR) in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen

5.1.1.5 Raumbelastung

Die Raumbelastung ist eine gängige Kenngröße für Reaktoren in der biologischen Verfahrenstechnik und ist dabei in hohem Maße abhängig von den Substrateigenschaften und dem gewählten Verfahren. Zum Vergleich der Pilotanlagen wurden in Abb. 45 jeweils die Mittelwerte der Gesamt-Raumbelastung (d. h. bezogen auf den gesamten nutzbaren Gärraum) und der Hauptgärbehälter-Raumbelastung (d. h. bezogen auf das Nutzvolumen der ersten Prozessstufe) gegenüber gestellt. Hierbei ist anzumerken, dass für Anlage J die Schwankungsbreiten nicht verfügbar sind.

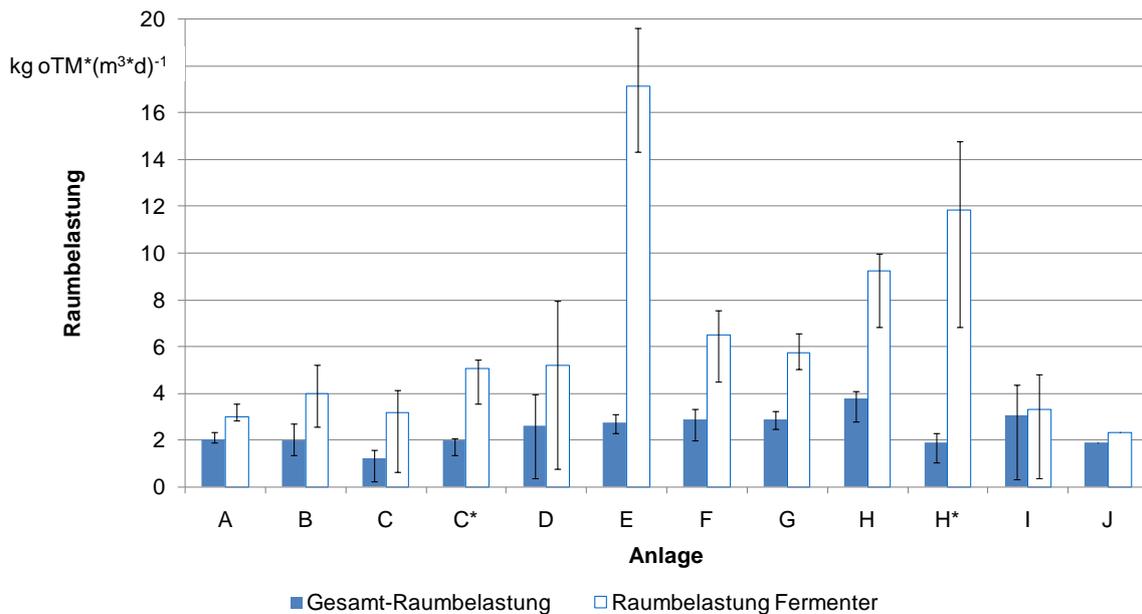


Abb. 45: Raumbelastung (Mittelwert und Streuung der Monatsmittelwerte) der Pilotanlagen, jeweils für den/die Hauptgärbehälter und den gesamten Gärraum

In dieser Darstellung fallen die Anlagen E und H durch die auffällig hohe Raumbelastung der liegenden Fermenter auf (Abb. 45). Für den Vorgärbehälter (Hydrolysestufe) der Anlage I ergibt sich eine Raumbelastung von $33,2 \text{ kg oTM} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Die deutlichen Unterschiede relativieren sich bei Betrachtung der Gesamt-Raumbelastung, die über alle Anlagen hinweg eine Streuung von $1,2$ bis $3,8 \text{ kg oTM} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ aufweist. Ein großer Schwankungsbereich der Raumbelastung mit sehr geringen Minimalwerten, wie er für die Anlagen C, D und I erkennbar ist, deutet auf eine zeitweise stark reduzierte Beschickung und damit potentiell auf prozessbiologische Probleme hin.

5.1.1.6 Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit in einem Reaktor ist umgekehrt proportional zur Raumbelastung und dem oTM-Gehalt im Substratmix. Auch hier fallen daher die Anlagen C, D und I durch eine hohe Schwankungsbreite der hydraulischen Verweilzeit im Hauptgärbehälter auf (Abb. 46; die Streuung der Gesamt-Verweilzeit ist hier aus Gründen der Lesbarkeit nicht dargestellt).

Weiteren Aufschluss über die Betriebsweise der Anlagen gibt der Vergleich der hydraulischen Verweilzeit ohne und mit Rezirkulation (Abb. 47). Hohe Rezirkulationsraten wiesen die Anlagen E, F, G, H und I auf. In Anlage E wurde täglich ca. ein Viertel des Nettovolumens des Hauptgärbehälters zurückgeführt (d. h. die hydraulische Verweilzeit betrug hier lediglich ca. vier Tage). Dieses Verfahren diente zum einen der Verdünnung des Gärgemisches, zum anderen wurde in diesem Gärbehälter auf diese Weise die hydrolytische und Säurebildungs-Phase begünstigt. Der Fermenterablauf enthielt hohe Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren, v. a. Essigsäure, die im großzügig dimensionierten Nachgärbehälter effektiv zum Methan umgesetzt werden konnten.

Im Falle der Anlagen F, G und H diente die Rezirkulation hauptsächlich der Begrenzung des TM-Gehaltes des Fermenterinhalt. Im Falle der Anlage I diente die Rezirkulation von Gärrest hauptsächlich der Regulierung des pH-Wertes im Vorgärbehälter (Hydrolysestufe). Für diesen ergibt sich eine hydraulische Verweilzeit von $4,85 \text{ d}$. In den

Anlagen C/C* und D fand keine Rezirkulation statt, für Anlage A wurden nur gelegentlich geringe Mengen an Rezirkulat dokumentiert.

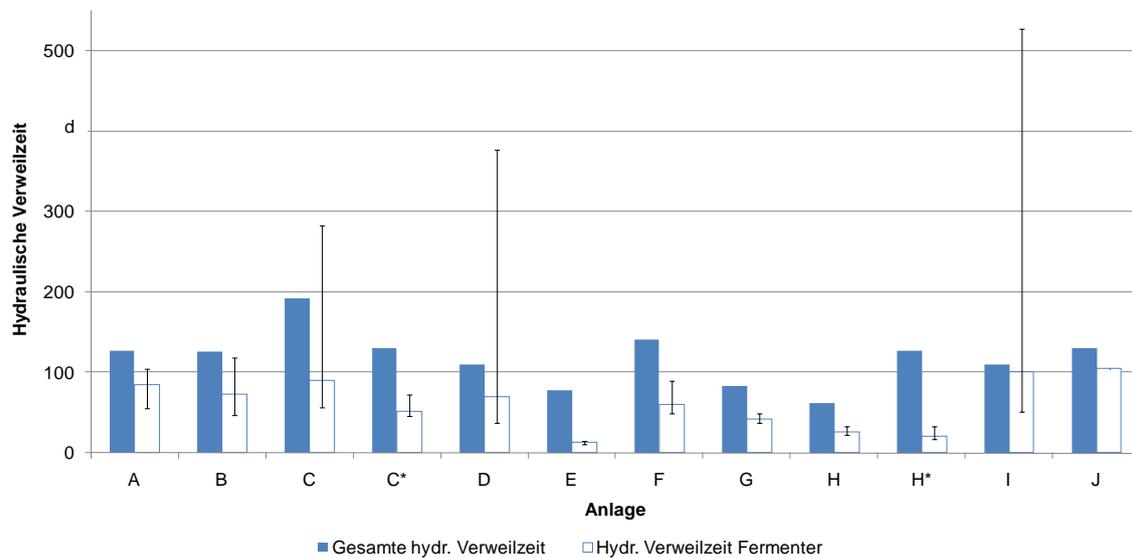


Abb. 46: Hydraulische Verweilzeit der Pilotanlagen, jeweils für die erste Stufe (Mittelwert und Streuung; ohne Berücksichtigung der Rezirkulation) und den gesamten Gärraum (Mittelwert)

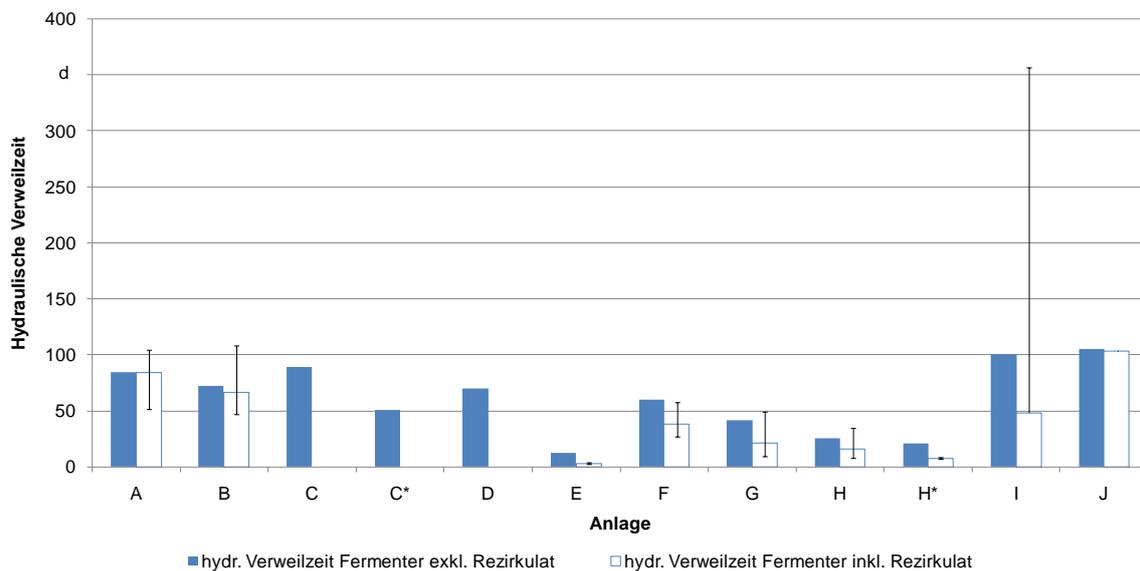


Abb. 47: Mittelwerte der hydraulischen Verweilzeit in der ersten Stufe der Pilotanlagen, ohne und ggf. mit Berücksichtigung der Rezirkulation

5.1.1.7 Prozesstemperatur

Die Temperatur im Gärgemisch, die durch Beheizung geregelt wird, beeinflusst wesentlich die Geschwindigkeit der Abbaureaktionen. Die Temperatur in den Gärbehältern wirkt sich naturgemäß auf den Heizwärmebedarf der Biogasanlage aus (s. Abschn. 5.1.2.5). Die Mehrzahl der Pilotanlagen wies im Hauptgärbehälter eine Prozesstemperatur zwischen 40

und 43°C auf (Abb. 48). Nach mikrobiologischer Klassifizierung entspricht dies dem oberen Ende des Wachstumsbereichs der sogenannten mesophilen Mikroorganismen. Zwei der Anlagen (D und H) wurden im thermophilen Temperaturbereich oberhalb von 50°C betrieben. Anlage J lag mit 45-46°C auf einem Temperaturniveau, das in der Praxis eher selten vertreten ist (vgl. Hölker, 2009).

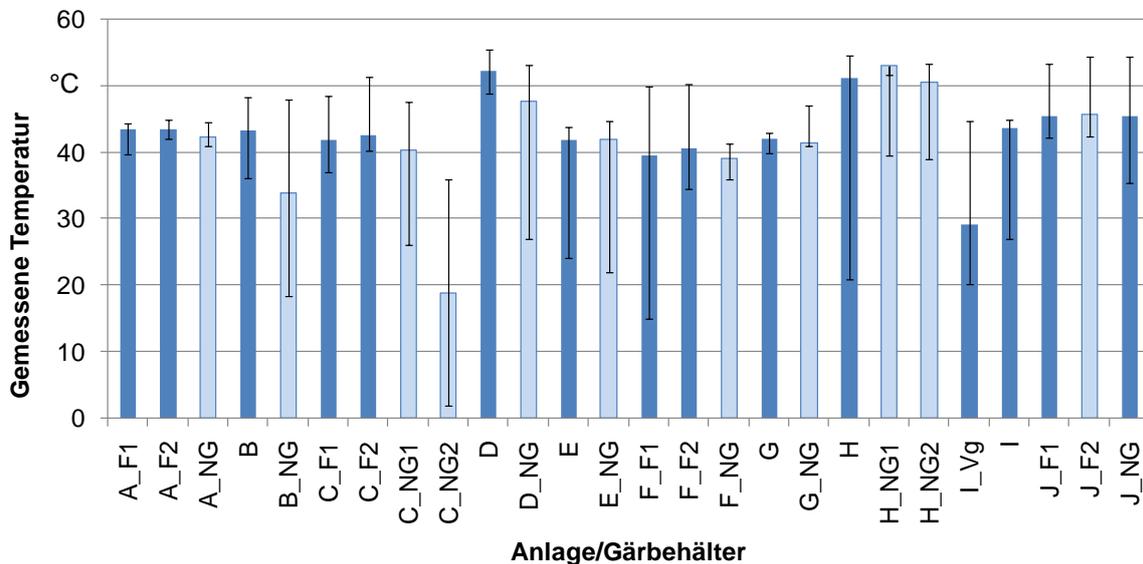


Abb. 48: Gemessene Temperaturen (Mittelwert und Streuung) in den einzelnen Gärbehältern der Pilotanlagen (hell ausgefüllte Säulen: Temperaturen in Nachgärern)

Mit Ausnahme der Anlagen B, C und D wurden Haupt- und Nachgärbehälter auf demselben Temperaturniveau betrieben. Bei einzelnen Anlagen (B, C, F und H) fällt die große Streuung der gemessenen Temperaturen auf, die unterschiedliche Gründe hatte (Abb. 48): Der Nachgärbehälter von Anlage B wurde praktisch nicht beheizt und zeigte daher saisonbedingte Temperaturschwankungen – noch mehr der nicht wärmegeämmte zweite Nachgärbehälter der Anlage C. Fermenter 1 der Anlage F wurde hingegen im Rahmen einer Revision entleert. Bei Anlage C und F kam es nach mehreren aufeinander folgenden heißen Tagen zu einer Überhöhung der Fermentertemperatur und einer daraus folgenden Beeinträchtigung der Prozessstabilität. Die Hauptgärbehälter der Anlage F wurden daraufhin durch Zumischen von Wasser gekühlt. Im Vorgärbehälter der Anlage I (I_Vg) wurde eine mittlere Temperatur von 29°C gemessen bei einer großen Streuung von 20 bis 45°C. Hierbei war ein saisonaler Einfluss deutlich erkennbar.

5.1.1.8 Betrieb des Feststoffeintrags

Eine möglichst gleichmäßige Belastung des Gärprozesses ist umso bedeutsamer, je mehr schnell abbaubare Komponenten die Einsatzstoffe enthalten. Da automatische Dosierer auf Biogasanlagen mittlerweile Stand der Technik sind, lässt sich die Häufigkeit des Feststoffeintrags flexibel einstellen. Üblicherweise ist bei überwiegendem Einsatz von Silagen eine Eintragshäufigkeit von 12-24 pro Tag ausreichend. Als einzige der Pilotanlagen arbeitete Anlage F mit einer deutlich höheren Eintragshäufigkeit (Tab. 11).

Tab. 11: Übersicht über Einstellungen des Feststoffeintrags der Pilotanlagen (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte der Eintragshäufigkeit pro Tag)

ID	A	B	C_F1	C_F2	D	E	F_F1	F_F2	G	H	I	J_F1	J_F2
MW	24	12,2	11,3	10,3	35,7	19,9	259	237	36,1	k.A.	k.A.	23,9	26,6
Min	24	12	1	1	24	0	72	37	31			5	1,9
Max	24	24	14,5	19	48	24	720	929	41			24	240

5.1.1.9 Betrieb der Rührwerke

In der Beratungspraxis wird häufig die Frage nach den optimalen Parametern für den Rührwerksbetrieb gestellt. Eine Übersicht über die Laufzeiten der Rührwerke in den Pilotanlagen gibt Tab. 12. Die Angabe der Streuung der Einstellungen kann zusätzlich als Anhaltspunkt für einen Optimierungsbedarf bzw. Schwierigkeiten mit der Durchmischung während des Beobachtungszeitraums dienen.

Tab. 12: Übersicht über Laufzeit-Einstellungen der Rührwerke der Pilotanlagen (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte der Rührzeit in Minuten je Stunde)

ID Anlage		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
F1/	MW	28	60	9	25	60	60	22	60		11
Rührwerk 1	Min	18	60	4	0	60	60	13	60		4
	Max	49	60	13	45	60	60	45	60		60
F1/	MW	23	-	9	-	-	-	-	-		-
Rührwerk 2	Min	23	-	4	-	-	-	-	-		-
	Max	23	-	13	-	-	-	-	-		-
F2/	MW	28	-	8	-	-	60	-	-		8
Rührwerk 1	Min	16	-	4	-	-	60	-	-		3
	Max	60	-	13	-	-	60	-	-		60
F2/	MW	22	-	8	-	-	-	-	-		-
Rührwerk 2	Min	22	-	4	-	-	-	-	-		-
	Max	22	-	13	-	-	-	-	-		-
NG 1/	MW	18	16	5	13	60	16	13	14		7
Rührwerk 1	Min	12	3	3	0	60	13	10	14		0
	Max	25	60	5	30	60	40	15	14		10
NG 1/	MW	18	n.v.	5	-	n.v.	-	-	14		-
Rührwerk 2	Min	12	n.v.	3	-	60	-	-	14		-
	Max	25	n.v.	5	-	30	-	-	14		-
NG 2	MW	-	-	5	-	-	-	-	10		-
	Min	-	-	4	-	-	-	-	10		-
	Max	-	-	5	-	-	-	-	14		-
Gärrestlager	MW	18	7	3	-	n.v.	n.v.	4	n.v.	n.v.	n.v.

MW: Mittelwert; F: Hauptgärbehälter; NG: Nachgärbehälter; n.v.: nicht verfügbar

Einheitliche Verhältnisse herrschten bei den Haspelrührwerken in den liegenden Fermentern der Anlagen E, F und H, welche allesamt kontinuierlich betrieben wurden (Tab. 12). Bei den hohen TM-Gehalten, die in diesen Fermentern herrschen, würde sich nach Abschalten des Rührwerks das Gärmedium zunächst aufblähen und dann entmischen, so dass es bereits nach wenigen Stunden nicht mehr aufgerührt werden könnte.

Ebenfalls kontinuierlich in Betrieb war das Zentralrührwerk im Hauptgärbehälter der Anlage B sowie die Paddelrührwerke im Nachgärer der Anlage E. Der Tauchmotorpropeller im Nachgärer der Anlage B musste zeitweise kontinuierlich betrieben werden, um eine hartnäckige Schwimmschicht aufzulösen.

Die übrigen Rührwerke wurden im Intervallbetrieb eingesetzt, wobei sich deutliche Unterschiede zwischen den Anlagen zeigten. Die Stabmixer in Anlage A erforderten vergleichsweise lange Laufzeiten, auch im Nachgärbehälter. Anlage C fiel hingegen mit relativ kurzen Laufzeiten auf. Hier war in den Hauptgärbehältern und im Nachgärer jeweils ein Langachs-Rührwerk in Kombination mit einem Tauchmotorpropeller im Einsatz. Für Tauchmotorpropeller in Nachgärbehältern, wie sie in den Anlagen B, F, G und H installiert waren, lässt sich aus den Beobachtungen im Mittel eine typische Laufzeit von ca. 15 Minuten pro Stunde ableiten.

Bei den Paddelrührwerken, die in den Hauptgärbehältern der Anlagen D, G und J verbaut waren, ergab sich ein uneinheitliches Bild (Tab. 12). Während die Laufzeit bei Anlage D und G vergleichbar war, kam Anlage J mit etwa der Hälfte dieser Laufzeit aus.

5.1.1.10 Prozessindikatoren im Gärgemisch

Für die Charakterisierung des Gärgemisches und die Beurteilung der Prozessstabilität stützt man sich nach wie vor hauptsächlich auf die Ergebnisse chemischer Analysen an Einzelproben. Hierbei betrachtet man sogenannte Prozessindikatoren, die sich dadurch auszeichnen sollten, dass sie eine Destabilisierung des Gärprozesses bereits in einem frühen Stadium anzeigen und die Belastbarkeit der Biozönose widerspiegeln. Außerdem sollten sie bei Prozessstörungen eine Veränderung zeigen, die sich von normalerweise auftretenden Schwankungen deutlich abhebt.

Die Konzentration flüchtiger Fettsäuren (FFS) ist ein sehr brauchbarer Prozessindikator, da diese Verbindungen Zwischenprodukte des anaeroben Abbaufweges sind, deren Anreicherung eine Störung des Fließgleichgewichts in der Abbaukette, z. B. durch eine zu hohe Raumbelastung anzeigt. Zugleich wirken flüchtige Fettsäuren hemmend auf den Abbauprozess. Bei steigenden Säurekonzentrationen wird schließlich die Pufferkapazität im Gärgemisch soweit aufgezehrt, dass der pH-Wert in einen Bereich absinkt, der den Methan bildenden Archaea kein Wachstum mehr ermöglicht. Man spricht von einer Versäuerung des Gärprozesses, welche ein komplett neues Anfahren der Anlage erforderlich machen kann.

Als Summenparameter für das Verhältnis der flüchtigen Fettsäuren und der Pufferkapazität wurde der FOS/TAC-Wert eingeführt. Der FOS/TAC-Wert ist in seinem Absolutwert zwar stark abhängig von der Probenaufbereitung und zwischen Anlagen nur bedingt vergleichbar, eignet sich aber bei fortlaufender Beobachtung auf einer einzelnen Anlage sehr gut als Prozessindikator.

Die Angabe von Richtwerten für Prozessindikatoren ist mit den oben genannten Einschränkungen und unter Bezugnahme auf die Verfahrenstechnik möglich. Im Folgenden werden als Grundlage der Interpretation der Beobachtungen an den Pilotanlagen Richtwerte für ein einphasiges Verfahren in einem Rührkesselreaktor herangezogen (Tab. 13).

Tab. 13: Richtwerte der Prozessindikatoren flüchtige Fettsäuren und FOS/TAC für ein einphasiges Verfahren im Rührkesselreaktor (Effenberger & Leuhn, 2008)

Prozessindikator	Einheit	Richtwert
FFS	mg*kg ⁻¹	<4.000
Essigsäure	mg*kg ⁻¹	<3.000
Propionsäure	mg*kg ⁻¹	<1.000
(iso-) Buttersäure	mg*kg ⁻¹	<50
FOS/TAC	-	<0,5...0,8
NH4-N	mg*kg ⁻¹	<3.000

Der gewählte Richtwert der FFS-Konzentration von 4.000 mg*kg⁻¹ für einen stabilen Gärprozess wurde im Mittel auf sechs der zehn Pilotanlagen eingehalten (Abb. 49). In Fermenterproben aus Anlage E und H wurde der Wert im Mittel deutlich überschritten, ist auf diese hoch belasteten liegenden Fermenter aber auch nicht anwendbar. Die liegenden Fermenter der Anlage F, die deutlich größer dimensioniert sind, fielen durch sehr geringe FFS-Konzentrationen auf. Die FFS-Konzentrationen in Proben aus Anlage C bewegten sich im Mittel um den Richtwert, in Proben aus Fermenter 2 der Anlage J lagen sie deutlich darüber. Dieser Fermenter war der einzige, der einem Gärbehälter nachgeschaltet war und gleichzeitig mit Substrat beschickt wurde.

Die beobachtete Streuung der FFS-Konzentration kann als ein Maß für die langfristige Prozessstabilität herangezogen werden. Hier fielen besonders die Anlagen B, D und der Fermenter 2 der Anlage J (J_F2) negativ auf (Abb. 49). Im Vorgärbehälter der Anlage I lag die FFS-Konzentration im Mittel bei 10.069 mg*kg⁻¹ bei einer Streuung von 4.023 bis 21.941 mg*kg⁻¹.

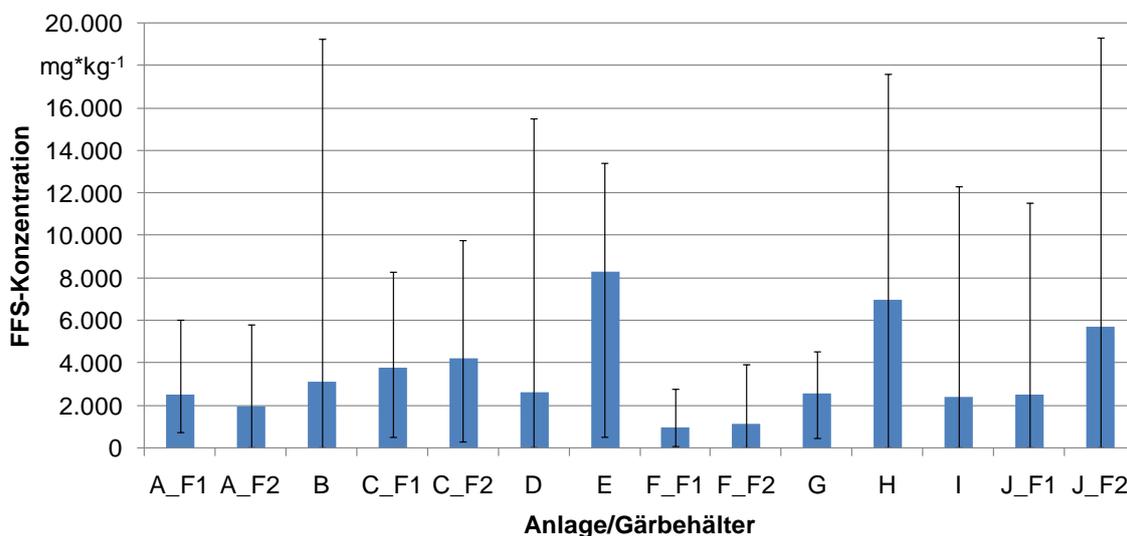


Abb. 49: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

Die Auswertung des FOS/TAC liefert ein teilweise anderes Bild als die FFS-Konzentrationen (Abb. 50). Der rot schraffierte Bereich markiert im Diagramm den Toleranzbereich nach Tab. 13. Aussagekräftiger als der Mittelwert erscheint die Streuung. Die-

se war bei Anlage B auffallend gering und ließ im Gegensatz zu den FFS keine deutliche Instabilität erkennen. Auch bei Anlage D war die Schwankung der FOS/TAC-Werte weniger ausgeprägt als diejenige der FFS-Konzentration. Anlage C zeigte hingegen auch anhand des FOS/TAC deutliche Stabilitätsprobleme.

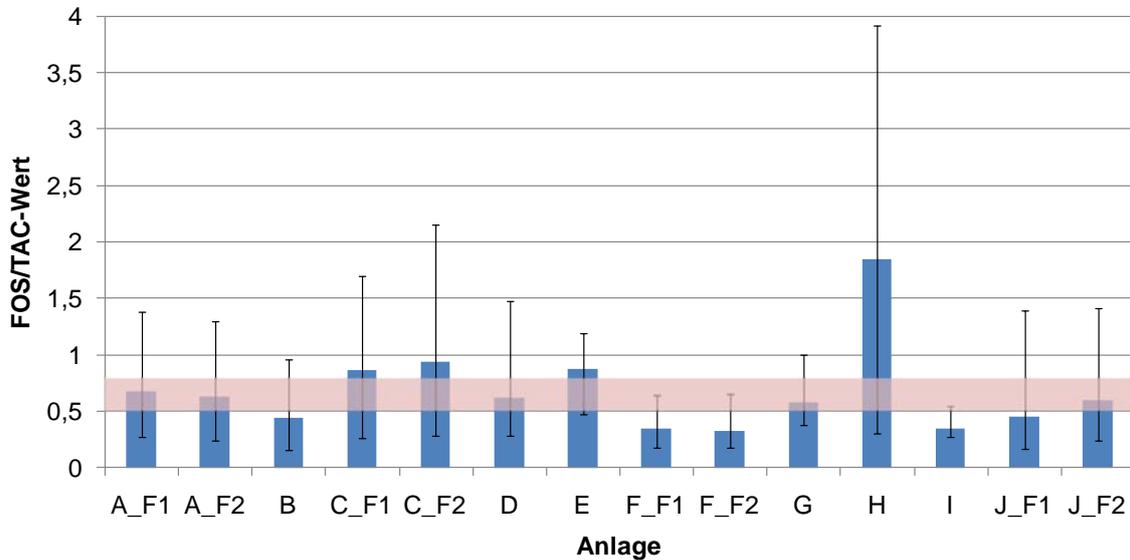


Abb. 50: FOS/TAC-Werte in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

Betrachtet man die Konzentration einzelner FFS, so lässt sich ein etwas differenzierteres Bild der Prozessstabilität in den Pilotanlagen gewinnen. Während im Mittel alle Rührkesselfermenter den Richtwert für Essigsäure unterschritten, waren die Unterschiede in der Schwankungsbreite hier ausgeprägter als für den Summenparameter. Wiederum fielen die Anlagen B und D negativ auf, zusätzlich Anlage I und J_F1 (Abb. 51).

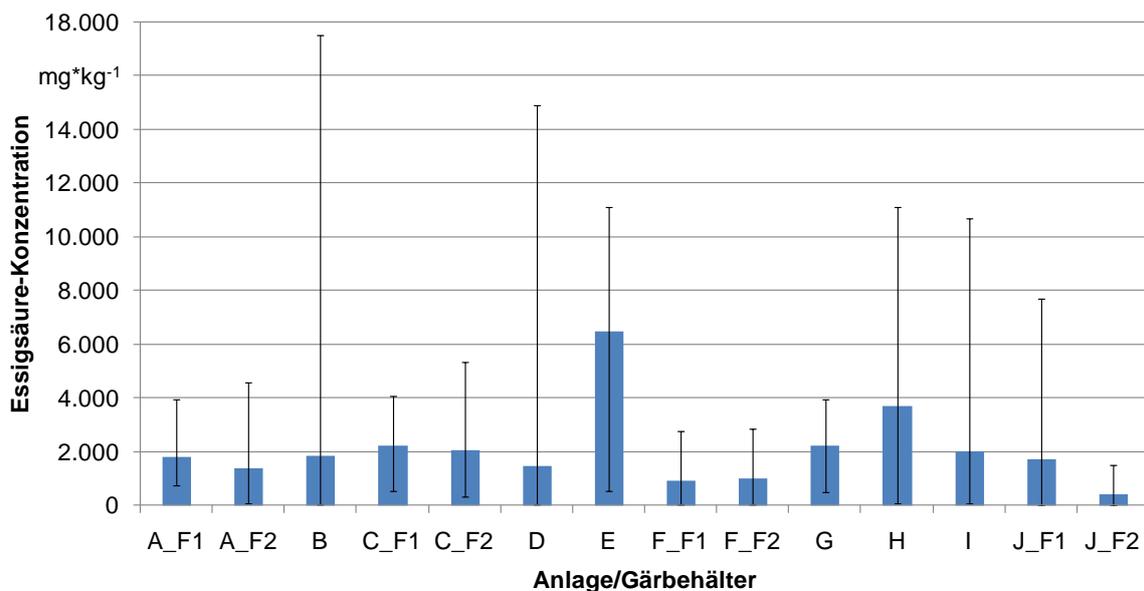


Abb. 51: Gemessene Konzentration an Essigsäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

In Anlage E ging die Strategie auf, im stark belasteten Hauptgärbehälter hohe Essigsäuremengen bereitzustellen, die dann effektiv im Nachgärbehälter zu Methan umgesetzt wurden. J_F2 hingegen wies auffällig geringe Essigsäurekonzentrationen auf (Abb. 49). In Proben aus dem Vorgärbehälter der Anlage I wurde im Mittel eine Essigsäurekonzentration von $7.021 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gemessen.

Als weiterer Prozessindikator wird nun die Propionsäure betrachtet, die vor allem eine Hemmung der letzten Schritte der Methanbildung anzeigt und selbst hemmend wirkt. Hier erwies sich der Richtwert von $1.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ als streng, wurde er im Mittel doch nur von der Hälfte der Anlagen eingehalten (Abb. 52). Wieder traten Anlagen B und D deutlich hervor, zudem Anlage C und insbesondere J_F2, der außerordentlich hohe Propionsäurewerte aufwies (Maximalwert: $19.496 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). In diesem Fermenter lag offenbar eine massive Hemmung der Methanbildung vor. Im Vorgärbehälter der Anlage I wurde eine mittlere Propionsäurekonzentration von $1.581 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gemessen.

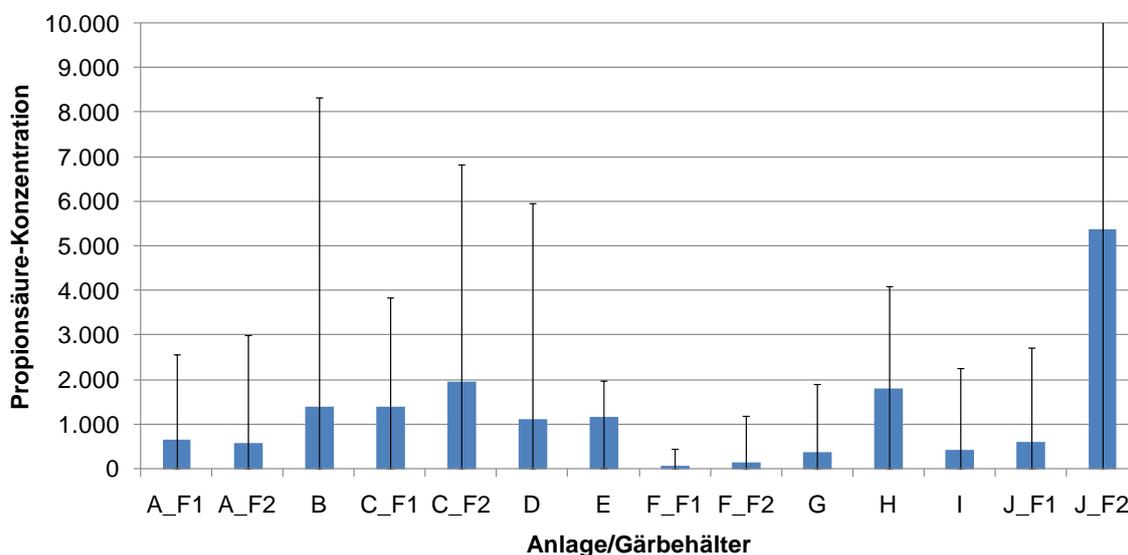


Abb. 52: Gemessene Konzentration an Propionsäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

Iso-Buttersäure wird in der Literatur vor allem als frühzeitig ansprechender Indikator für eine Destabilisierung des Gärprozesses diskutiert und sollte daher nur in sehr geringen Konzentrationen nachweisbar sein. Hier fielen Anlagen C, D und J mit hohen Maximalwerten auf (Abb. 53).

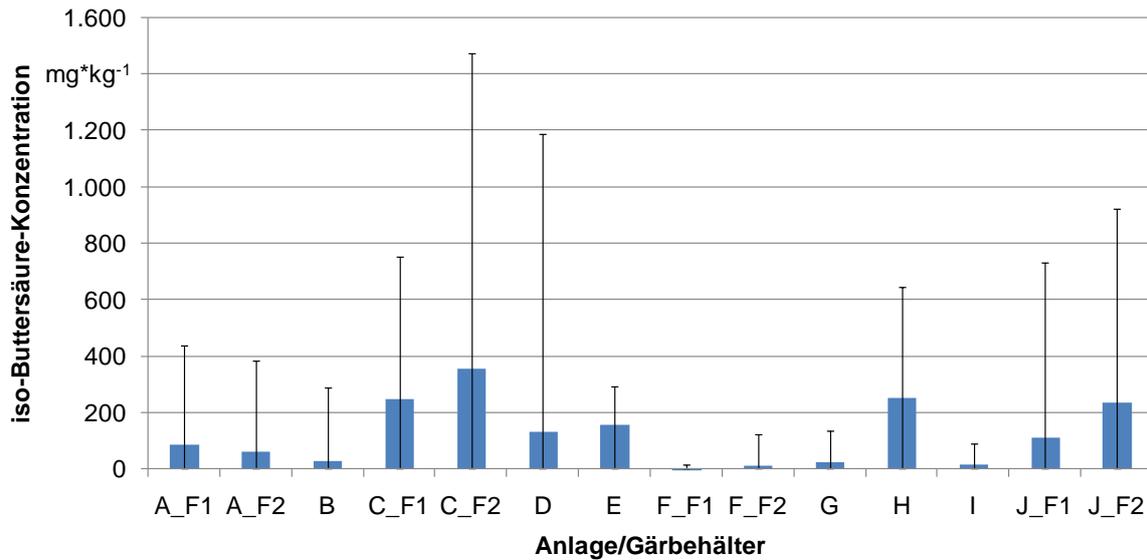


Abb. 53: Gemessene Konzentration an iso-Buttersäure in Proben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

Die Streuung der gemessenen FFS-Konzentrationen in den Haupt- und Nachgärbehältern war vergleichbar (vgl. Abb. 49 und Abb. 54). Bei den Nachgärbehältern fielen vor allem die Anlagen A, B, E und H (NG2) mit großen Schwankungsbreiten auf (Abb. 54), was im Falle der Anlagen C und D nicht mit den Beobachtungen an den Fermenterproben im Einklang steht. Für Anlage H konnten die großen Schwankungen der FFS-Konzentrationen im NG2 mit der Umstellung von zwei- auf dreistufigen Betrieb plausibel erklärt werden. Die hohen FFS-Konzentrationen in Proben aus diesem Behälter traten von Juni bis September 2007 auf, nachdem der neue Nachgärbehälter (NG1) diesem vorgeschaltet worden war. Hierdurch musste sich die Biozönose in der jetzigen dritten Stufe plötzlich auf eine stark veränderte Zusammensetzung des Zulaufs einstellen.

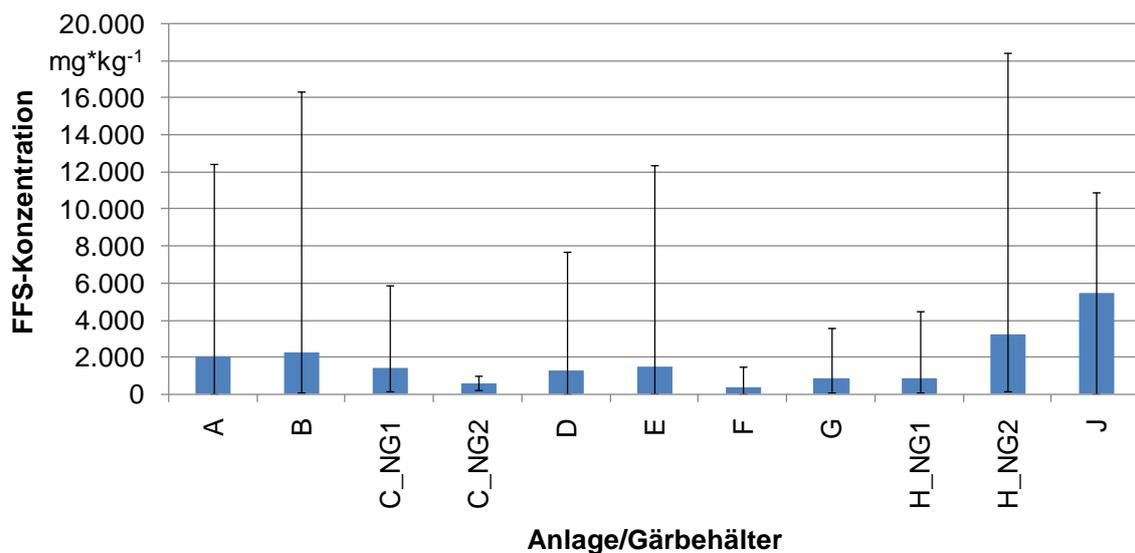


Abb. 54: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren in Proben aus den Nachgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

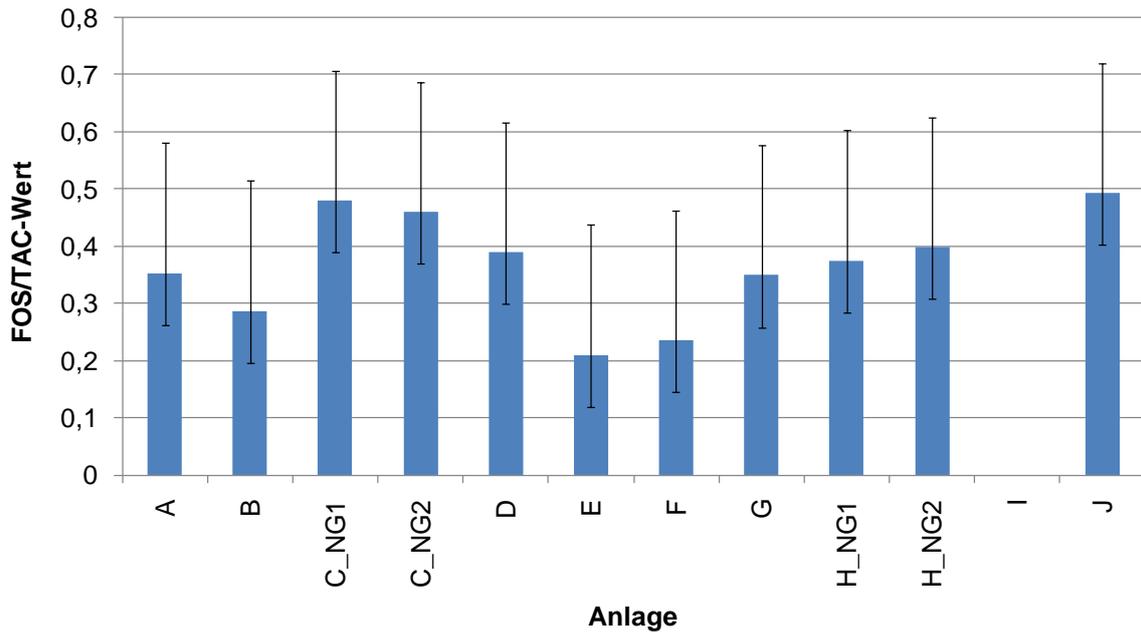


Abb. 55: FOS/TAC-Werte in Proben aus den Nachgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwert und Streuung)

Die gemessene FFS-Konzentration in Proben aus den Nachgärbehältern der Pilotanlagen betrug im Mittel ca. 48 % derjenigen in den Hauptgärbehältern, die Essigsäurekonzentration ca. 61 %. Der Anteil der Essigsäure an den Gesamt-FFS betrug im Mittel der Proben aus den Hauptgärbehältern ca. 66 % und in Proben aus den Nachgärbehältern ca. 79 %. Der deutlichste Abfall der FFS- und Essigsäurekonzentration vom Hauptgärbehälter zum Nachgärer zeigte sich verfahrensbedingt für die Anlagen E und H (Abb. 56).

In J_F2 und J_NG waren die Verhältnisse auf Grund der instabilen Verhältnisse in J_F2 umgekehrt, was auf deutliche Hemmung der syntrophen Methanbildung in diesem Gärbehälter schließen lässt. Die Fütterung von J_F2 wurde daraufhin in der Menge reduziert und auf einen höheren Getreidekörneranteil umgestellt. In der Folge stabilisierten sich die Verhältnisse und die FFS-Konzentration sank auf Werte unter $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

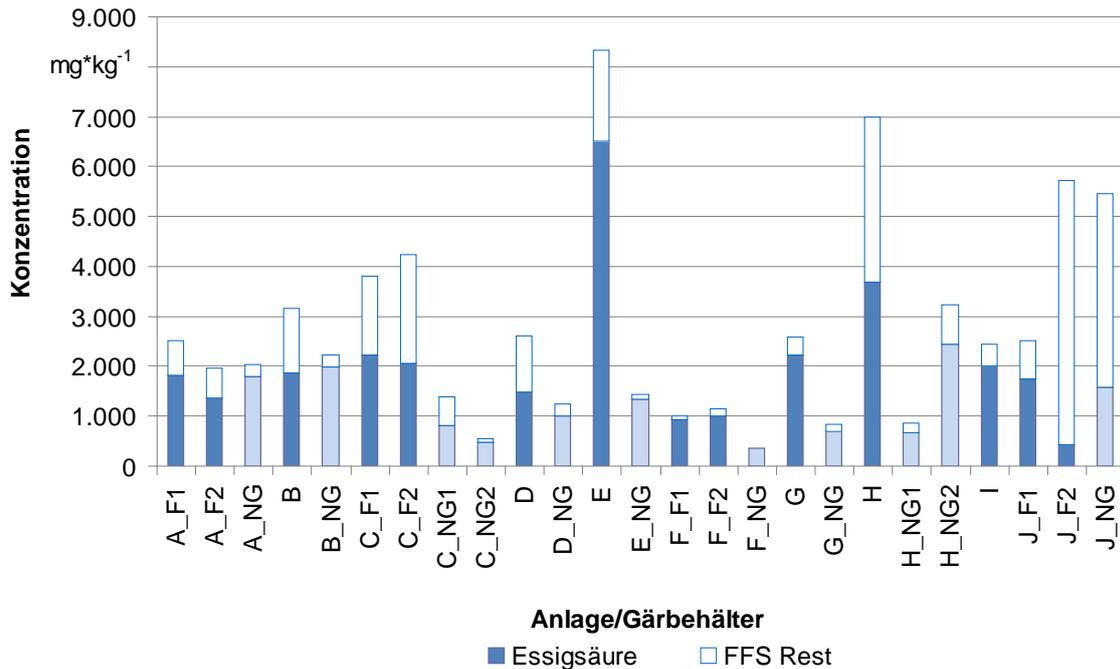


Abb. 56: Gemessene Konzentration an flüchtigen Fettsäuren und Essigsäure in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte)

Der pH-Wert ist als alleiniger Prozessindikator nicht geeignet, da er auf Grund der Puffer-eigenschaften des Gärgemisches auf eine Destabilisierung der Abbaukette stark verzögert reagiert. Der pH-Wert beeinflusst jedoch das Dissoziationsgleichgewicht vieler Zwischenprodukte und damit auch deren hemmende Wirkung. Als Optimalbereich für einen einphasigen Gärprozess gilt ein pH-Wert von 6,8 bis 7,5. Bei niedrigeren pH-Werten werden die Methan bildenden Archaea gehemmt, bei höheren pH-Werten nimmt insbesondere die Hemmung durch Ammoniak zu.

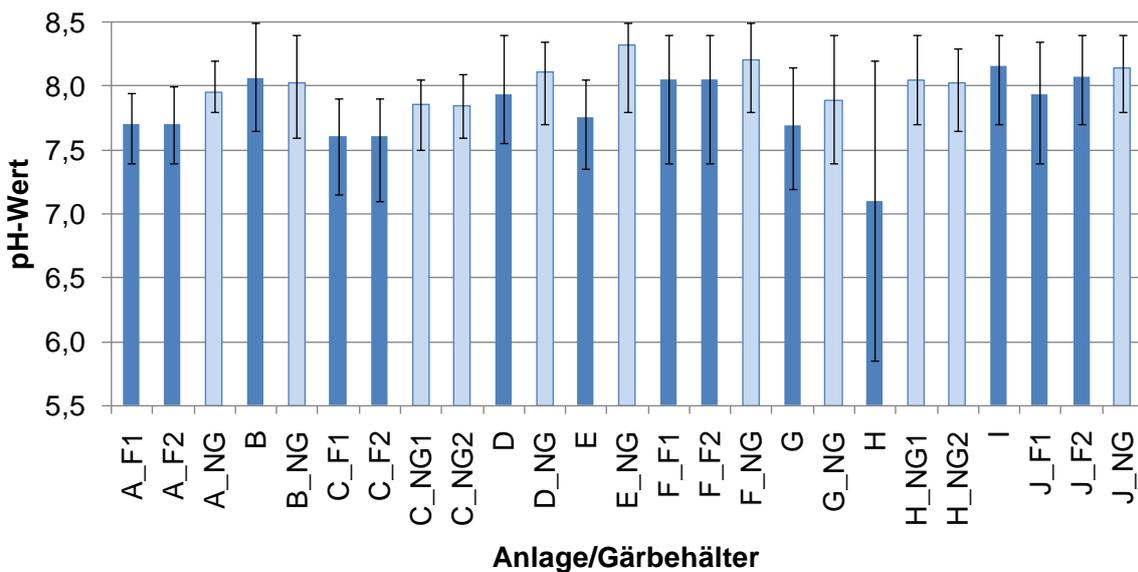


Abb. 57: Im Labor gemessene pH-Werte in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte und Streuung)

Mit Ausnahme der ersten Stufe der Anlage H lag der gemessene pH-Wert in allen Gärbehälterproben der Pilotanlagen im Mittel oberhalb des Optimalbereiches (Abb. 57). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Probe während Transport und Lagerung chemischen Veränderungen unterliegt (v. a. Ausgasung von Kohlendioxid), die eine Erhöhung des pH-Wertes bewirken. Daher ist der pH-Messwert aus dem Labor als systematisch zu hoch einzuschätzen.

Eine zeitweise Versäuerung des Prozesses zeigte sich nur im Fermenter der Anlage H, wo der gemessene Minimalwert des pH 5,9 betrug. Der Vorgärbehälter der Anlage I, der als zur Atmosphäre hin offene Hydrolysestufe konzipiert wurde, hob sich hingegen mit einem mittleren pH-Wert von 4,9 deutlich ab.

Der pH-Wert in Proben aus den ersten Nachgärbehältern lag im Mittel um 0,3 Punkte über dem in Proben aus den Hauptgärbehältern. Lediglich bei Anlage B war kein Unterschied im pH-Wert zwischen den beiden Prozessstufen festzustellen (Abb. 57). $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und pH-Wert im Gärgemisch waren positiv korreliert, wie Abb. 58 zeigt. Dies lässt sich durch den Puffer $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ erklären.

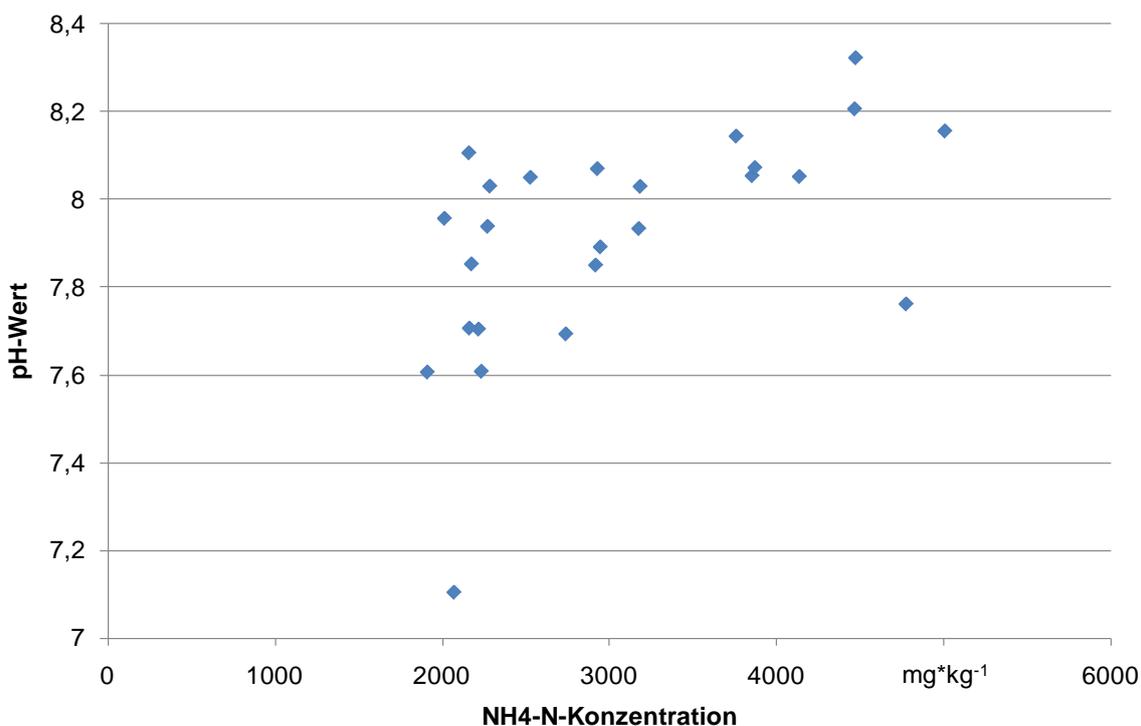


Abb. 58: Im Labor gemessener pH-Wert in Proben aus den Gärbehältern der Pilotanlagen aufgetragen über der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration in denselben Proben (jeweils Mittelwerte)

Der ammoniakalische Stickstoffgehalt ($\text{NH}_4\text{-N}$) hat als Prozessindikator insofern eine Bedeutung, als erhöhte Gehalte eine hemmende Wirkung auf die anaerobe Biozönose entfalten. Die hemmende Wirkung geht dabei von Ammoniak (NH_3) aus, wobei die Konzentrationsverteilung zwischen NH_4^+ und NH_3 vom pH-Wert und der Temperatur abhängig ist. Das $\text{NH}_4\text{-N}$ -Niveau wird durch den Stickstoffgehalt der Einsatzstoffe bestimmt. Im Verlaufe der Vergärung nimmt der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Gärgemisch durch den Abbau stickstoffhaltiger Komponenten zu.

Für eine nicht an erhöhte $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte angepasste Biozönose geht man von einer Hemmschwelle für Ammoniak von etwa $700 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ aus, was unter den typischen Bedingungen in einem Gärbehälter auf mesophilem Temperaturniveau einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration von ca. $3.000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ entspricht.

Zieht man diese Werte zur Orientierung heran, so wurde der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Richtwert im Mittel in den Fermenterproben aus vier der zehn Pilotanlagen deutlich überschritten (Abb. 59). Darunter befanden sich die Proben aus den beiden Anlagen mit Verwertung von Hähnchenmist (E und F), der Anlage I, die eine hohen Getreideanteil einsetzte sowie der Anlage J. Auf dem letzteren Betrieb wiesen die Einsatzstoffe Grassilage, GPS und Körnerschrot einen relativ hohen Stickstoffgehalt auf. Eine rechnerische ermittelte $\text{NH}_3\text{-N}$ -Konzentration von $700 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ wurde mit Ausnahme der Anlage I jeweils erst in den Nachgärbehältern der genannten Pilotanlagen übertroffen.

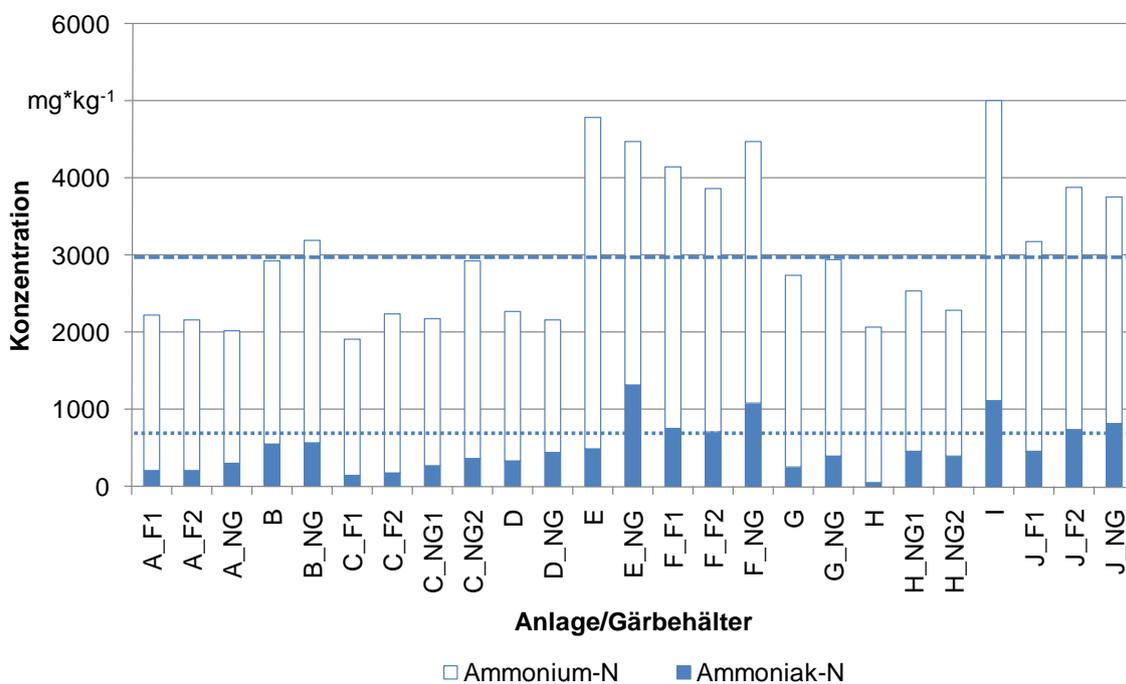


Abb. 59: Ammoniakalische N-Konzentration in Gärgemischproben aus den Hauptgärbehältern der Pilotanlagen (Mittelwerte)

Die hinter den Prognosen zurückgebliebene Biogasausbeute in der Anlage F könnte in Teilen durch eine stickstoffbedingte Hemmung verursacht worden sein. Bei Anlage I wurde im ersten Beobachtungsjahr bei $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werten bis knapp $7.000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ eine solche Hemmung vermutet. Durch die Umstellung der Substratration sanken die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte in dieser Anlage bis zum Ende des Beobachtungszeitraums auf weniger als die Hälfte.

5.1.1.11 Biogas- und Methanausbeute

Die Biogasausbeute in Bezug auf die eingetragene Menge an Substrat gibt bei Vergleich mit einem geeigneten Referenzwert den Grad der Ausgärung an. Als Referenzwerte können die Ergebnisse aus Batch- oder besser Durchflusstests, Beobachtungswerte aus der Praxis oder rechnerische Werte herangezogen werden. Da in der Praxis ein Substratmix vorliegt, müsste exakt dieselbe Mischung im Labormaßstab vergoren werden, um einen

Referenzwert zu erhalten. Dies war aus praktischen Gründen nicht realisierbar. Als Vergleichswert für die beobachteten Biogas- und Methanausbeuten in den Pilotanlagen wurden daher Rechenwerte nach dem Futterwertmodell verwendet.

Die auf den Pilotanlagen gemessene Biogasausbeute aus der eingetragenen Frischmasse betrug 162 bis 258 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, die entsprechende Methanausbeute 84 bis 136 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ (Tab. 14). Bezogen auf die eingetragene organische Trockenmasse betrug die Biogasausbeute 519 bis 776 $\text{m}^3 \cdot \text{kg oTM}^{-1}$, die Methanausbeute 253 bis 406 $\text{m}^3 \cdot \text{kg oTM}^{-1}$. Die höhere Belastung der Anlage C nach der Erweiterung spiegelte sich in einer verringerten Biogasausbeute wider, während für Anlage H der zu erwartende gegenteilige Effekt nach Zubau eines Nachgärbehälters nicht erkennbar war.

Tab. 14: Für die Pilotanlagen ermittelte Biogas- und Methanausbeuten (Mittelwerte) im Vergleich zu rechnerischen Werten nach Futterwertmodell

ID		A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Biogas-	$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	189	173	184	212	211	258	209	162	172	183	214	172
ausbeute	$\text{m}^3 \cdot \text{kg oTM}^{-1}$	696	681	776	709	737	676	519	714	739	754	729	700
Methan-	$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	103	91	96	106	107	136	101	84	94	94	115	85
ausbeute	$\text{m}^3 \cdot \text{kg oTM}^{-1}$	378	360	406	394	374	355	253	354	405	393	393	347
Relative Biogas- ausbeute	%	129	142	141	131	138	126	90	130	139	142	n.v.	n.v.

n.v.: nicht verfügbar

Der Vergleich der nach Futterwertmodell prognostizierten mit den gemessenen Biogasausbeuten ergab im Mittel über acht Anlagen eine relative Biogasausbeute von 131 %. Dies bestätigt Erfahrungen aus der Praxis, wonach das Futterwertmodell die zu erwartenden Gaserträge in Biogasanlagen im Allgemeinen deutlich unterschätzt. Anlage F blieb als einzige unter dem prognostizierten Wert, wobei die Gründe hierfür nicht eindeutig geklärt werden konnten. Vergleicht man Biogas- und Stromausbeute bezogen auf den oTM-Eintrag, um den Fehler der Gasmengenmessung zu eliminieren, so reiht sich Anlage F auch bei der Stromausbeute an letzter Stelle ein (Abb. 60).

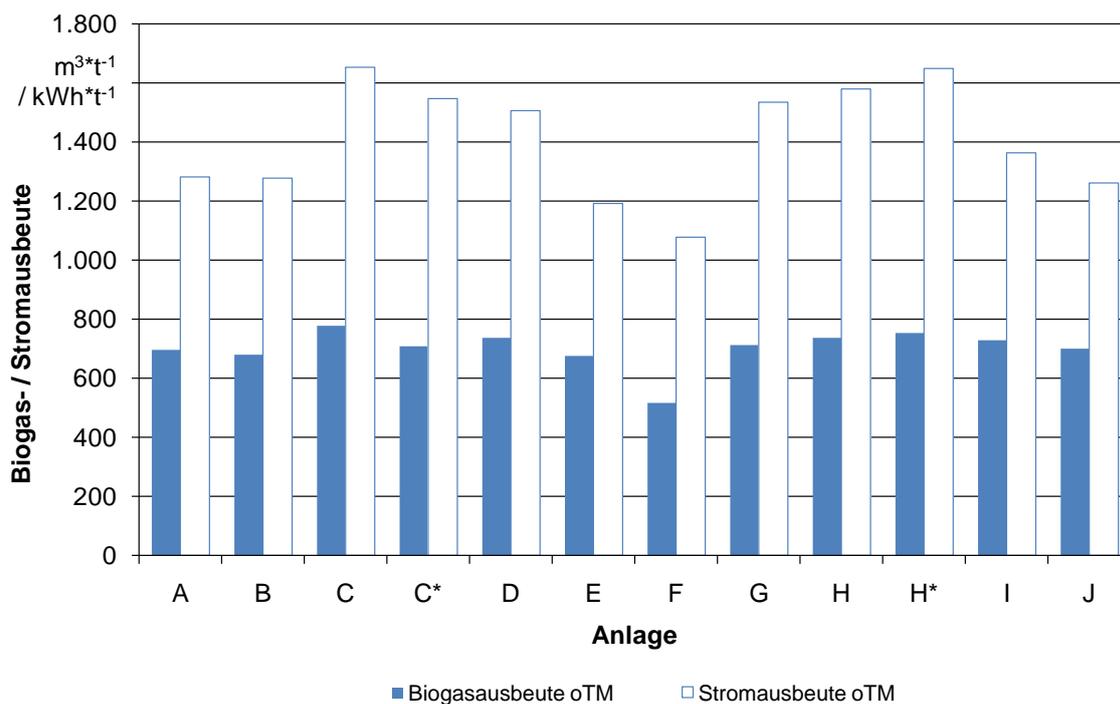


Abb. 60: Biogas- bzw. Stromausbeute aus der eingetragenen organischen Trockenmasse (Mittelwerte)

5.1.1.12 Abbau der Biomasse

Der Abbau der Biomasse wurde über eine Massenbilanz aus dem gemessenen Biogasertrag ermittelt (siehe hierzu Reinhold, 2005). Der Masseabbau der Einsatzstoffe errechnete sich zu 21,3 bis 33,7 %. Die berechneten Abbaugrade der oTM in den Einsatzstoffen betragen 57,5 bis 89,0 % (Tab. 15).

Tab. 15: Berechneter Masse- und oTM-Abbau der Einsatzstoffe in den Pilotanlagen in Prozent (Mittelwerte)

ID Anlage	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Masseabbau	24,3	22,6	24,1	28,4	28,1	33,7	27,6	21,3	23,5	24,3	27,6	23,1
oTM-Abbau	75,2	74,7	85,4	89,0	82,3	74,2	57,7	78,9	84,7	85,1	79,1	79,1

5.1.1.13 Biogas- und Methanproduktivität

Die Biogas- bzw. Methanproduktivität drückt aus, wie effektiv der zur Verfügung stehende Gärraum einer Biogasanlage genutzt wird. Im Zuge der technologischen Weiterentwicklung ist man bestrebt, die Produktivität der Reaktoren zu steigern. Dabei sind bei der Nassvergärung durch die Obergrenze des Trockenmassegehaltes der Gärsuspension von ca. 10 bis 12 % der Biogasproduktivität Grenzen gesetzt. Die Spannweite der Biogasproduktivitäten der Pilotanlagen betrug ca. 3,2, wobei es nicht überraschte, dass Anlage C in der ersten Ausbaustufe den niedrigsten Wert erreichte (Tab. 16).

Tab. 16: Für die Pilotanlagen ermittelte Biogas- und Methanproduktivitäten in Kubikmeter je Kubikmeter Nutzvolumen pro Tag (Mittelwerte)

ID	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Biogasproduktivität	1,5	1,3	0,9	1,6	1,9	1,8	1,5	1,9	2,9	1,4	2,1	1,3
Methanproduktivität	0,76	0,68	0,50	0,78	0,98	0,97	0,76	1,0	1,5	0,74	1,2	0,65

Der höchste Wert der Biogasproduktivität wurde für Anlage H ermittelt. Nach der Erweiterung der Anlage (H*) sank dieser Wert auf etwa die Hälfte und war damit nurmehr durchschnittlich. Das zweiphasige Verfahren der Anlage I hat prinzipiell das Potenzial zu einer höheren Produktivität, da hier durch die Vorversäuerung in dem relativ kleinvolumigen Vorgärbehälter der Hauptgärbehälter mit überwiegend gelöster, rasch abbaubarer organischer Substanz beschickt wird. Da der ursprünglich vorgesehene hohe Getreideanteil in der Substratration nicht realisiert werden konnte, kam dieser Vorteil auf Anlage I jedoch nur eingeschränkt zum Tragen.

Bemerkenswert sind die hohen Werte der Produktivität der beiden „Rührkessel-Anlagen“ D und G im Vergleich zu den Anlagen E und F mit liegenden Fermentern und auch zur oben erwähnten Anlage I. Der höhere verfahrenstechnische Aufwand bei letzteren Anlagen rechtfertigte sich demnach hauptsächlich durch die problemlosere Handhabung des Geflügelkots.

5.1.1.14 Zusammensetzung und Heizwert des Biogases

Der Methananteil im Biogas bestimmt dessen energetischen Wert und ist zugleich ein Prozessindikator. Der Methangehalt wurde auf den Pilotanlagen in der Brenngasleitung zum BHKW gemessen, d. h. an der Schnittstelle der Bilanzgruppen Biogasproduktion und Biogasverwertung (vgl. Abb. 6). Auf den Anlagen F und J wurde zusätzlich die Biogaszusammensetzung in einzelnen Gärbehältern bestimmt. Die mittleren gemessenen Methananteile lagen für die Pilotanlagen zwischen 50 und 57 Vol.-%. Die im Mittel höchsten Methangehalte wurden dabei in Anlage I gemessen, die niedrigsten in Anlage J (Tab. 17). Der mittlere Methanwert für Anlage I war auffällig hoch, was durch die vorgeschaltete Hydrolysestufe erklärt werden kann. Der mittlere Methananteil im Biogas der Anlagen ohne regulären bzw. mit geringem Einsatz von Gülle oder Mist (B, C, D und H) war mit 51,7 Vol.-% nicht signifikant verschieden vom entsprechenden Wert der übrigen Anlagen (52,2 Vol.-%).

Tab. 17: Gemessene Methangehalte im Biogas der Pilotanlagen in Volumenprozent (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte) und resultierender Heizwert H des Brenngases (Mittelwert) in Kilowattstunden je Normkubikmeter [$kWh \cdot m^{-3}$]

ID	A	B	C	D	E	F F1	F F2	F NG	F	G	H	I	J F1	J F2	J
MW	52,1	52,7	51,8	50,6	53,0	51,2	52,3	55,1	50,5	51,7	51,8	57,4	50,4	49,9	50,3
Min	21,4	43	20,2	40,5	49,3	8,3	44,6	27	0,3	46,7	47	6,1	45,9	25,1	3,3
Max	54,7	79,2	60,9	61,7	59,2	59,2	58,3	59,3	56,9	61,9	60,8	68,2	61,3	55,8	54,8
H	5,19	5,25	5,16	5,04	5,28	-	-	-	5,03	5,15	5,16	5,72	-	-	5,01

Da sich die dargestellten Schwankungsbreiten der gemessenen Methangehalte im Biogas jeweils auf den gesamten Beobachtungszeitraum beziehen, lassen sie in dieser Form keine Rückschlüsse auf die Prozessstabilität zu. Minimalwerte des Methangehalts unter

40 Vol.-% waren auf Lufteintritt während Revisionsmaßnahmen zurückzuführen. Auffällige Maximalwerte waren die Folge von Gerätefehlern bzw. Drift.

Schwefelwasserstoff im Biogas entstammt hauptsächlich dem Abbau schwefelhaltiger Aminosäuren in der eingetragenen Biomasse. Er kann im Motor Korrosion und eine Versäuerung des Motorenöls verursachen und muss deshalb durch eine sogenannte Entschwefelung des Biogases möglichst weitgehend entfernt werden. Als dauerhaft tolerabel kann ein Schwefelwasserstoffgehalt im Brenngas von 200 ppm gelten, wobei die Spezifikationen von Motorenhersteller zu Motorenhersteller verschieden sind. Dieser Wert wurde von acht der zehn Pilotanlagen im Mittel eingehalten (Tab. 18).

Tab. 18: Im Brenngas der Pilotanlagen gemessene Schwefelwasserstoffgehalte in parts per million (Mittelwert und Minimal-/Maximalwerte)

ID	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J F1	J F2	J
MW	152	44	161	178	277	340	88	54	105	96	154	92
Min	41	4	2,8	0	1	0	13	6	10	0	0	0
Max	351	996	572	1729	995	1244	236	264	304	1034	988	1128

5.1.2 Kenngrößen der Biogasverwertung

Die Bilanzgruppe „Biogasverwertung“ umfasst den Verfahrensabschnitt von der Zufuhr des Brenngases zum BHKW bis zur Abgabe von elektrischer und thermischer Energie (Abb. 6).

5.1.2.1 Stromausbeute Frischmasse-Eintrag

Eine direkte Verknüpfung des Stromertrags mit dem Substrateinsatz liefert die Stromausbeute bezogen auf den Frischmasse-Eintrag. Eventuelle Fehler bei der Gasmengenmessung wirken sich auf diese Kenngröße nicht aus, während die Messung des Bruttostroms im Allgemeinen mit hoher Genauigkeit erfolgt. Die Kenngröße enthält andererseits den elektrischen Wirkungsgrad des BHKW. Die für die Pilotanlagen ermittelten substratbezogenen Stromausbeuten wurden in Tab. 19 zusammengestellt.

Tab. 19: Stromausbeuten für die Pilotanlagen in Kilowattstunden bezogen auf den Substrateintrag in Tonnen Frischmasse bzw. organische Trockenmasse [$kWh \cdot t^{-1}$] (Mittelwerte)

ID	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Stromausbeute aus Frischmasse	347	324	392	416	432	455	433	348	368	395	399	310
Stromausbeute aus oTM	1280	1277	1654	1549	1506	1191	1077	1535	1579	1648	1362	1263

5.1.2.2 Ausnutzungsdauer und Arbeitsausnutzung (Auslastung) des BHKW

Aus verfahrenstechnischer Sicht können diese Kennwerte einen Hinweis auf die Stabilität des Gärprozesses und die technische Zuverlässigkeit der Anlage liefern. Wurde eine Biogasanlage solide dimensioniert und der Gärprozess stabil gehalten, so sollte die Auslastung des BHKW bei etwa 90 % oder darüber liegen. Bei der Interpretation dieser Kenngröße sind allerdings weitere Faktoren zu berücksichtigen. Beispielsweise werden BHKW im Vorgriff auf einen Ausbau der Biogasanlage gelegentlich bewusst überdimensioniert,

wie dies bei den Pilotanlagen C und H der Fall war. Da sich die Genehmigung zum Bau eines Gärrestlagers für Anlage D verzögerte, musste hier vorübergehend der Durchsatz reduziert werden, um die vorhandene Lagerkapazität nicht zu überschreiten. Im Falle der Anlage I entschloss sich der Anlagenbetreiber dazu, seine Anlage vorübergehend nur teilweise auszulasten, um Substratkosten zu sparen. Im Allgemeinen wird aber eine geringe Auslastung des BHKW auf Grund des schlechteren elektrischen Wirkungsgrades und der sinkenden Leistungen aus dem Stromverkauf negative Folgen für die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage haben.

In Tab. 20 sind die Mittelwerte der elektrischen Arbeitsausnutzung und die theoretischen Volllaststunden der BHKW der Pilotanlagen jeweils über den gesamten Beobachtungszeitraum zusammengestellt. Legt man einen Zielwert von 8.000 Volllaststunden entsprechend einer Auslastung von 91,3 % zu Grunde, so wurde dieser Wert von sechs der zehn Anlagen erreicht oder übertroffen.

Tab. 20: *Mittlere elektrische Arbeitsausnutzung (Auslastung) und theoretische Volllaststunden der BHKW der Pilotanlagen*

ID Anlage		A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Arbeitsausnutzung	%	97,8	82,4	81,3	93,7 [§]	79,3	97,1	91,3	96,1	66,7	92,2	58,6	89,0
Theoret. Volllaststunden	h*a ⁻¹	8570	6917	7123	8205 [§]	7003	8507	7997	8407	5845	8081	4939	7783

[§] Berechnung mit einer aus genehmigungsrechtlichen Gründen reduzierten BHKW-Leistung von 500 kW_{el}

Trägt man die erreichte elektrische Auslastung als Kenngröße des Betriebsverlaufs über der spezifischen installierten elektrischen Leistung als Planungskenngröße auf, so lässt sich mit den oben erwähnten Einschränkungen ein Soll-Ist-Abgleich der Planung und des Betriebserfolgs der Biogasanlagen durchführen (Abb. 61). In diese Darstellung wurden zusätzlich zwei Hilfslinien zur Einordnung der Werte eingezeichnet. Die waagrechte gestrichelte Linie markiert eine Arbeitsausnutzung von 91,3 % (8.000 theoretische Volllaststunden pro Jahr). Dieser Wert wurde von 41 % der Anlagen im BMP II erreicht oder übertroffen. Die senkrechte gestrichelte Linie kennzeichnet eine spezifische installierte elektrische Leistung von 0,25 kW*m⁻³ (entspricht 4 m³ Nutzvolumen Gärbehälter je kW_{el}), die derzeit nur von einer Minderheit der Anlagen übertroffen wird (Johann Heinrich von Thünen Institut, 2009).

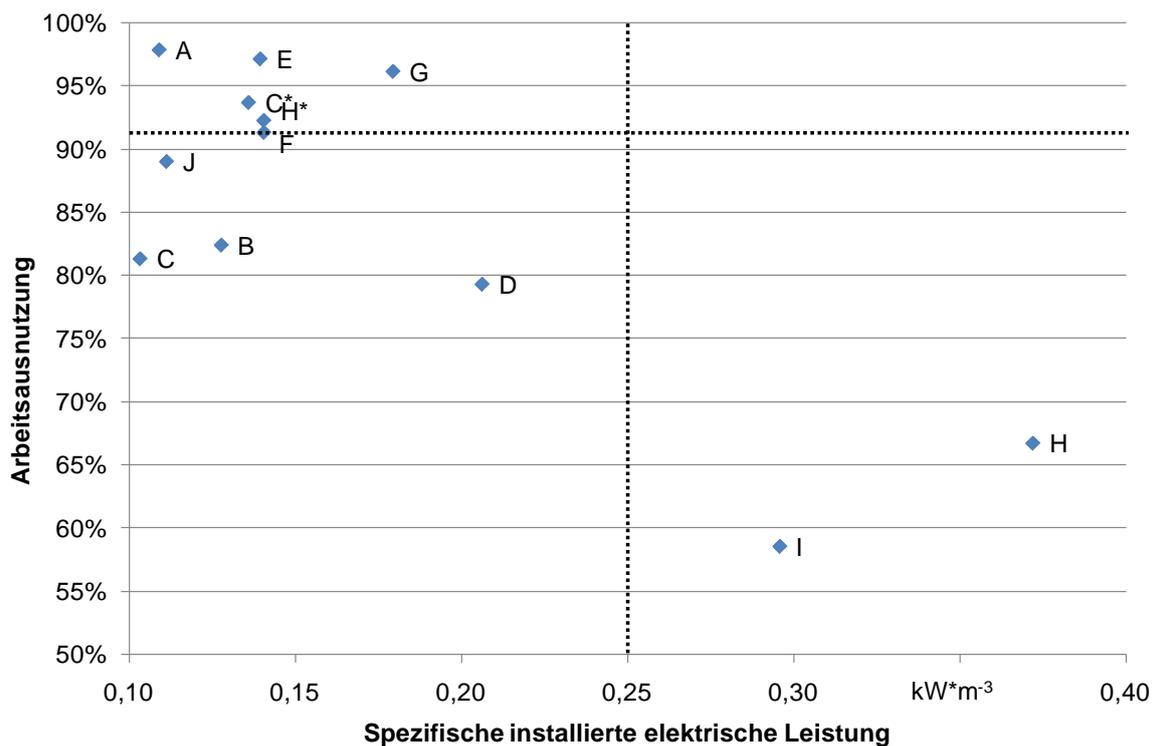


Abb. 61: Spezifische installierte elektrische Leistung und mittlere elektrische Arbeitsausnutzung der Pilotanlagen

Entsprechend dieser Einteilung zeigten die Anlagen A, C*, E, F, G, H* eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Planung und Betriebsverlauf (Abb. 61). Bei Anlage C* wurde berücksichtigt, dass nach der Erweiterung der Anlage die elektrische Leistung aus genehmigungsrechtlichen Gründen zunächst auf 500 kW_{el} beschränkt bleiben musste. Die schlechte durchschnittliche Auslastung der Anlagen D und I war durch die erwähnten wirtschaftlichen Einflüsse begründet. Der Gärraum der Anlage I war in der Planung für energiereiche Getreidemaische als Hauptsubstrat vergleichsweise klein dimensioniert worden. Das BHKW der Anlage H war ursprünglich überdimensioniert und wurde nur teilweise ausgelastet. Nach der Erweiterung kam Anlage H* im Normalbereich der spezifischen installierten Leistung zu liegen, wobei eine sehr gute Auslastung erzielt wurde.

Problematisch stellten sich vor allem Anlagen B, C und D dar, die trotz geringer bis mittlerer spezifischer elektrischer Leistung eine Arbeitsausnutzung von deutlich unter 85 % erreichten. In diesen Anlagen war die unbefriedigende Auslastung durch eine schwerwiegende Prozessdestabilisierung (Anlagen C und teilweise D) bzw. durch längerfristige technische Probleme (Anlage B) begründet.

5.1.2.3 Biogasverluste

Biogasverluste aus der Anlage reduzieren die substratspezifische Stromausbeute und belasten die Treibhausgasbilanz der Energiegestehung aus Biogas (s. Abschn.4.9.2). Verluste treten auf durch technische Undichtigkeiten (kontinuierlich, aber sehr geringe Masseströme) sowie als Folge unerwünschter Betriebszustände, bei denen Biogas durch Sicherheitsventile abgeblasen wird (kurzfristig, ggf. relativ hohe Masseströme). Wie hoch diese Verluste in der Praxis sind, wurde bisher nicht quantifiziert.

Auch die unvollständige Ausgärung der Einsatzstoffe verursacht bilanzmäßig einen Verlust und ggf. Methanemissionen während einer offenen Lagerung des Gärrestes. Die Höhe

dieser Verluste kann durch einen Restgaspotentialtest abgeschätzt, jedoch nicht exakt quantifiziert werden. Auf den Pilotbetrieben wurden während des Beobachtungszeitraums zwei Restgaspotentialtests durchgeführt, die im Abschlussbericht zum Projekt „Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen“ diskutiert werden (Lehner et al., 2009).

Das Restgaspotential im Verhältnis zur durchschnittlich auf der jeweiligen Anlage erzielten Biogasausbeute zeigte hierbei für acht Pilotanlagen eine breite Streuung. Bei einer Gärtemperatur von 38°C entsprachen die gemessenen Potentiale einem Anteil von 1,3 bis 6,1 % an der erzielten Biogasausbeute, bei 22°C lediglich einem Anteil von 0,3 bis 1,3 %. Die Ausbeuten in den „kalten“ Gärtests betragen 12 bis 47 % der Ausbeuten in den „warmen“ Tests (im Mittel 24 %). Tendenziell war für die thermophil betriebenen Anlagen der Unterschied „kalt“ zu „warm“ größer als für die mesophilen (im Mittel 12 % gegenüber 28 %). Der größere Temperatursturz bei den thermophilen Anlagen könnte demnach die methanogenen Organismen stärker beeinträchtigt haben. Im Mittel lag für die zweistufigen BGA das Restgaspotential im „kalten“ Gärtest bei 0,9 %, gegenüber 0,4 % für die dreistufigen Anlagen, wobei die Streuung bei letzteren deutlich geringer war.

Das Restgaspotential sank tendenziell mit zunehmender Gesamt-Verweilzeit im Fermentersystem, wobei unterhalb einer Verweilzeit von 100 Tagen eine erhebliche Streuung auftrat. Unabhängig von der Anzahl der Prozessstufen lag bei einer Gesamtverweilzeit von 100 Tagen oder mehr das Restgaspotential im „kalten“ Gärtest deutlich unter 1,0 %. Das Niveau des Restgaspotentials konnte mit Einschränkungen grob anhand des FFS-Gehaltes in der Gärrestprobe beurteilt werden.

Im selben Projekt wurden auch Versuche unternommen, die Biogasverluste aus Sicherheitsventilen (Über-/Unterdrucksicherungen) abzuschätzen. Hierzu wurden die Sicherheitsventile an fünf Pilotanlagen mit Messeinrichtungen zur Registrierung der Öffnungsereignisse versehen. Hierbei wurden erhebliche Unterschiede zwischen den Anlagen festgestellt. Während an zwei Anlagen über den gesamten Beobachtungszeitraum (jeweils mehrere 100 Tage) keine Auslösung registriert werden konnte, wurden an drei Anlagen Auslösungen an 3 bis 70 Tagen gemessen. Im letzteren Fall wurde vermutet, dass die Gasableitung aus dem Fermenter durch Ablagerungen oder Eindringen von Fermenterinhalt wiederholt behindert wurde. Die Quantifizierung der durch die Sicherheitsventile entweichenden Gasmengen konnte messtechnisch nicht ermöglicht werden.

5.1.2.4 Strombedarf der Biogasanlagen

Der Strombedarf der Biogasanlagen setzt sich aus dem Stromverbrauch der Hauptkomponenten der Biogasanlage, d. h. der Rührwerke, des Förder- und Eintragsystems für die Feststoffe, der Pumpen und des BHKW einschließlich Notkühler, sowie der Peripherie und verschiedener Kleinverbraucher zusammen. Auf zwei Anlagen war kein Zähler für den Gesamtstromverbrauch der Biogasanlage vorhanden, so dass dieser aus Teilmessungen ermittelt wurde. Eine vollständige Aufgliederung des Stromverbrauchs einzelner Komponenten war mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Es wurden daher vorrangig die Komponenten Feststoffeintrag und Rührwerke gemessen (Tab. 21).

Tab. 21: Strombedarf der Pilotanlagen im Verhältnis zur Brutto-Stromproduktion und Werte des spezifischen Strombedarfs bezogen auf den Eintrag an Frischmasse [$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$] (Mittelwerte)

ID Anlage		A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Strombedarf Biogasanlage [§]	%	9,1	17,4	8,4	6,1	5,8	8,3	7,3	4,5	14,2	10,3	11,1	6,2
Spezifischer Strombedarf [§] :													
Gesamt	$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$	31,6	56,4	32,9	25,5	25,1	37,6	31,5	15,5	52,2	40,5	44,3	19,2
Eintrag	$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$	2,4	4,3	1,5	0,9	0,7	1,9	1,8	0,3	2,2	1,8	0,6	n.v.
Rührwerke Gesamt	$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$	23,2	n.v.	3,44	2,97	10,6	n.v.	13,6	10,5	12,7	15,8	35,2	n.v.
Rührwerke Stufe 1	$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$	19,4	10,3	2,07	1,78	n.v.	2,30	9,73	7,34	7,17	5,56	23,1	11,9

[§] Verhältnis des Strombedarfs der Biogasanlage zur Brutto-Stromproduktion; [§] bezogen auf den Frischmasse-Eintrag ohne Berücksichtigung von Gülle

Der Wert des Gesamtstrombedarfs für Anlage C* von 3,7 % dürfte das erreichbare Minimum darstellen. In seiner Studie zum Strombedarf von 35 Biogasanlagen veranschlagt der Solarenergieförderverein Bayern (2006) dieses Minimum mit 4 %, da allein die Peripherie des BHKW durchschnittlich bereits mit 3,1 % zu veranschlagen war. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass ein geringer Wärmenutzungsgrad den Strombedarf für den Betrieb der Notkühler in die Höhe treibt.

Der Strombedarf für den Feststoffeintrag betrug 0,3 bis 4,3 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ und war weniger vom Mischsystem als von der zu überwindenden Förderhöhe abhängig. Während bei den Anlagen D und G keine Förderung der Einsatzstoffe gegen die Schwerkraft erfolgte, musste bei den Anlagen A, E, H und insbesondere B eine Höhendifferenz von mehreren Metern überwunden werden. Für Anlage I wurde der Strombedarf der Pumpen zur Förderung aus dem Feuchtsilo in die Hydrolysegrube und von dort in den Fermenter berücksichtigt.

Bezogen auf den Eintrag an Frischmasse (ohne Berücksichtigung von Gülle) wurden für die Pilotanlagen Werte für den gesamten spezifischen Strombedarf der Rührwerke von 2,1 bis 35,2 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ ermittelt. Für die Rührwerke in den Hauptgärbehältern ergaben sich Werte von 1,3 bis 23,1 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ (Tab. 21). Den höchsten Stromverbrauch hatten demnach die Rührwerke mit schnell laufenden Propellern, die in den Anlagen A und I im Einsatz waren. Einen relativ geringen spezifischen Stromverbrauch wiesen auch die Haspelrührwerke, insbesondere in Anlage E auf. Als sehr sparsam zeigte sich die Kombination aus einem Langachs- und einem Tauchmotor-Propellerrührwerk in Anlage C/C*. Hier wurde mit vergleichsweise kurzen Laufzeiten operiert (vgl. Tab. 12). Auch die Auslastung der installierten Rührwerksleistung in der ersten Prozessstufe war sehr unterschiedlich und reichte von 32 % im Falle der Kombination aus Langachs- und TMP-Rührwerk der Anlage C bis zu 83 % im Falle des Haspelrührwerks der Anlage E (Tab. 22).

Tab. 22: *Installierte Leistung und Strombedarf der Rührwerke in der ersten Prozessstufe der Pilotanlagen bezogen auf das Nutzvolumen Fermenter (Mittelwerte)*

ID Anlage /Gärbehälter	A	B	C	E	F_F1	F_F2	G	H
Rührwerks- typ	2 Stab- mixer	Zentral- rührwerk	Langachse u. TMP [§]	Haspel	Haspel	Haspel	Paddel	Haspel
Spezifischer Strombedarf kWh*(100 m ³ *h) ⁻¹	2,00	0,61	0,68	0,41	0,75	0,59	1,50	1,18
Installierte Leistung kW*100 m ⁻³	2,99	0,74	2,13	0,55	1,78	1,75	1,95	2,17
Auslastung %	67	83	32	74	42	34	77	54

[§] TMP: Tauchmotor-Propeller

Betrachtet man den volumenspezifischen Strombedarf und die Auslastung der installierten Rührwerksleistung unterschiedlicher Rührwerkstypen, so ergibt sich für die Pilotanlagen kein klares Bild (Tab. 22). Das Haspelrührwerk der Anlage E erscheint im Vergleich der Haspelrührwerke eher knapp dimensioniert. Auch das Zentralrührwerk der Anlage B arbeitete nahe an seiner Leistungsgrenze. Anlage C verfügt über eine großzügig dimensionierte spezifische Rührwerksleistung, die nur zu etwa einem Drittel ausgelastet wurde.

Als Anhaltspunkt für die Abschätzung des Wertebereiches der Viskosität der strukturviskosen Gärgemische in landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird häufig der TM-Gehalt herangezogen. Für die Pilotanlagen war kein klarer Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen TM-Gehalt im Gärgemisch in der ersten Prozessstufe und dem gemessenen spezifischen Strombedarf der Rührwerke erkennbar (Abb. 62). Das Zentralrührwerk erwies sich für den vergleichsweise sehr hohen TM-Gehalt in Anlage B als sehr effizient.

Betrachtet man die Aufteilung des Strombedarfs von sechs Pilotanlagen, so waren in fünf Fällen die Rührwerke die größten Stromverbraucher. Die einzige Ausnahme war Anlage C, die wie bereits mehrfach erwähnt durch einen sehr geringen Röhrenergiebedarf auffiel (Tab. 23). Der Anteil des Feststoffeintrags am Strombedarf war hingegen bei allen Anlagen vergleichsweise unbedeutend (Tab. 23).

Tab. 23: *Prozentuale Aufteilung des Strombedarfs für sechs Pilotanlagen*

ID Anlage		A	C	F	G	H	I
Feststoffeinbringung	%	7,3	5,4	5,8	1,3	4,2	0,9
Rührwerke	%	68,8	11,4	43,3	43,3	38,9	47,0
BHKW, Peripherie, Pumpen	%	23,9	83,1	50,9	50,3	56,8	52,2

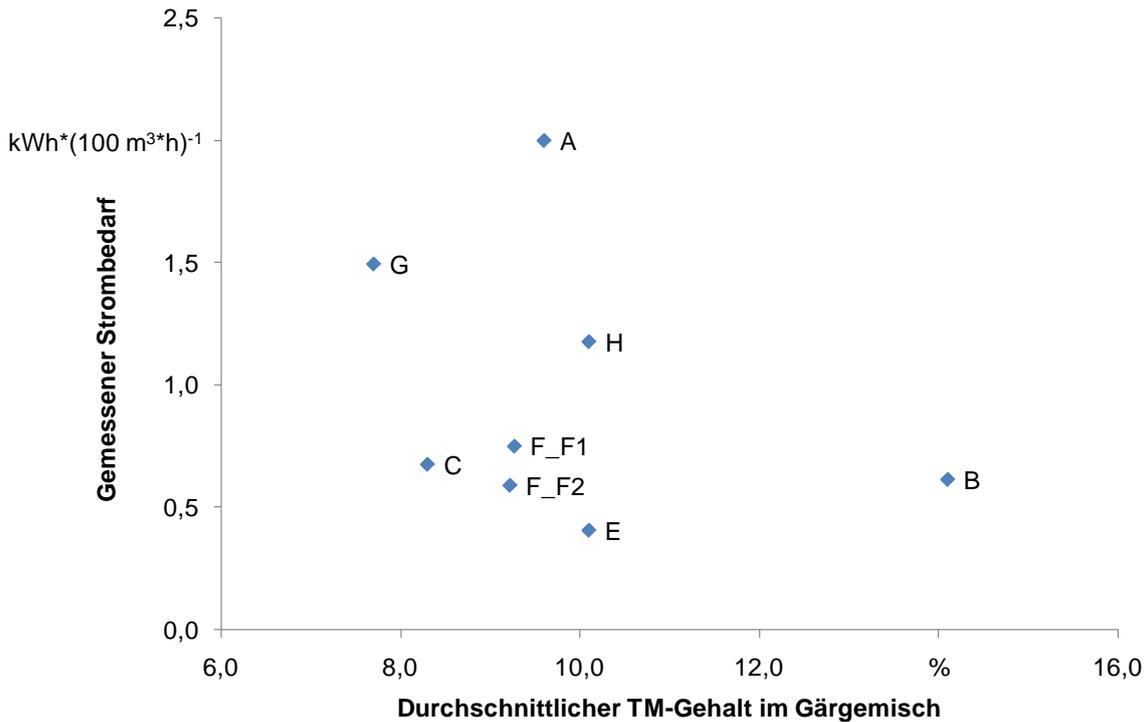


Abb. 62: Durchschnittlicher TM-Gehalt im Gärgemisch und gemessener Strombedarf der Rührwerke in der ersten Prozessstufe der Pilotanlagen

5.1.2.5 Wärmebedarf der Biogasanlagen

Der Wärmebedarf der Biogasanlagen setzt sich aus dem Bedarf für die Erwärmung der Einsatzstoffe (v. a. des enthaltenen Wassers) und für die Aufrechterhaltung der Gärtemperatur zusammen. Der für die Beheizung der Gärbehälter erforderliche Anteil der BHKW-Wärme streute für acht Pilotanlagen von 4,3 bis 25,6 % (Tab. 24).

Tab. 24: Wärmebedarf der Pilotanlagen im Verhältnis zur BHKW-Wärme und spezifischer Wärmebedarf (Mittelwerte)

ID Anlage		A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Wärmebedarf Fermenter	%	10,3	4,3	n.v.	n.v.	25,6	13,9	12,6	20,1	n.v.	23,3	21,4	n.v.
Gär-raum-spezif. Wärmebedarf [§]	kWh*m ⁻³	197	58,2	n.v.	n.v.	875	445	322	469	n.v.	156	400	n.v.
Substrat-spezif. Wärmebedarf [§]	kWh*t ⁻¹	41,7	11,6	n.v.	n.v.	110	78,5	54,9	64,9	n.v.	40,4	62,2	n.v.

[§] bezogen auf das Nutzvolumen Fermenter; [§] bezogen auf den Frischmasse-Eintrag

Bei Anlage B machte sich beim gär-raum-spezifischen Wärmebedarf das günstige Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Hauptgärbehälters bemerkbar. Das andere Extrem stellte Anlage D dar. Hier tauchten die auf thermophilem Temperaturniveau betriebenen Fermenter in den Grundwasserstrom ein.

5.1.2.6 Nutzungsgrad BHKW

Der Gesamtnutzungsgrad BHKW wurde wie folgt berechnet:

$$\frac{\text{Bruttostrom} - \text{Strombedarf Biogasanlage} + \text{Wärmeabsatz}}{\text{Feuerungsenergie Methanertrag}}$$

Der Wärme-Absatz entspricht dabei der extern verwerteten Wärme, die nach EEG mit einem Bonus auf die äquivalente Stromproduktion vergütet wird. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Pilotanlagen gab es hierbei noch keine weitergehenden Bestimmungen bezüglich der Art der Wärmenutzung. Das EEG 2009 formuliert als Anspruchsvoraussetzungen für den sogenannten KWK-Bonus (Anlage 3 EEG 2009), dass „eine Wärmenutzung im Sinne der Positivliste Nr. III vorliegt oder die Wärmenutzung nachweislich fossile Energieträger (...) ersetzt und die Mehrkosten, die durch die Wärmebereitstellung entstehen, nachweisbar sind und mindestens 100 Eur pro Kilowatt Wärmeleistung betragen“.

Während des Beobachtungszeitraums wurde auf einzelnen Pilotanlagen die Wärme zeitweise für Zwecke verwendet, die nicht den oben genannten Anforderungen an eine effiziente und umweltschonende Wärmeverwertung entsprachen. Da diese Wärmemengen jedoch nicht getrennt erfasst werden konnten, ist die Vergleichbarkeit der Gesamtnutzungsgrade der BHKW auf den Pilotanlagen hinsichtlich der tatsächlich sinnvollen Nutzung der Wärme eingeschränkt.

Der Anteil des oben definierten Wärmeabsatzes an der verfügbaren BHKW-Wärme betrug für die Pilotanlagen soweit verfügbar zwischen 2,1 und 60 % (Tab. 25). Anlagen A und B hatten demnach praktisch keine Nutzungsmöglichkeiten für die Wärme aus dem BHKW. Bei Anlage I ist für den Nutzungsanteil der Wärme zu berücksichtigen, dass hier das BHKW über keinen Abgaswärmetauscher verfügte, so dass die verfügbare BHKW-Wärme entsprechend geringer ausfiel.

Tab. 25: Für die Pilotanlagen ermittelter Nutzungsanteil des Wärmeabsatzes und Gesamtnutzungsgrad BHKW in Prozent (Mittelwerte)

ID	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Nutzungsanteil Wärmeabsatz [§]	2,8	2,1	n.v.	n.v.	37,9	50,3	58,0	19,3	n.v.	39,7	60,0	n.v.
Gesamt-Nutzungsgrad	30,4	30,0	51,8	65,2	49,4	49,0	58,2	42,2	n.v.	54,8	42,8	42,4

§ Anteil des Wärmeabsatzes an der nicht für die Fermenterbeheizung benötigten BHKW-Wärme

Die berechneten Gesamtnutzungsgrade bezogen auf den Heizwert des Methan-Normertrags betragen für die Pilotanlagen 30,0 bis 65,2 % (Tab. 25). Anlage B erreichte hier den letzten Rang, da dort praktisch keine Wärmenutzung erfolgte und zugleich der Strombedarf der Biogasanlage mit Abstand am höchsten war. Die Erzielung eines hohen Gesamtnutzungsgrades über das gesamte Jahr hinweg erfordert ein mehrgliedriges Wärmenutzungskonzept, wie es auf den Anlagen C/C* und F verwirklicht ist. Näheren Aufschluss hierzu geben die Verläufe der Wärmenutzung der einzelnen Pilotanlagen, die bei Lehner et al. (2009) diskutiert werden.

5.2 Treibhausgasbilanz und kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen

Im Vergleich zum fossilen Referenzsystem sparen alle Biogasanlagen erhebliche Mengen an klimaschädlichen Emissionen ein (Abb. 63). Die Einsparungen betragen zwischen 539 (Anlage H) und 910 g CO₂-Äquivalente je eingespeiste kWh_{el.} (Anlage E). Ohne Berücksichtigung der fossilen Referenz für die Strombereitstellung ergeben sich Werte von -85 g CO₂-Äq.*kWh_{el.}⁻¹ (Anlage E) bis 286 g CO₂-Äq.*kWh_{el.}⁻¹ (Anlage H; Abb. 64).

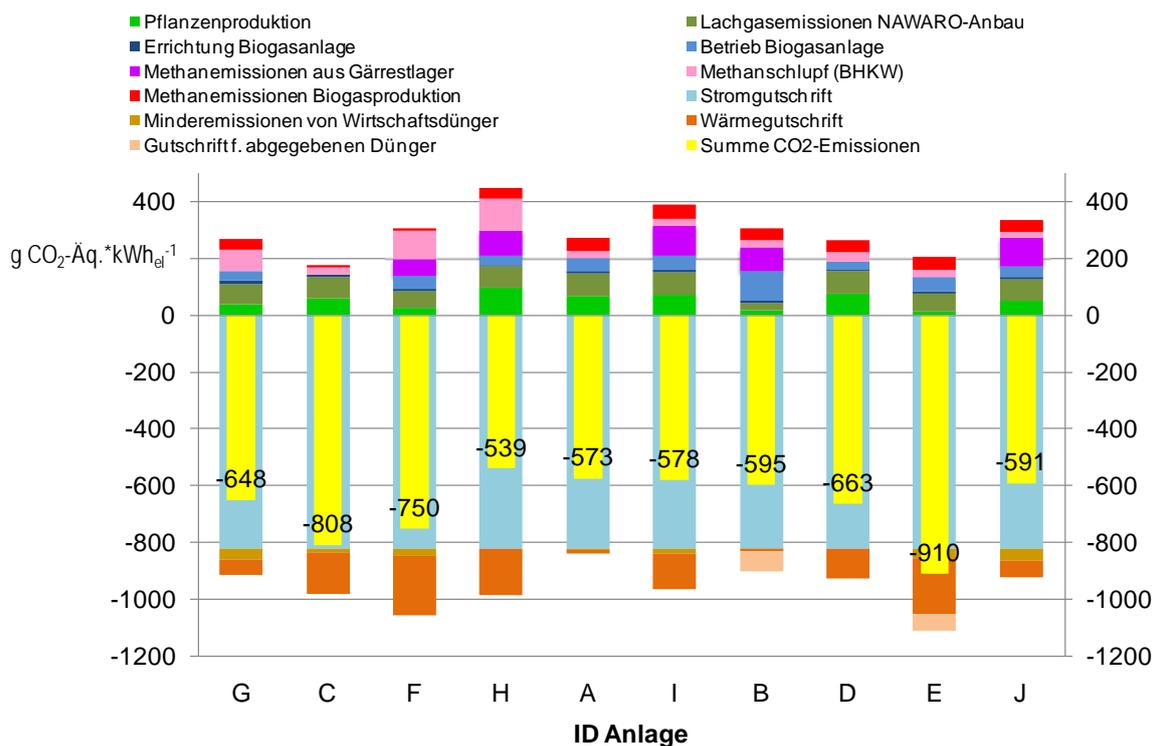


Abb. 63: Treibhausgasbilanz der Stromproduktion aus Biogas auf den Pilotbetrieben inkl. Gutschrift für Stromspeisung (g CO₂-Äq.*kWh_{el.}⁻¹)

Auch der kumulierte Energieaufwand lag bei den betrachteten BGA erheblich niedriger als bei der fossilen Referenz. Die Einsparungen betragen zwischen 2,29 und 2,93 kWh_{fossil}*kWh_{el.}⁻¹ (Abb. 65). Im Folgenden werden die Ergebnisse auf Basis der gegen Null bilanzierten Daten diskutiert, da hierbei die Unterschiede zwischen den Anlagen deutlicher hervortreten (Abb. 64 und Abb. 66).

Anlage A verursachte zwar relativ wenig direkte Methanemissionen, erhielt jedoch nur sehr geringe Gutschriften für den Einsatz von Rindergülle und Geflügelkot und die verfügbare BHKW-Wärme wurde nur zu einem sehr kleinen Anteil genutzt. Daraus resultiert auch ein vergleichsweise hoher KEA (Abb. 66).

Anlage B war durch hohe Emissionen aus dem Betrieb auf Grund des hohen Stromverbrauchs gekennzeichnet. Der Anbau der NAWARO erfolgte ohne zusätzliche mineralische Dünger, was die Emissionen in diesem Bereich stark reduziert. Durch den Einsatz großer Mengen Kleegrassilage konnte Gärrest an Marktfruchtbetriebe abgegeben werden. Hierfür wurde eine Gutschrift vergeben. Wirtschaftsdünger wurden nur in geringem Maße einge-

setzt, die BHKW-Wärme konnte kaum extern genutzt werden. In Summe ergab sich daraus der ungünstigste KEA-Wert der Pilotanlagen (Abb. 66).

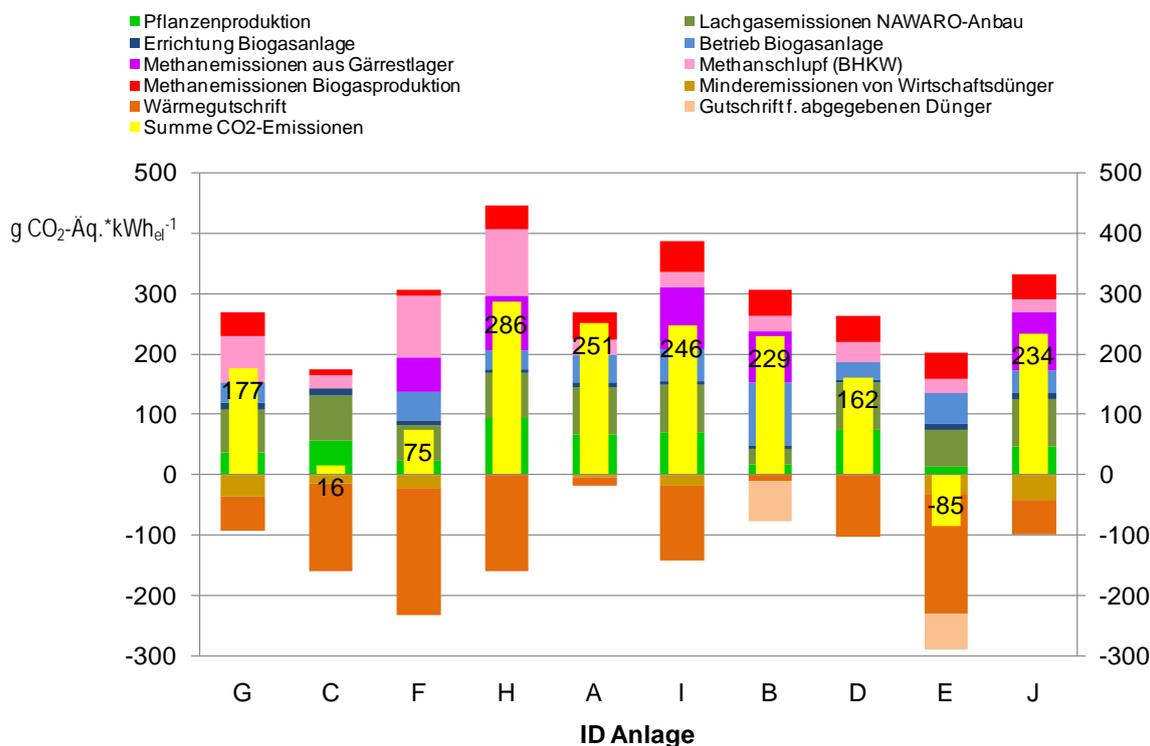


Abb. 64: Treibhausgasbilanz der Stromproduktion aus Biogas auf den Pilotbetrieben ohne Gutschrift für Stromeinspeisung (g CO₂-Äq.*kWh_{el}⁻¹; „Null-Szenario“)

Anlage C verursachte mit 16 g CO₂-Äq.*kWh_{el}⁻¹ die zweitgeringsten THG-Emissionen (Abb. 64). Die Anlage bezog keine Energie aus dem Stromnetz, der Anlagenbedarf wurde vollständig vom BHKW gedeckt (Überschusseinspeisung). Die direkten Methanemissionen waren aufgrund eines emissionsarmen BHKW und einer Gasfackel auf sehr niedrigem Niveau. Die hohe Gutschrift für die genutzte Abwärme kompensierte die entstehenden Emissionen fast komplett. Pro eingespeister kWh_{el} wurden 0,42 kWh fossile Energien eingespart.

Anlage D verursachte im Vergleich der Pilotanlagen die höchsten THG-Emissionen aus der NAWARO-Produktion und erhielt eine mittelhohe Gutschrift für die Wärmenutzung. Hier war ein außerplanmäßiger Düngerzukauf zu veranschlagen, da sich der Landwirt nach einem Starkregenereignis entschlossen hatte, einen Teil der Flächen nachzudüngen. Insgesamt ergaben sich THG-Emissionen in eher ungünstiger Höhe, der KEA lag im Mittelfeld.

Anlage E vermied THG-Emissionen in Höhe von 85 g CO₂-Äq.*kWh_{el}⁻¹. Durch den Einsatz eines hohen Anteils an Geflügelkot konnten pflanzliche NAWARO eingespart werden. Zum Anbau wurde kein zusätzlicher mineralischer Stickstoffdünger eingesetzt. Zudem konnte die verfügbare Wärme zu einem großen Anteil genutzt werden. Die Anlage wies mit einem Wert von -0,62 kWh_{fossil}*kWh_{el}⁻¹ auch den günstigsten KEA auf (Abb. 66).

Anlage F setzte ähnlich wie Anlage E größere Mengen an Geflügelkot ein. Hierdurch verringerten sich der Bedarf an pflanzlichen NAWARO und der Zukauf von mineralischem

N-Dünger. Hinzu kam eine hohe Gutschrift für die effiziente Wärmeverwertung. Die Anlage verfügte zudem über eine Gasfackel, so dass auch die direkten Methanemissionen aus der Biogasanlage als gering angenommen werden konnten. Allerdings wies das BHKW einen auffallend großen Methanschluß auf. Zusätzlich waren Emissionen aus dem Gärückstand zu veranschlagen, der nach Separation offen gelagert wurde, wobei lediglich die Emissionen aus der flüssigen Phase berücksichtigt wurden. Beim KEA folgte die Anlage hinter Anlage E.

Für **Anlage G** wurde ebenfalls ein hoher Methanschluß ermittelt, hinzu kamen Emissionen aus dem Zündöleinsatz. Die Wärme konnte nur zu einem Teil genutzt werden. In Summe ergaben sich vergleichsweise hohe THG-Emissionen von $177 \text{ g CO}_2\text{-Äq}\cdot\text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$ und ein KEA in gleicher Höhe wie der für Anlage A.

Anlage H verursachte die höchsten spezifischen THG-Emissionen mit einem Wert von $286 \text{ g CO}_2\text{-Äq}\cdot\text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$. Die hohen Methanemissionen aus der Pflanzenproduktion, der Biogasanlage, dem Gärrestlager und dem BHKW konnten durch die Wärme-gutschrift und die Verwendung von Strom aus einer eigenen Wasserkraftanlage nicht wettgemacht werden. Das BHKW wies zudem einen vergleichsweise hohen Zündölverbrauch auf. Der KEA lag ebenfalls auf ungünstigem Niveau (Abb. 66).

Für **Anlage I** und **J** ergaben sich ähnliche THG-Emissionen auf vergleichsweise hohem Niveau. Beim KEA hingegen errechnete sich ein deutlicher Unterschied.

Wie aus Abb. 67 hervorgeht, waren THG-Emissionen und KEA für die Pilotanlagen zwar eindeutig positiv korreliert. Es zeigte sich jedoch auch eine beträchtliche Streuung.

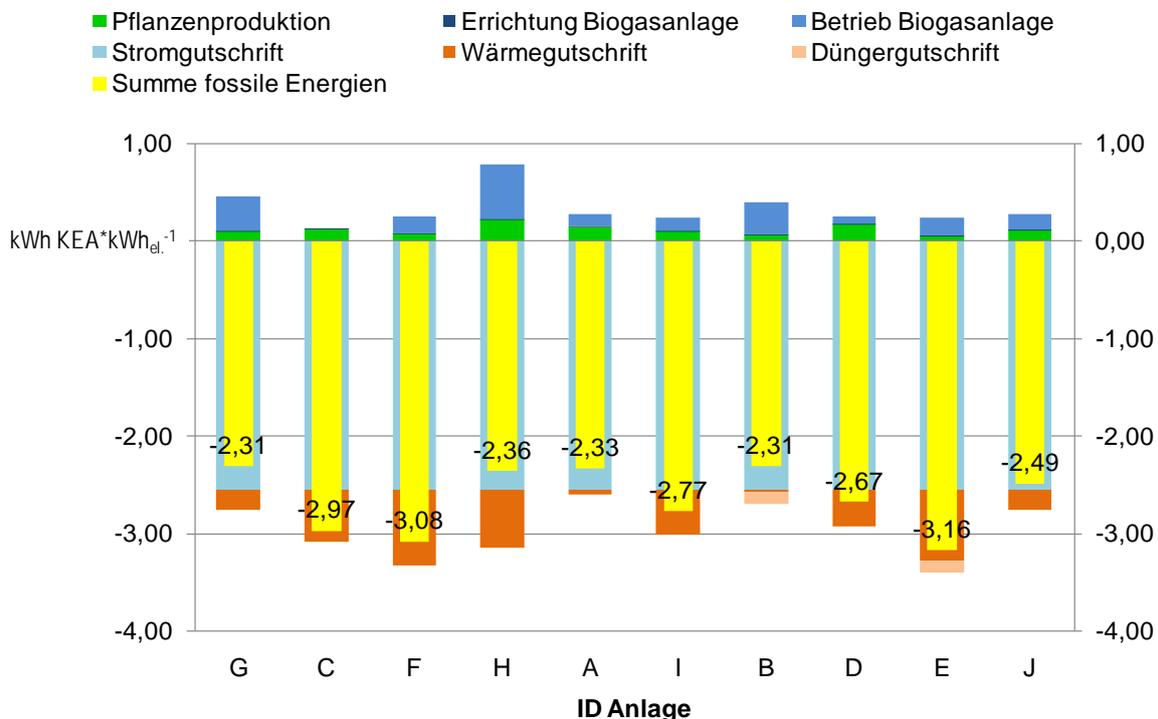


Abb. 65: Kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen inkl. Gutschrift für Stromeinspeisung ($\text{kWh KEA}\cdot\text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$)

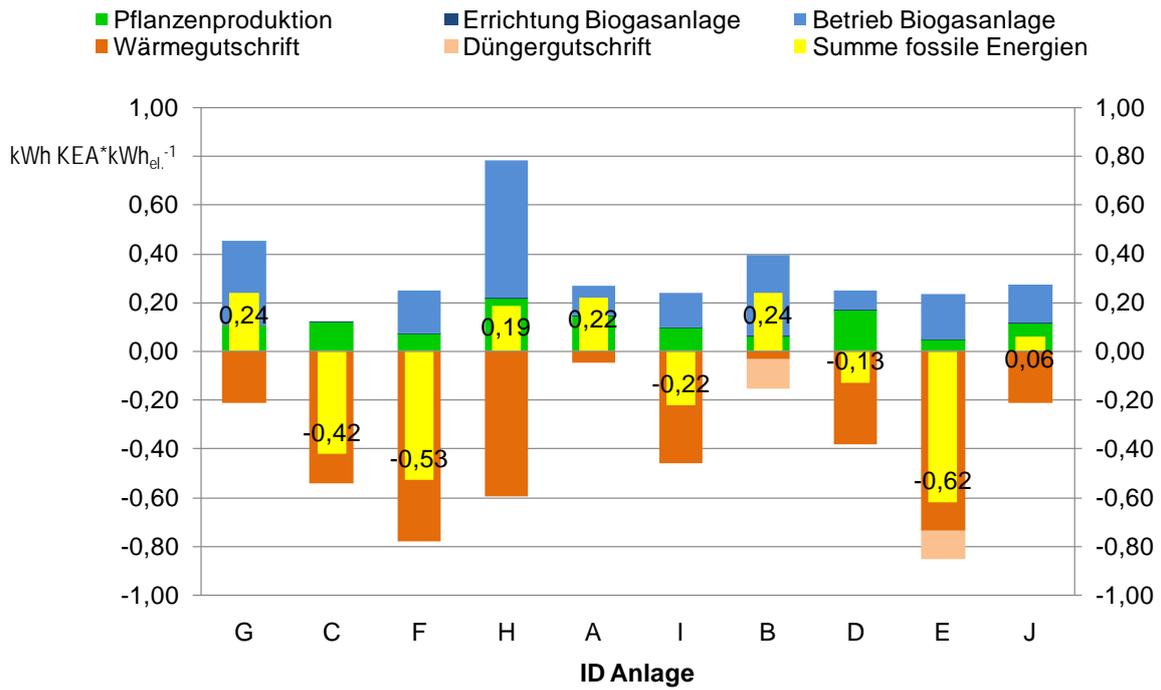


Abb. 66: Kumulierter fossiler Energieaufwand der Pilotanlagen ohne Gutschrift für Stromeinspeisung ($kWh\ KEA \cdot kWh_{el.}^{-1}$; „Null-Szenario“)

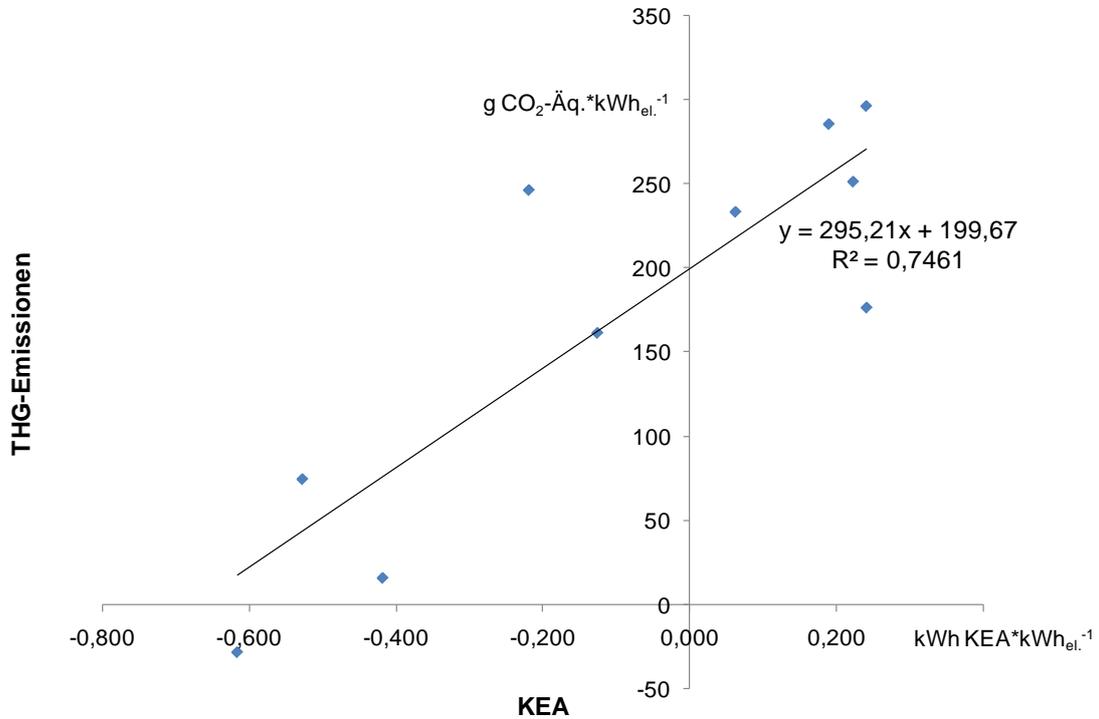


Abb. 67: THG-Emissionen ($g\ CO_2\text{-}\ddot{A}q. \cdot kWh_{el.}^{-1}$) aufgetragen über KEA ($kWh \cdot kWh_{el.}^{-1}$) der Pilotanlagen

5.3 Aspekte der Düngung (Lfl-Agrarökologie)

5.3.1 Qualität der Gärückstände

Die Ergebnisse der Gärrestuntersuchungen zeigten einen weiten Schwankungsbereich der untersuchten Parameter sowohl zwischen den Betrieben als auch auf Betriebsebene (Tab. 26). Diese große Streuung ist nicht nur durch die verschiedenen Einsatzstoffe und Einsatzmengen zu erklären, sondern spiegelt auch stark variierende Bedingungen in den Fermentern wider. Große betriebsinterne Schwankungen der Gärrestzusammensetzung deuten daher auch auf Unregelmäßigkeiten oder Umstellungen im Betriebsverlauf der Anlage hin.

Tab. 26: Ergebnisse der Gärrestuntersuchungen der Pilotanlagen (Mittelwerte und Minimal-/Maximalwerte)

ID		Anzahl Proben		TS [%]		N ges [kg*m ⁻³]		NH ₄ [kg*m ⁻³]		P ₂ O ₅ [kg*m ⁻³]		K ₂ O [kg*m ⁻³]	
		2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
G	MW	5 (15)	3 (9)	6,8	6,4	5,4	5,0	3,7	3,4	2,9	2,0	5,2	4,7
	Min.			6,5	5,9	5,2	4,9	3,3	3,2	2,4	1,4	4,6	3,9
	Max.			7,3	6,8	5,7	5,2	4,0	3,5	3,2	3,0	5,8	5,6
C	MW	2 (6)	3 (7)	6,2	6,4	3,5	5,0	2,0	2,5	1,7	1,3	4,6	4,9
	Min.			3,3	5,4	2,6	4,0	1,7	2,3	1,0	0,7	3,7	4,3
	Max.			9,4	7,5	4,2	6,3	2,3	2,8	2,3	2,0	5,4	6,0
F	MW	2 (3)	1 (3)	4,9	5,7	7,4	7,0	5,6	4,6	4,7	4,3	7,4	6,4
	Min.			4,1	5,5	7,0	6,9	5,3	4,5	3,3	4,0	5,9	6,1
	Max.			5,8	5,9	7,7	7,1	5,9	4,7	6,0	4,8	8,8	6,6
H	MW	3 (8)	-	7,4	-	4,7	-	2,4	-	2,0	-	6,3	-
	Min.			5,1	-	4,4	-	2,0	-	1,4	-	5,6	-
	Max.			9,5	-	5,0	-	2,7	-	2,6	-	7,7	-
A	MW	2 (4)	4 (10)	6,1	7,4	4,0	4,5	2,3	2,6	2,0	1,9	6,1	5,4
	Min.			5,6	7,0	3,9	4,1	2,1	2,3	1,6	1,5	5,5	4,9
	Max.			6,8	7,6	4,1	5,0	2,3	2,9	2,2	2,1	6,6	6,2
I	MW	6 (11)	5 (9)	5,1	4,8	6,5	7,7	4,6	5,8	2,2	1,9	3,5	2,8
	Min.			3,9	3,8	5,1	5,8	3,1	4,3	1,9	1,1	3,2	2,0
	Max.			6,0	6,0	7,9	9,1	6,0	6,8	2,6	2,3	4,2	3,6
B	MW	2 (6)	2 (6)	4,7	11,9	3,4	5,9	2,2	3,5	1,3	2,5	3,1	9,8
	Min.			3,2	8,9	3,2	5,4	2,0	3,2	0,9	1,7	2,8	6,9
	Max.			6,2	13,2	3,7	6,3	2,3	3,9	1,8	3,0	3,3	10,9
D	MW	4 (9)	2(6)	6,0	6,0	3,7	3,7	2,1	2,2	1,6	1,8	4,6	5,0
	Min.			2,9	5,3	2,4	3,4	1,5	2,1	0,9	1,4	2,9	4,7
	Max.			7,7	7,0	4,3	4,0	2,5	2,3	2,1	2,3	5,7	5,4
E	MW	1 (1)	2 (6)	9,0	5,4	5,5	7,3	3,6	5,4	4,8	3,2	5,4	6,3
	Min.				4,5		6,7		5,0		2,4		6,0
	Max.				6,5		7,9		5,8		4,3		6,5
J	MW	2 (6)	6 (13)	9,5	8,7	6,9	6,9	4,6	4,7	3,4	2,8	5,9	6,1
	Min.			8,8	6,8	6,6	6,3	4,1	4,1	2,7	1,6	5,5	4,3
	Max.			9,9	10,2	7,3	7,8	4,9	5,2	4,2	4,9	6,5	7,1

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass es aufgrund der sehr unterschiedlichen Verhältnisse in Biogasanlagen keine allgemein gültigen „Faustzahlen“ wie für die Nährstoffgehalte tierischer Ausscheidungen geben kann, die es vergleichbaren Betrieben ermöglichen würden, eine sinnvolle und effiziente Düngeplanung zu erstellen. Notwendigerweise wird jede Anlage eigene Untersuchungsergebnisse verwenden müssen. Bisher galt dabei die Meinung, dass bei weitgehend konstanter Substratzufuhr eine Untersuchung pro Jahr ausreichend ist. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass auch innerhalb einer Anlage während des Jahres erhebliche Schwankungen auftreten können. Es ist daher sinnvoll, zu jedem der Hauptausbringtermine eine Gärrestuntersuchung durchzuführen. Als Beispiel sei eine Ausbringmenge von 30 m³ mit einem TS-Gehalt von 6,8 bzw. 10,2 % genannt. Die ausgebrachten NH₄-Mengen unterscheiden sich dabei um 33 kg NH₄/ha, die ausgebrachte N-Gesamtmenge um 45 kg N/ha. Diese Differenzen sind zu hoch, um eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Düngeplanung durchführen zu können. Aus diesen Differenzierungen erklären sich u. U. auch Berichte der Pilotbetriebe und anderer Praxisbetriebe über die unterschiedliche Düngewirkung von Biogasgärresten.

Im Durchschnitt der zwei Jahre entsprachen die wertgebenden Inhaltsstoffe der Gärreste den in der Literatur beschriebenen (Tab. 2). Der TS-Gehalt nahm im Vergleich zu unvergorenen Rinder- und Schweinegülle ab, der schnell verfügbare Ammoniumanteil nahm zu: im Durchschnitt der Pilotbetriebe auf 65 % des Gesamtstickstoffgehalts. Allerdings war auch hier eine große Streuung von 50 bis 74 % zu erkennen. Es wäre interessant zu klären, ob daraus auch Rückschlüsse auf die Gärbiologie und die Effizienz der Biogasanlage gezogen werden können.

Tab. 27: Nährstoffgehalte in den Gärresten aus den Pilotanlagen

Probenbeschreibung	TS %	pH kg*m ⁻³	NH ₄ kg*m ⁻³	oTM kg*m ⁻³	N ges. kg*m ⁻³	P ₂ O ₅ kg*m ⁻³	K ₂ O kg*m ⁻³
Gesamtmittel	6,7	7,9	3,6	49,7	5,5	2,5	5,5
Min.	2,9	7,3	1,5	20,8	2,4	0,7	2
Max.	13,2	8,6	6,8	93,8	9,1	6	10,9

Drei der teilnehmenden Betriebe trennten den Gärrest durch Separierung in eine flüssige und eine feste Phase. Hierfür sprechen verschiedene Gründe wie geringere Lagerkapazitäten oder günstigere Transportmöglichkeiten. In Tab. 28 sind die Untersuchungsergebnisse sowohl des Ausgangsmaterials als auch der daraus entstehenden flüssigen und festen Phasen aufgeführt.

Die Separierung führte in der festen Phase zu einer Erhöhung des TS-Gehaltes auf durchschnittlich 23,4 % und einer Anreicherung der organischen Substanz sowie des Phosphatgehaltes. Überraschend war, dass der Stickstoffgehalt in der festen Phase fast gleich hoch wie im Ausgangsmaterial und in der flüssigen Phase war. Erwartet wurde auch ein niedriger Ammoniumstickstoffgehalt. Mit durchschnittlich 44 % wurde jedoch in der festen Phase fast ein N:NH₄-Verhältnis wie in Rindergülle erreicht. Diese Ergebnisse, die durch weitere Untersuchung aus anderen Praxisbetrieben bestätigt wurden, lassen für die feste Phase eine etwas langsamere bzw. verzögerte Düngerwirkung wie bei Rindergülle erwarten. Die Feldversuche im Folgeprojekt werden hierüber Aufschluss geben.

Tab. 28: Nährstoffgehalte separierter Gärrückstände aus den Pilotanlagen (Mittelwerte)

ID		TS	pH	NH ₄	oTM	N ges.	P ₂ O ₅	K ₂ O
		%	-	kg*m ⁻³	kg*m ⁻³	kg*m ⁻³	kg*m ⁻³	kg*m ⁻³
F	Ausgangsmaterial	5,2	8,2	5,3	34,3	7,3	4,5	7,1
	Flüssige Phase	4,3	8,2	3,4	28,9	5,1	2,5	4,8
	Feste Phase	21,8	8,7	2,8	191,3	7,8	7,8	5,4
H	Ausgangsmaterial	7,4	7,9	2,4	57,5	4,7	2	6,3
	Flüssige Phase	6,8	8,2	2,5	49,7	6,9	1,8	7,5
	Feste Phase	23,5	8,5	2,2	216,7	5,0	2,0	6,7
E	Ausgangsmaterial	6,6	8,2	4,8	46,1	6,7	3,7	6
	Flüssige Phase	6,7	8,4	5,6	43,1	8,1	4,2	8,2
	Feste Phase	25,1	8,7	4,1	223,9	7,5	5,2	6,1
Ø	Ausgangsmaterial	6,4	8,1	4,2	46,0	6,2	3,4	6,5
	Flüssige Phase	6,0	8,3	3,8	40,6	6,7	2,8	6,8
	Feste Phase	23,4	8,6	3,0	210,6	6,8	5,0	6,1

Festgehalten werden kann, dass die festen separierten Gärreste aufgrund des hohen Anteils an verfügbarem Stickstoff nicht in der durch die Düngeverordnung festgelegten Sperrfrist ausgebracht werden können. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist die Separierung aus pflanzenbaulicher Sicht für einen Betrieb, der die Gärreste auf den eigenen Flächen verwerten kann, nicht zu empfehlen. Die verzögerte und schwer kalkulierbare Stickstofffreisetzung aus der festen Phase wird zur Ertragsabsicherung immer den Einsatz von mineralischen Ergänzungsdüngern erfordern. In Abhängigkeit vom Gärrestanfall kann es dann Probleme bereiten, die Nährstoffbilanz ausgeglichen zu gestalten. Werden Gärreste abgegeben und müssen diese über weitere Strecken transportiert werden, ist die Separierung eine kostenmindernde Alternative.

5.3.2 Nährstoffbilanzen

Für neun der Pilotbetriebe wurde nach den Vorgaben der Düngeverordnung vom Januar 2006 ein Nährstoffvergleich auf Flächenbasis für die Kalenderjahre 2006 und 2007 erstellt. Ein Betrieb lieferte nur unvollständige Daten und konnte daher nicht bilanziert werden. Ziel der Nährstoffbilanzierung ist es, einen Überblick über die dem Betrieb bzw. der Fläche zugeführten bzw. abgeführten Nährstoffe zu gewinnen. Bewegt sich die Bilanz innerhalb bestimmter Grenzen sind gravierende Fehler bei der Düngung kaum zu erwarten. Hohe Bilanzüberschüsse weisen auf eine Nährstoffanreicherung der Böden hin, die bei Biogasanlagen auch dadurch verursacht sein kann, dass die Nährstoffe zugekaufter Substrate nicht auf die Ausgangsflächen zurückgebracht wurden.

Nach der Düngeverordnung ist davon auszugehen, dass bei Überschreiten der in Tab. 29 aufgeführten Bilanzwerte kein bedarfsgerechter Einsatz erfolgt ist. Im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung sind jedoch auch mehrjährige, stark negative Salden bedenklich, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass unvermeidbare Nährstoffverluste bei Stickstoff (durchschnittlich 30 kg pro ha und Jahr) bei der Bilanzberechnung nicht berücksichtigt werden und durch die Überschüsse abgedeckt werden müssen.

Tab. 29: Obergrenzen für den betrieblichen Nährstoffüberschuss nach Düngeverordnung

Stickstoff im Durchschnitt der letzten 3 Düngejahre		Phosphat im Durchschnitt der letzten 6 Düngejahre
2006 bis 2008	90 kg pro ha und Jahr	20 kg pro ha und Jahr
2007 bis 2009	80 kg pro ha und Jahr	oder im Durchschnitt der Bodenuntersuchung nicht mehr als 20 mg P ₂ O ₅ je 100 g Boden (CAL) 3,6 mg P je 100 g Boden (EUF)
2008 bis 2010	70 kg pro ha und Jahr	
2009 bis 2011	60 kg pro ha und Jahr	

Im Durchschnitt der Betriebe lagen die Ergebnisse des Nährstoffvergleiches bei Stickstoff weit unter den Zielvorgaben der Düngeverordnung für die Jahre 2009 bis 2011 (Tab. 30). Einzelne Betriebe überschreiten den Zielwert von 60 kg pro ha derzeit noch. Grund dafür ist der Zukauf von Stickstoff über Mineraldünger bei gleichzeitigen hohen Gärrestausbringmengen. Bei einer Optimierung des Gärresteinsatzes müsste es u. E. möglich sein, die Grenzen einzuhalten. Ein Betrieb setzt zur Nährstoffversorgung seiner Flächen nur Gärreste aus der eigenen Anlage ein, bedingt durch die bei der Saldoberechnung berücksichtigten Ausbringverluste zeigt der Saldo negative Werte.

Tab. 30: Auswertung der Nährstoffsalden von neun Pilotbetrieben

	N [kg*ha ⁻¹]		P ₂ O ₅ [kg*ha ⁻¹]		K ₂ O [kg*ha ⁻¹]	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Zufuhr Ø	236	252	101	100	193	235
Min.	102	167	64	58	46	133
Max.	355	422	143	149	255	420
Abfuhr Ø	196	206	79	84	203	211
Min.	153	145	66	48	92	109
Max.	255	367	101	138	295	433
Bilanz Ø	39	46	22	16	-10	24
Min.	-51	-22	-2	-19	-50	-51
Max.	100	68	42	51	54	169

Bei Phosphat wurden die Grenzwerte von 20 kg pro ha und Jahr im Durchschnitt des Jahres 2007 knapp unterschritten, einzelne Betriebe lagen jedoch erheblich darüber. Ursache dürfte in den meisten Fällen eine (überzogene) Unterfußdüngung zu Mais gewesen sein. Nachdem im Kreislauf eines Biogasbetriebes keine Verluste für Phosphat auftreten, muss und kann eine mineralische Ergänzung sehr stark reduziert werden, wenn sich die Böden bereits in der optimalen Versorgungsstufe befinden.

Auffallend war die große Schwankungsbreite bei Kalium. Betriebe mit hohen Überschüssen setzten auch kalihaltigen Mineraldünger ein. Hier bestehen noch Möglichkeiten zur Einsparung. Der bei einigen Betrieben auffallend hohe negative Saldo dürfte durch einen hohen Maisanteil in der Fruchtfolge mit entsprechend hohen Kalientzügen verursacht sein. Wird Gärrest an andere Betriebe abgegeben, kann dieser Entzug nicht durch die Gärsterrückführung ausgeglichen werden. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden,

dass die Pilotbetriebe nach den vorgelegten Daten sehr verantwortungsvoll mit den Gärresten umgingen und einen Großteil der mit zugekauften Substraten importierten Nährstoffe wieder abgaben.

5.3.3 Beurteilung der Düngewirkung der Gärrückstände

Die Wirkung der Gärreste wurde von den Betriebsleitern in Abhängigkeit vom Standort, der Jahreswitterung und den Kulturen sehr unterschiedlich beurteilt. Die Ursachen dafür konnten nicht immer geklärt werden und sind Inhalt eines weiteren Forschungsprojektes. Als Grundvoraussetzungen für eine gute Nährstoffverwertung vor allem des Stickstoffs sind zwei wesentliche Punkte zu nennen: Zum Einen ist eine ausreichende Homogenisierung des Gärrestes notwendig. Diese kann besonders in großen Endlagern Probleme bereiten und erfordert einen hohen technischen Aufwand und großen Zeitbedarf. Zum anderen ist eine verlustarme, bodennahe Ausbringung bei entsprechenden Witterungsbedingungen notwendig, um das im Vergleich zu tierischen Wirtschaftsdüngern durch den höheren Ammoniumanteil und pH-Wert gesteigerte Risiko von Stickstoffverlusten auszugleichen.

6 Einordnung der Ergebnisse

Eine Zielsetzung des Projektes der wissenschaftlichen Begleitung von Pilot-Biogasanlagen in Bayern war es, besonders vorbildliche Biogasbetriebe zu dokumentieren. Gleichzeitig konnte der tatsächliche Betriebserfolg der ausgewählten Anlagen nicht vorweggenommen, sondern erst auf Basis der umfangreichen Datenaufnahme bewertet werden. Bei einer Einordnung des Leistungsniveaus der Pilotanlagen ergibt sich die Schwierigkeit, dass Daten vergleichbarer Qualität für eine größere Stichprobe von Biogasanlagen kaum verfügbar sind. Als eine relativ gute Vergleichsbasis bieten sich am ehesten die Ergebnisse aus dem Bundesmessprogramm Biogas II (BMP II) an (Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2009). Für Bayern liegen repräsentative Stammdaten aus einer Umfrage zu allen Biogasanlagen im Jahr 2006 vor (LfL, 2007). Darüber hinaus hat Hölker (2008) Daten einer sehr umfangreichen Stichprobe von Biogasanlagen in ganz Deutschland vorgelegt, die allerdings von eingeschränkter Genauigkeit sind.

Zu Beginn des Projektes lag das Spektrum der elektrischen BHKW-Leistung der Pilotanlagen bei lediglich 250 bis 380 kW. Der Durchschnitt der 2.680 Biogasanlagen in Deutschland im betreffenden Jahr 2005 lag bei 243 kW_{el} (Fachverband Biogas, 2007). Für Bayern lag im selben Jahr der Durchschnitt der installierten elektrischen BHKW-Leistung der 1.021 Anlagen bei 182 kW_{el}. Dies spiegelt klar den Trend einer zunehmenden Anlagengröße seit Einführung des EEG wider. Im Verlauf des Projekts wurde auf zwei der Pilotanlagen die installierte elektrische Leistung deutlich erhöht, so dass zum Ende der Datenaufnahme das Spektrum bei 250 bis 630 kW lag. Auch dies liegt im Trend der letzten Jahre.

Mit vier von sechs Anlagen, die regulär keine tierischen Exkremente einsetzten, waren die „NAWARO-Anlagen“ im Vergleich zur Umfrage 2006 überrepräsentiert. Dies war aus Sicht des Forschungsinteresses durchaus begrüßenswert und auch zu erwarten, da vorwiegend neuere Anlagen ausgewählt wurden. Mais- und Grassilage waren bei den Pilotanlagen im Durchschnitt die dominierenden nachwachsenden Rohstoffe.

Die Pilotanlagen wiesen zu Projektbeginn ein spezifisches Fermenter-Nutzvolumen bezogen auf die installierte elektrische Leistung von 4,0 bis 12,0 m³*kW_{el}⁻¹ auf, zum Projektende betrug diese Streuung nurmehr 5,8 bis 10,1 m³*kW_{el}⁻¹ (Tab. 31). Im Vergleich zu den Daten des BMP II waren die Pilotanlagen damit eher großzügig dimensioniert. Hier wurde für 56 % der 60 untersuchten Biogasanlagen ein spezifisches Arbeitsvolumen von kleiner oder gleich 6 m³*kW_{el}⁻¹ angegeben (Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2009).

Tab. 31: Spezifischer Gärraum (Fermenter-Nutzvolumen) bzw. spezifische installierte elektrische Leistung der Pilotanlagen

Anlage ID		A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Spezif. Gärraum	m ³ *kW _{el} ⁻¹	9,4	9,5	12,0	7,8	6,1	7,4	7,8	5,8	4,0	7,7	5,8	10,1
Installierte spezif. Leistung	kW _{el} *m ⁻³	0,11	0,13	0,10	0,17	0,21	0,14	0,14	0,18	0,37	0,14	0,30	0,11
Erreichte spezif. Leistung	kW _{el} *m ⁻³	0,11	0,11	0,08	0,13	0,16	0,14	0,13	0,17	0,25	0,13	0,17	0,10

Ausgedrückt als spezifische installierte elektrische Leistung ergibt sich für die Pilotanlagen ein Spektrum von 0,10 bis 0,37 kW_{el}*m⁻³. Tatsächlich erreicht wurden aber nur 0,08 bis 0,25 kW_{el}*m⁻³ (Tab. 31). Die Differenz entspricht der erzielten Arbeitsausnutzung des BHKW.

Die durchschnittlichen Gesamtraumbelastungen der Pilotanlagen, die alle als mehrstufig einzuordnen sind lagen zum Ende des Projektes bei 1,3 bis 3,1 kg oTM*(m³*d)⁻¹ und damit auf niedrigem bis höherem Niveau (vgl. Abb. 45). Der Durchschnitt mehrstufiger Anlagen im BMP II lag bei 2,2 kg oTM*(m³*d)⁻¹. Für die folgenden Vergleiche bleibt zu berücksichtigen, dass ca. 30 % der Anlagen im BMP II einstufig waren.

Die mittlere Prozesstemperatur lag bei 7 der 10 Pilotanlagen bei 40 bis 43°C und damit im Vergleich zum BMP II, wo die Mehrzahl der Anlagen bei 38 bis 40°C betrieben wurde, etwas höher. Hinzu kamen zwei Anlagen im thermophilen Temperaturbereich oberhalb 50°C. Ein Einfluss der Prozesstemperatur auf die Prozessstabilität oder Kennwerte der Biogasproduktion war für die Pilotanlagen insgesamt nicht erkennbar.

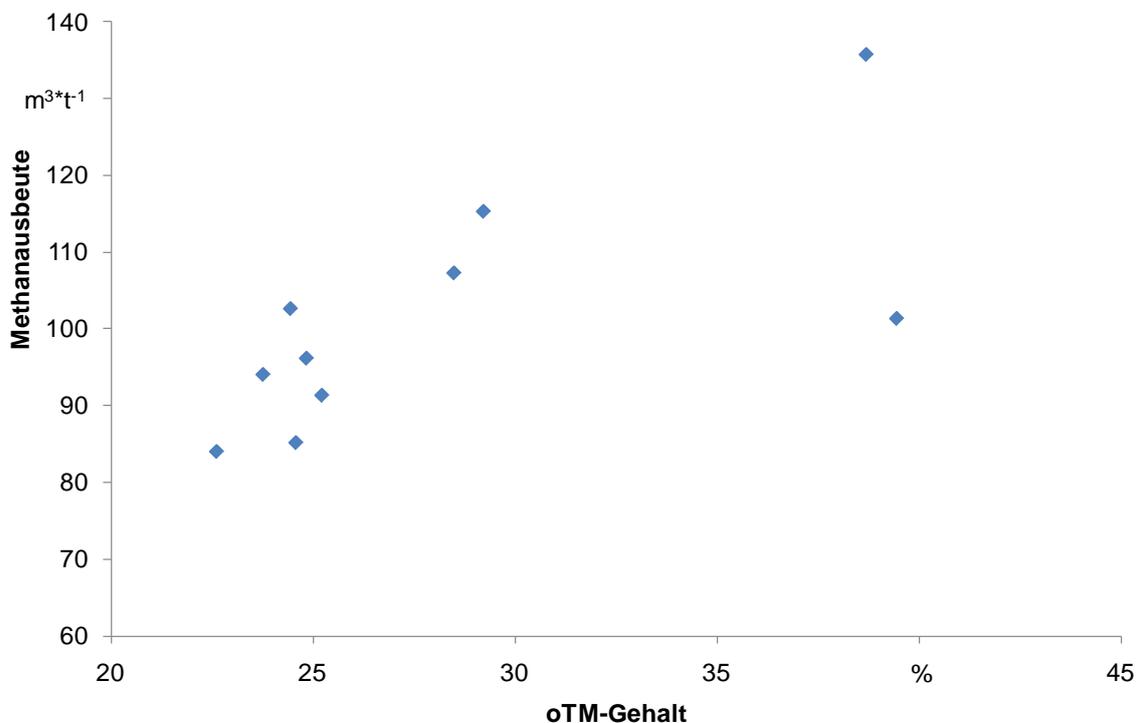


Abb. 68: Methanausbeute bezogen auf die Frischmasse aufgetragen über dem durchschnittlichen oTM-Gehalt des Frischmasse-Eintrags

Die für die Pilotanlagen ermittelten Biogas- bzw. Methanausbeuten liegen mit 162 bis 258 m³*t⁻¹ bzw. 84 bis 136 m³*t⁻¹ allesamt in einem realistischen Bereich. Wie erwähnt, übertrafen die gemessenen Biogasausbeuten die nach Futterwertmodell prognostizierten Ausbeuten in neun von zehn Fällen deutlich.

Die auf den Frischmasse-Eintrag bezogene Methanausbeute ist mit dem oTM-Gehalt der eingetragenen Frischmasse positiv korreliert (vgl. Abb. 68). Dabei fällt die Anlage F deutlich aus dem Zusammenhang heraus. Demnach war die Verdaulichkeit der oTM der Substratration in dieser Anlage unterdurchschnittlich bzw. der Abbau gehemmt. Die Gründe hierfür konnten nicht abschließend geklärt werden.

Die Methanproduktivität der Pilotanlagen wies mit Werten von 0,5 bis 1,5 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ eine Spannweite von 3 auf. Zum Projektende lag die Methanproduktivität lediglich in zwei Anlagen knapp unter 0,7 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, die Hälfte der Anlagen erreichte einen Wert von über 0,9 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ (vgl. Tab. 16). Sie lagen damit im Vergleich zum BMP II im oberen Bereich.

Da in diesem Bericht vorwiegend der Betriebserfolg der Anlagen im Mittel über den gesamten jeweiligen Beobachtungszeitraum verglichen wurde, sind die Beobachtungen zu den Prozessindikatoren von geringerer Bedeutung. Anlagen, in denen es während der wissenschaftlichen Begleitung zu einer längerfristigen Destabilisierung des Gärprozesses kam, waren anhand der größeren Streuung der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren und des FOS/TAC-Wertes zu identifizieren. Bei der Gesamtkonzentration an FFS war die Streuung aussagekräftiger als der Mittelwert. Das Verhalten des FOS/TAC-Wertes war unter den Anlagen schlechter vergleichbar, schien also spezifisch für die einzelne Anlagen zu sein.

Die vorgeschlagenen Richtwerte der Prozessindikatoren für einphasige Verfahrensführung im Rührkesselreaktor waren eingeschränkt anwendbar, um Anlagen mit Stabilitätsproblemen zu identifizieren. Die beste Treffsicherheit hatten hier die Werte für die längerkettigen Fettsäuren Propionsäure und iso-Buttersäure (vgl. Abschn. 5.1.1.10).

Sechs der zwölf ausgewerteten Anlagen bzw. Ausbaustufen erzielten gemessen an den Ergebnissen des BMP II eine überdurchschnittlich gute Arbeitsausnutzung des BHKW, eine weitere Anlage lag im noch tolerierbaren Bereich. Oberhalb einer spezifischen installierten elektrischen Leistung von 0,25 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$ fiel die Auslastung so deutlich ab, dass bei den betreffenden zwei Anlagen eine technologische Begrenzung zu erkennen war. In den übrigen drei Fällen resultiert die mangelhafte Auslastung tatsächlich aus längerfristigen Problemen im Betrieb.

Der ermittelte Anteil des Strombedarfs der Biogasanlagen an der Brutto-Stromproduktion zeigt eine große Bandbreite von 3,7 bis 17,4 % bei einem Mittelwert von 8,8 % (vgl. Tab. 21). Das BMP II ermittelte für 60 Biogasanlagen entsprechende Werte von 5,0 bis 20,6 % bei einem Mittelwert von 7,9 %.

In einer Studie zum Stromeigenverbrauch von 35 Biogasanlagen in Deutschland wurde eine Streuung des Stromeigenbedarfs von 3,5 bis 17,5 % bei einem Mittelwert von 8,2 % ermittelt (Solarenergieförderverein Bayern, 2006). Diese Angaben stammten aus Umfragen unter den Anlagenherstellern und Betreibern und wurden lediglich in sechs Fällen durch Messungen verifiziert. Die berücksichtigten Anlagen wiesen Bemessungsleistungen von 100 bis 780 kW_{el} auf, wobei der Stromeigenbedarf proportional zur Bemessungsleistung anstieg. Ein solcher Zusammenhang ist bei den Bayerischen Biogas-Pilotanlagen nicht erkennbar. Ebenso ist bei den Bayerischen Pilot-Biogasanlagen während des ausgewerteten Zeitraums keine Abhängigkeit des prozentualen Stromeigenbedarfs vom Ausnutzungsgrad nachweisbar.

In sechs Fällen lag der substratspezifische Strombedarf der Pilotanlagen über dem Durchschnitt der BMP II-Anlagen von 26,3 $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ (vgl. Tab. 21). Während der absolute und substratspezifische Strombedarf der Rührwerke in allen Fällen den Strombedarf des Feststoffeintrags deutlich übertraf, war die Streuung über alle Anlagen bei beiden Komponenten erheblich. Beim Feststoffeintrag war hierfür weniger die Mischtechnik als vielmehr die Förderhöhe entscheidend. Bei den Rührwerken zeigten sich deutliche Unterschiede im Strombedarf verschiedener Rührwerkstypen, die prinzipiell mit den Befunden des Solarenergiefördervereins Bayern (2006) übereinstimmen, wonach schnell laufende Rührwerke

für die Durchmischung von NAWARO-Gärsuspensionen unter energetischen Gesichtspunkten nicht zu empfehlen sind.

Der durchschnittliche prozentuale Wärmebedarf von acht Pilotanlagen lag mit 14,5 % im Vergleich zum BMP II (11,5 %) etwas höher. Der spezifische Wärmebedarf bezogen auf das Nutzvolumen der Fermenter streute mit einem Faktor von ca. 15 deutlich mehr als der substratspezifische Wärmebedarf.

Die Befunde bezüglich des Nutzungsgrades der verfügbaren BHKW-Wärme ähneln denen im BMP II. Da die Wärmemengen für einzelne Verwertungswege nicht in allen Fällen getrennt gemessen werden konnten, sind die Nutzungsgrade wegen der unterschiedlichen energetischen Effizienz der Wärmenutzung nur eingeschränkt vergleichbar. Nutzungsgrade größer 40 % erfordern ein mehrgliedriges Verwertungskonzept, um saisonale Bedarfschwankungen aufzufangen. Die auf den Pilotanlagen ermittelten Gesamt-Nutzungsgrade des Biogases von ca. 30 bis 65 % zeigen, dass hier noch ein enormes Potential besteht, die Effizienz der Biogasverwertung zu steigern. Die Nutzungsgrade reduzieren sich weiter, wenn der Bilanzrahmen auf die gesamte Prozesskette einschließlich der Biomassebereitstellung ausgeweitet wird.

7 Schlussfolgerungen und weiterführende Arbeiten

Die ausführliche Darstellung der Konfiguration und des erzielten Betriebserfolgs der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen zeigen, dass mit der Auswahl an Anlagen ein breites Spektrum an Verfahrenskonzepten erfasst wurde und überwiegend gute Betriebsergebnisse erzielt wurden. Die auf den Anlagen festgestellten Defizite liefern wichtige Hinweise zu möglichen kritischen Verfahrensschritten. Weitergehende Informationen zu Eingriffsmöglichkeiten bei Problemen im Anlagenbetrieb lieferten die Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen“, die in einem gesonderten Abschlussbericht abgehandelt werden (Lehner et al., 2009).

Wie der vorliegende Bericht zeigt, erfordert die Ermittlung zuverlässiger Kennzahlen des Betriebserfolgs von Biogasanlagen einen erheblichen Investitions- und Zeitaufwand. Untersuchungen mit vergleichbarer Datentiefe dürften nach wie vor rar sein. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass auch die hier vorgelegten Daten mit Messunsicherheiten belegt sind. Als besonders kritische Punkte sind die Probenahme und die Wägung der Einsatzstoffe, die Probenahme aus dem Gärrückstand sowie die Messung des Methanertrags zu nennen. Im Zweifelsfall sollten daher Kennzahlen verwendet werden, die weniger unsichere Messwerte enthalten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Genauigkeit der Daten nicht nur vom Messprinzip, sondern auch von der Wahl des Messortes abhängig ist. Beispielsweise ist die Ermittlung des exakten BHKW-Stroms keineswegs trivial. Für die zehn Pilotanlagen ergaben sich zehn verschiedene Konfigurationen der Verschaltung relevanter Komponenten. Da die vorhandene Dokumentation nicht immer vollständig war, war eine gründliche Erkundung der Installation vor Ort erforderlich.

Um überhaupt einen zuverlässigen Vergleich der Kennzahlen verschiedener Herkunft zu ermöglichen, sind eindeutige Definitionen dieser Kennzahlen auf der Grundlage eines Bilanzmodells der Verfahrenskette der Biogasproduktion und –verwertung unverzichtbar. Die grundlegenden Arbeiten hierzu wurden in einem vorausgegangenen Projekt gelegt (s. Strobl & Keymer, 2009). Dem vorliegenden Bericht wurde ein Glossar angefügt, in dem die wichtigsten Begriffe definiert sind. Vorschläge für die Modellierung landwirtschaftlicher Biogasanlagen und die Festlegung von Kennzahlen wurden von Strobl et al. (2006) vorgelegt.

Die Begleitung der Pilotanlagen über die vergangenen drei Jahre hat gezeigt, dass die Verhältnisse auf einer Biogasanlage nicht statisch sind, sondern sich in Abhängigkeit zahlreicher Faktoren wandeln. Dies schloss meist auch mehr oder weniger große bauliche Änderungen mit ein. Vor allem die Betreiber der jüngeren Anlagen durchliefen in dieser Zeit eine bemerkenswerte Lernkurve. Auf der Hälfte der Pilotanlagen wird die wissenschaftliche Begleitung fortgesetzt werden. Hierfür wurden diejenigen Betriebe ausgewählt, die das größte Entwicklungspotential aufzuweisen scheinen oder auf denen besonders interessante bauliche oder technische Änderungen anstehen.

Da sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Biogasproduktion mittlerweile wieder geändert haben und die Datengrundlage zum Betriebserfolg landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern verbreitert werden soll, wurden fünf neue Biogasanlagen für ein Monitoring ausgewählt (Projekttitle: „Monitoring und Innovationsbewertung auf Praxisanlagen“). Auf diesen Anlagen wurde im Juli 2009 mit der Datenaufnahme begonnen. Darüber hinaus werden auf weiteren Anlagen einzelne Verfahrensschritte einer genaueren Analyse unterzogen („Teil-Monitoring“). Alle Daten der alten und neuen Pilotanlagen werden

in einer Datenbank am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL abgelegt und können dort anlagenspezifisch ausgewertet werden.

Ein langfristiges Ziel ist es, diese Datenbank zu einer Anlagendatenbank für Bayern auszubauen und ihre Funktionalität dahingehend zu ergänzen, dass eine vergleichende Auswertung des Betriebserfolgs unterschiedlicher Biogasanlagen nach Art eines „Benchmarking“ möglich wird. Die ersten Entwicklungsschritte in diese Richtung werden im laufenden Projekt „Benchmarksystem für Biogasanlagen“ unternommen.

8 Veröffentlichungen

Stand: Februar 2009

- Bachmaier, J., A. Gronauer (2007): Klimabilanz von Biogasstrom, LfL-Information, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising, 12 Seiten
- Bachmaier, J., M. Effenberger, A. Gronauer (2007a): Ökobilanz der energetischen Nutzung von Biogas aus Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen. 8. Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung“, 8.-10. Oktober 2007, Bonn, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), ISBN 978-3-939371-41-0: 204-209
- Bachmaier, H., M. Effenberger, A. Gronauer (2007b): Klimaschutzpotentiale von Biogasstrom. 16. Symposium Bioenergie, 22./23. November 2007, Kloster Banz, Bad Staffelstein, OTTI, Regensburg, ISBN 978-3-934681-62-0: 218-222
- Effenberger, M., E. Kraensel, A. Lehner, A. Gronauer, J. Simon (2007): Biogas-Pilotanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben - Dokumentation, LfL-Information, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising, 21 Seiten
- Kissel, R., A. Lehner, M. Effenberger, A. Gronauer (2007): Messprogramme auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen, LfL-Information, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising, 17 Seiten
- Bachmaier, H., M. Effenberger, A. Gronauer (2008): Landwirtschaftliche Biogasproduktion: Stimmt die Klimabilanz? Tagungsband zur 17. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V.: „Biogas – effizient und verlässlich“, 15.-17. Januar 2008, Nürnberg: 61-65
- Bachmaier, H., M. Effenberger, A. Lehner, A. Gronauer (2008a): Klimabilanz von Praxis-Biogasanlagen. „Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger“, KTBL-Vortragstagung, 8./9. September 2008, Aschaffenburg. KTBL-Schrift 11468, Darmstadt, ISBN 978-3-939371-68-7: 194-200
- Bachmaier, H., M. Effenberger, A. Lehner, A. Gronauer (2008b): Klimabilanz von Praxis-Biogasanlagen. VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 64, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, ISBN 978-3-941273-05-4: 100-107
- Effenberger, M., R. Kissel, A. Lehner, A. Gronauer (2008): Verfahrenstechnische Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen – Auslastung und energetische Effizienz. Landtechnik 5/2008: 290-292
- Lehner, A., M. Effenberger, R. Kissel, A. Gronauer (2008): Verfahrenstechnische Kennzahlen der Bayerischen Biogas-Pilotbetriebe. In: Neue Perspektiven für Biogas, LfL-Schriftenreihe 12/2008, ISSN 1611-41-59 : 23-34
- Effenberger, M., A. Lehner, A. Gronauer (2009): Energetische Effizienz landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Tagungsband zur 18. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V.: „Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen“, 03.-05. Februar 2009, Hannover: 113-120

Literaturverzeichnis

- Aschmann, V. (2009): Methan-, Stickoxid- und Kohlenmonoxidemissionen von Biogas-Blockheizkraftwerken. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising (unveröffentlicht)
- Bouwman, A. (1996): Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 53-70
- Bundesministerium für Umwelt (2007): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Berlin
- DBFZ (2008): Stand der Biogastechnik - Entwurf vom 15.10.2008. Deutsches Biomasse-ForschungsZentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig
- DIN (2006a): Umweltmanagement – Ökobilanz: Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN (2006b): Umweltmanagement – Ökobilanz: Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Edelmann, W., K. Schleiss, H. Engeli (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Studie im Auftrag des: Bundesamt für Energie. Arbeitsgemeinschaft Bioenergie (arbi), Baar, Schweiz
- Effenberger, M., F. Kaiser, R. Kissel, A. Gronauer (2007): So klappt's auch mit der Biologie. *Biogas Journal* 4/07: 16-17
- Effenberger, M., M. Lebuhn (2008): Biologie der Methangärung - die Belastungsgrenzen erkennen. *Mais* 2/2008, *mais special* 2008: 4-7
- Fachverband Biogas (2007): Biogasnutzung in Deutschland – Entwicklung von 1992 – 2007. Fachverband Biogas e.V., Freising
- Fachverband Biogas (2008): Jährlicher Zubau von Biogasanlagen in Deutschland in Abhängigkeit der jeweils geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen – Entwicklung 1992 – 2009. Fachverband Biogas e.V., Freising
- FNR (2005a): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- FNR (2005b): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- FNR (2008): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- FNR (2009): Biokraftstoffe – Eine vergleichende Analyse. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- Fraunhofer UMSICHT (2008): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz – Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Ergänzte und aktualisierte Fassung vom 12.09.2008, Version 4.15, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen

- Hartmann, K. (2007): Life-cycle-assessment of industrial scale biogas plants. Dissertation, Georg August Universität Göttingen
- Hölker, U. (2008): Gerüchteküche schließen. Biogas Journal 4/08: 22-29
- Hölker, U. (2009): Temperatur der Biogasanlage. Dr. Udo Hölker, Bioreact GmbH, Mülheimer Str. 26, Troisdorf, [<http://www.biogas-wissen.de>] 23.06.2009 14:10
- Hopfner-Sixt, K. (2005): Analyse von Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Entwicklungsperspektiven landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien: 219 S.
- Hub, M. (2007): Erneuerbare Energien – der Königsweg aus der Klimakatastrophe? Oder: "Lehne dich nicht zurück im schönen Schein der Öko-Bilanz!" Das Beispiel Biogas. Forum Geoökologie (18): 32–38
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (2009): Bundesmessprogramm zur Bewertung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen: Abschlussbericht, FNR-FKZ: 22003405, Braunschweig, Januar 2009
- Jungmeier, G., L. Canella, J. Spitzer, R. Stiglbrunner (1999): Treibhausgasbilanz der Bioenergie - Vergleich der Treibhausgasemissionen aus Bioenergie-Systemen und fossilen Energiesystemen. Institut für Energieforschung, Graz, Österreich
- KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 13. Aufl. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Münster
- KTBL (2006): Energiepflanzen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- KTBL (2008): Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft - mit Internetangebot. 21. Aufl. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt
- KTBL (2009): Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden. KTBL-Heft 84, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt
- Kusch, S. (2007): Methanisierung stapelbarer Biomassen in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentationsanlagen. Dissertation, Fakultät Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim. Herbert Utz Verlag, München, 2007, ISBN 978-3-8316-0723-5
- Lehner, A., M. Effenberger, A. Gronauer (2009): Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising, Juli 2009
- LfL (2007): Biogasanlagen in Bayern 2006 – Ergebnisse einer Umfrage. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising, Mai 2007
- LfU (2007): Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Stand Juli 2007, Augsburg
- Möller, K., G. Leithold, J. Michel, S. Schnell, W. Stinner (2006): Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe. Abschlussbericht an die DBU, AZ 15074, Gießen

- Müller, J. (2005): Mikrogasturbine – Alternative zum herkömmlichen BHKW? Technik und zukünftige Chancen. BioEnergie-Tagung, 20.09.2005, Eichhof [<http://www.mikrogasturbine.de/diplomarbeiten/2005Bioenta.pdf>] 04.06.2009 16:54
- Nacke, T., Barthel, A., Haendly, D., Beckmann, D., Göller, A. und Vogelei, S. (2008): Inline-Mikrowellen-Prozesssensorik zur Bestimmung des Trockenmasseanteils im Biogasfermenter. In: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow, 2008: 32-57
- Öko-Institut (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie (Hrsg.), Freiburg – Darmstadt – Berlin, Dezember 2004, ISBN 3-934490-20-4
- Ottow, C. G., W. Bidlingmaier (Hrsg.): *Umweltbiotechnologie*. G. Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm 1997
- Pölking, A., B. Stiepel, M. Premke-Kraus, J. Will, S. Lüdtko (2006): Bioenergie und Biogasförderung nach dem neuen EEG und ihre Auswirkungen auf Natur und Landschaft. Agropplan, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Wolfenbüttel
- Reinhold, G. (2005): Genau bilanzieren – Masse- und Trockensubstanzabbau in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Neue Landwirtschaft* 12(2005): 68-72
- Röhling, I., G. Wild (2008): Biogasproduktion in Bayern 2007. *top agrar* 10/2008
- Saaty, T. L. (1986): Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32(7): 841-855
- Schöftner, R., K. Valentin, B. Schmiedinger, S. Trogisch, M. Haberbauer, K. Katzlinger, W. Schnitzhofer und N. Weran: Best Biogas Practise - Monitoring und Benchmarks zur Etablierung eines Qualitätsstandards für die Verbesserung des Betriebs von Biogasanlagen und Aufbau eines österreichweiten Biogasnetzwerks. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 45/2007, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 1030 Wien, Österreich
- Scholwin, F., J. Michel, G. Schröder, M. Kalies (2006): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. FKZ 220114303 (03NR143), Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig
- Solarenergieförderverein Bayern (2006): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. München, November 2006, URL: <http://www.sev-bayern.de>
- Strobl, M., U. Keymer, H. Bachmaier und M. Effenberger (2006): Bilanzierung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen - Energiegestehung aus Biogas Modellierung und verfahrenstechnische Kennzahlen. Arbeitspapier als Vorlage für die VDI 4631: Gütekriterien für Biogasanlagen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, München 2006
- Strobl, M. und U. Keymer (2006): Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Landtechnik* 5/2006: 266-267
- Strobl, M. und U. Keymer (2009): Technische und ökonomische Kenngrößen der Biogasproduktion. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (N05/19). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft,

- Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik, München, Mai 2009
- Umweltbundesamt (1999): Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version '99). Umweltbundesamt, Berlin
- Umweltbundesamt (2009): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009. Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar (1990-2007). Dessau
- VDLUFA (1997): Methodenbuch Band III, Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Mit 4. Ergänzungslieferung, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- Wendland, M. (2008): Düngung mit Gärrückständen, Nährstoffbilanzierung für Biogasbetriebe, Rechtsvorschriften aus dem Düngebereich. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Bodenschutz und Ökologischen Landbau, Freising
- Weiland, P. (2001): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. In: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial. Gülzower Fachgespräche: Band 15, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2001: 8-27
- Weiland, P. (2008): Wichtige Messdaten für den Prozessablauf und Stand der Technik in der Praxis. In: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2008: 17-31
- Wichern, M., Lübken, M., Koch, K., Gehring, T., Horn, H., Fischer, K., Schlattmann, M. und Gronauer, A. (2008): Eignung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1) zur Prozesssteuerung landwirtschaftlicher Biogasanlagen. In: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2008: 172-197
- Wilfert, R., M. Nill, A. Schattauer (2004): Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Abschlussbericht an die DBU, Projekt 15071, Leipzig

Glossar

Arbeitsvolumen; Das Arbeitsvolumen Fermenter kann synonym auch als Füllvolumen Fermenter oder Gärvolumen bezeichnet werden. Es ist das durch den aktuellen Betriebszustand bedingte Füllvolumen aller Fermenter. Das Arbeitsvolumen ist damit niemals größer als das →Nutzvolumen. Da das Arbeitsvolumen meist schwankt, wird für den Anlagenvergleich das Nutzvolumen herangezogen. Einheit: Kubikmeter [m³].

Arbeitsausnutzung BHKW; Verhältnis aus dem BHKW-Strom und dem Produkt aus →Nennleistung und →Nennzeit BHKW. Einheit der Kennzahl: [-]. Abgeleitete Einheit: Prozent [%]. Synonym: Auslastung.

Ausnutzungsdauer BHKW; Quotient aus dem BHKW-Strom und der jeweiligen installierten →Nennleistung. Sie gibt an, wie viele Betriebsstunden des BHKW bei →Nennleistung erforderlich sind, um den angegebenen BHKW-Strom zu produzieren. Einheit der Kennzahl: Stunden [h]. Synonym: Theoretische Volllaststunden.

BHKW-Strom; die elektrische Energiemenge, die vom BHKW im Betrachtungszeitraum nutzbar abgegeben wird. Sie entspricht dem →Brutto-Strom, vermindert um die verbrauchte elektrische Arbeit aller Hilfs- und Nebenanlagen dieses Blockheizkraftwerkes. Einheit: Kilowattstunden [kWh].

BHKW-Wärme; die thermische Energiemenge, die vom Blockheizkraftwerk an Sekundär-Wärmekreisläufe übergeben wird. Einheit: Kilowattstunden [kWh].

Biogasausbeute; Quotient aus dem →Biogas-Normertrag und dem Frischmasse- bzw. oTM-Eintrag in den/die Fermenter. Einheit: Norm-Kubikmeter je Tonne bzw. kg oTM [m³*t⁻¹] bzw. [m³*kg oTM⁻¹].

Biogasertrag; das Gasvolumen (im Betriebszustand), welches unmittelbar vor der Gasverwertung (z. B. BHKW) erfasst und im Betrachtungszeitraum verwertet wird. Einheit: Kubikmeter [m³].

Biogas-Normertrag; der auf Normbedingungen (0 % Relative Luftfeuchte, 0°C Gastemperatur, 1013,25 mbar Druck) umgerechnete →Biogasertrag. Einheit: Normkubikmeter [m³].

Biomasse; nicht fossile Energieträger aus Phyto- oder Zoomasse, einschließlich daraus resultierender Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus der Biomasse stammt.

Brutto-Grundfläche (BGF); diejenige Fläche, welche sich aus der Summe aller Grundflächen aller Grundrissebenen eines Gebäudes errechnet. Einheit: Quadratmeter [m²].

Brutto-Rauminhalt (BRI); der Rauminhalt eines Baukörpers, der durch die Unterfläche der konstruktiven Bauwerkssohle und die äußeren Begrenzungsflächen des Bauwerkes begrenzt wird. Einheit: Kubikmeter [m³].

Brutto-Strom; die an den Generatorklemmen abgegebene elektrische Arbeit. Einheit: Kilowattstunden [kWh].

Einphasig; finden alle vier Teilschritte der Methanbildung in einem Behälter statt, spricht man von einem einphasigen Verfahren.

Elektrischer Nutzungsgrad BHKW; das Verhältnis der erzeugten nutzbaren elektrischen Energie (→BHKW-Strom) zur Summe der zugeführten Brennstoffenergie (Feuerungsenergie). Einheit: [-]. Abgeleitete Einheit: Prozent [%].

Fermenter; mit →Substrat, → Gärgemisch, →Rezirkulat oder →Gär-Hilfsstoffen beschickter Behälter, in dem ein biologischer Abbau stattfindet. Synonym: Reaktor oder Gärbehälter (wobei nur der Hauptgärbehälter und der Nachgärbehälter als eigentliche Gärbehälter gelten). In der Praxis werden die Begriffe Fermenter und Hauptgärbehälter synonym verwendet, der Nachgärbehälter hingegen nicht als Fermenter bezeichnet.

Gärgemisch; im Fermenter befindliches Substrat einschließlich Gär-Hilfsstoffen und Rezirkulat in Mischung mit bakterieller Biomasse. Das G. ist ein dreiphasiges Fluid, bestehend aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen.

Gär-Hilfsstoffe; alle einem Gärbehälter zur Förderung der mikrobiologischen Abbauprozesse zugeführten Stoffe, die nicht Substrat sind und nicht von der Biogasanlage stammen (z. B. Wasser, Enzyme, Spurenelemente).

Gärrest; festes oder flüssiges Material, das nach der Vergärung verbleibt (vgl. VDI 4630, S5). Gärgemisch nach Verlassen des letzten Fermenters. Synonym: Gärrückstand.

Gärrestlager; Behälter oder Erdbecken, in dem →Gärrest vor der weiteren Nutzung und Verwertung gelagert wird. Gärrestlager werden von Fermentern beschickt. Ein G. kann ans Biogas führende System angeschlossen sein, dient aber nicht primär der Methanbildung. Der Füllstand unterliegt dabei über das Jahr gesehen starken Schwankungen. Behälter ohne Abdeckung, welche mit →Gärgemisch beschickt werden, sind definitiv als G. zu bezeichnen.

Gesamtnutzungsgrad BGA; das Verhältnis aus der Summe der erzeugten elektrischen Energie (→Brutto-Strom) abzüglich des elektrischen Strombedarfs aller Hilfs- und Nebenanlagen des BHKW und der BGA sowie der →BHKW-Wärme zur Summe der zugeführten Brennstoffenergie (Feuerungsenergie). Einheit: [-]. Abgeleitete Einheit: Prozent [%].

Gesamtnutzungsgrad BHKW; Summe des elektrischen und thermischen Nutzungsgrades des BHKW. Einheit: [-]. Abgeleitete Einheit: Prozent [%].

Heizwert; die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärme (thermische Energiemenge), bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge (im Normzustand). Der H. von Methan beträgt $9,97 \text{ [kWh}\cdot\text{m}^{-3}]$.

Hydraulische Verweilzeit; Quotient aus dem →Nutzvolumen des / der betrachteten →Fermenter und dem Frischvolumeneintrag. Voraussetzung zur Bildung dieser Kennzahl ist streng genommen, dass im Betrachtungszeitraum der Füllstand des / der Fermenter konstant ist. Einheit: Tage [d].

Methanausbeute; Quotient aus dem →Methan-Normertrag und dem Frischmasse- bzw. oTM-Eintrag in den/die Fermenter. Einheit: Norm-Kubikmeter je Tonne bzw. kg oTM [$\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$] bzw. [$\text{m}^3\cdot\text{kg oTM}^{-1}$].

Methanertrag; das Produkt aus dem →Biogasertrag und dem Methangehalt, wobei beide Kennzahlen im Betriebszustand erfasst werden. Einheit: Kubikmeter [m^3].

Methan-Normertrag; der auf Normbedingungen (0 % Relative Luftfeuchte, 0°C Gastemperatur, 1013,25 mbar Druck) umgerechnete →Methanertrag. Einheit: Normkubikmeter [m^3].

Methanproduktivität (Nutzvolumen); das Verhältnis des →Methan-Normertrags und des →Nutzvolumens der betrachteten Fermenter. Die M. gibt an, welches Normvolumen an

Methan täglich in einem Kubikmeter Nutzvolumen Fermenter gebildet wird. Einheit: Normkubikmeter je Kubikmeter und Tag [$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$].

Nennleistung (elektrisch); die von einem sich unter Nennbedingungen (Volllast) befindlichen BHKW erzeugte elektrische Leistung an der Abgabeseite des Generators, vermindert um den Leistungsbedarf aller betriebsnotwendigen Hilfs- und Nebenanlagen dieses Blockheizkraftwerkes. Die BHKW-N. gibt das Leistungspotential eines BHKW an, wird vom Hersteller bestimmt und auf dem Typenschild des BHKW angegeben. Einheit der Kennzahl: Kilowatt [kW].

Nennzeit; die Zeitspanne im Betrachtungszeitraum, während der das BHKW ans gasführende System sowie ans elektrische System angeschlossen ist. Einheit der Kennzahl: Stunde [h].

Nutzvolumen Fermenter; das Volumen, welches von einem Gärbehälter aus baulichen und technischen Gründen maximal aufgenommen werden kann. Es entspricht damit der technisch maximal erlaubten oder möglichen Füllmenge. Synonym: Nettovolumen Fermenter. Einheit: Kubikmeter [m^3].

Raumbelastung; Quotient aus dem Organischen Trockenmasseeintrag und dem Nutzvolumen des / der betrachteten →Fermenter. Einheit: Kilogramm je Kubikmeter und Tag [$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$].

Rezirkulat; nach Verlassen eines Gärbehälters in einen Gärbehälter zurückgeführtes (evtl. separiertes) →Gärgemisch oder rückgeführter →Gärrest.

Substrat; zur Vergärung in Biogasanlagen bestimmte Biomasse, welche über die Eintrags-technik in den →Fermenter eingebracht wird. Synonym: Einsatzstoffe.

Thermischer Nutzungsgrad BHKW; das Verhältnis der erzeugten nutzbaren thermischen Energie (→BHKW-Wärme) zur Summe der zugeführten Brennstoffenergie (Feuerungsenergie). Einheit: [-]. Abgeleitete Einheit: Prozent [%].

Wärmeabsatz; der an externe Nutzer abgegebene Anteil der →BHKW-Wärme. Einheit: Kilowattstunden [kWh].

Zweiphasig; wird die Hydrolyse, Versäuerung und Essigsäurebildung von der Methanbildung getrennt, bezeichnet man ein Verfahren als zweiphasig.

Anhang

- 1 Steckbrief zur Meldung von Kandidatenbetrieben
- 2 Muster der Vereinbarung mit den Betreibern der Pilot-Biogasanlagen für die Zusammenarbeit während der Dauer der wissenschaftlichen Begleitung
- 3 Lagepläne der Pilot-Biogasanlagen
- 4 Zusammenstellung der Kennwerte der Biogasproduktion und –verwertung für die Pilotanlagen
- 5 Verlauf der Wochensummen des Substrat-Eintrags für die einzelnen Anlagen
- 6 Analysendaten zu den Einsatzstoffen und Gärgemischen der einzelnen Pilotanlagen

Anhang 1: Anlagenspiegel zur Meldung von Kandidatenbetrieben

Bitte für jede als Pilotbetrieb vorzuschlagende Anlage die folgende Liste ausfüllen (Zutreffendes ankreuzen bzw. vorliegende Daten dokumentieren und Details beschreiben).

Inhaber: _____

Standort: _____

Inbetriebnahme (Jahr): _____

Hersteller/Planer: _____

Substrate/Einsatzstoffe:

Wirtschaftsdünger:

Gülle Festmist Trockenkot _____ m³/a

Schwein Rind Geflügel

Nachwachsende Rohstoffe:

_____ t / m³/a

Fermenter:

Bezeichnung: _____ *Volumen:* _____ m³

(Zuordnung unten) _____ m³

_____ m³

_____ m³

Geometrie: _____ zylindr., stehend _____ quaderförmig, liegend

_____ zylindr., liegend _____ Sonstiges _____

Material: _____ Edelstahl _____ Stahlbeton

Anordnung: in Reihe parallel betrieben

Prozesstemperatur: _____ °C

Durchsatz: ca. _____ m³/Tag

Gärrückstandslager:

Größe: _____ m³ Ausführung: offen _____ m³
 abgedeckt _____ m³
 mit Gaserfassung

Gasspeicherung:

Ausführung: im Fermenter integriert Fassungsvolumen: _____ m³
 extern Speicherkapazität: _____ Stunden

Gasaufbereitung:

Gastrocknung: über entsprechend verlegte Gasleitung
 externe Gaskühlung (z.B. Plattenwärmetauscher)

Entschwefelung: Lufteinblasung in den Fermenter
 externe Entschwefelungsanlage
 chem. Fällung (Eisenchlorid)
 Sonstiges

Schwefelgehalt (Reingas): _____ ppm

Gasproduktion: gemessen berechnet geschätzt
 _____ m³ Biogas/Tag
 _____ m³ Biogas/Jahr

Gaszusammensetzung:

CH₄-Gehalt (Vol.-%) _____ Mittel _____ Min/Max
 O₂-Gehalt (Vol.-%) _____ Mittel _____ Min/Max

Gasverwertung:

- El. Anschlussleistung:* _____ kW_{el.}
- Gasverwertung:*
- Zündstrahlmotor(en) _____ kW_{el.}
 - Gas-Otto-Motor(en) _____ kW_{el.}
 - Stirlingmotor _____ kW_{el.}
 - Mikrogasturbine _____ kW_{el.}
 - Brennstoffzelle _____ kW_{el.}
 - Einspeisung ins Erdgasnetz
 - Sonstiges _____

Volllaststunden der stromproduzierenden Einheit: _____ Stunden pro Jahr

Energieverwertung:

Wärmenutzung – /verwertung zur Versorgung von (Angabe der Anzahl und Art der mit Wärmeenergie versorgten Einheiten):

- Biogasanlage _____
- Wirtschaftsgebäuden _____
- Wohngebäuden _____
- Trocknungsanlagen _____
- Gartenbaubetrieben _____
- Industrieanlagen _____
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen _____
- Öffentlichen oder sozialen Einrichtungen _____
- Sonstigen Wärmenutzern _____

- Strom:*
- Einspeisung des gesamten produzierten Stroms
 - Anlagenversorgung und Netzeinspeisung
 - Versorgung des gesamten Betriebs und Netzeinspeisung
 - Sonstiges _____

Messtechnik:

- Gaszähler:*
- Balgengaszähler
 - Turbinenradzähler
 - Wirbeldurchflussmesser
 - sonstiges
- Stromzähler:*
- Einspeisestrom
 - Anlagenverbrauch
 - Generatorstrom
- Gasanalyse:*
- ___CH₄
 - ___CO₂
 - ___O₂
 - ___H₂S
 - fest installiertes Messgerät
 - Stichproben

Substratmengenerfassung:

- Feststoffe:*
- Wägung
 - sonstiges Messverfahren_____

Flüssige Zuschlagstoffe:

- Durchflussmesser
- Erfassung durch dokumentierbare Pumpenlaufzeit
- sonstiges Messverfahren_____

Gasprobenahmestelle:

- vorhanden

Wärmemengenerfassung:

- Wärmezähler für Gesamtwärmeproduktion
- Wärmezähler für Anlagenbedarf
- Wärmezähler für andere Wärmenutzer_____

Besonderheiten:

Anwendung von besonders innovativen Techniken bei der Gewinnung und/oder Verwertung von Biogas (Dokumentation anhand von Datenblättern, Fotos etc.):

Merkmale, die den Pilotcharakter der Anlage dokumentieren (z. B. Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit, Betreuungsaufwand etc.):

Dieser Anlagenspiegel soll durch aussagekräftige Pläne und Fotos ergänzt werden.

Anhang 2: Muster-Vereinbarung mit den Betreibern der Pilot-Biogasanlagen für die Zusammenarbeit im Projekt

Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising - LfL -
und - Pilotbetrieb -
schließen im Rahmen des Aktionsprogramms Biogas in Bayern – Wissenschaftliche Be-
gleitung von Pilotbetrieben zur Biogasproduktion - folgende

Vereinbarung

§ 1

Inhalt

Inhalt dieser Vereinbarung ist die Zusammenarbeit zwischen dem Pilotbetrieb und der LfL, Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik sowie Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik für die Dauer der wissenschaftlichen Begleitung des Pilotbetriebes.

§ 2

Dauer

Die Dauer der wissenschaftlichen Begleitung umfasst einen Zeitraum von zwei Jahren, beginnend mit der Unterzeichnung dieses Vertrages. Sollte sich zum Ende der Vertragslaufzeit die Notwendigkeit für eine Fortführung der wissenschaftlichen Begleitung ergeben, kann dieser Vertrag im gegenseitigen Einvernehmen um bis zu ein Jahr verlängert werden.

§ 3

Leistungen des Pilotbetriebes

Der Pilotbetrieb erklärt sich bereit:

1. den von der LfL beauftragten Personen während der Dauer der wissenschaftlichen Begleitung freien Zutritt zum Betriebsgelände und allen Anlagenteilen zu gewähren;
2. mit der LfL bei der Durchführung des wissenschaftlichen Begleitprogramms zusammenzuarbeiten;
3. den Einbau und Ausbau von Messgeräten und Geräten zur automatischen Datenerfassung während der Dauer der wissenschaftlichen Begleitung zu dulden;
4. anteilige Kosten für den Einbau von Messgeräten und Geräten zur automatischen Datenerfassung zu übernehmen, sofern diese Geräte nach Beendigung der wissenschaftlichen Begleitung auf dem Pilotbetrieb verbleiben sollen und der Einbau nicht durch Mitarbeiter der LfL erfolgt;
5. anteilige Kosten für neu zu installierende Messgeräte und Geräte zur automatischen Datenerfassung zu übernehmen, sofern diese Geräte nach Beendigung der wissenschaftlichen Begleitung auf dem Pilotbetrieb verbleiben sollen. Die Übergabekonditionen der entsprechenden Geräte sind in einer gesonderten Vereinbarung zu regeln;
6. den Betriebsablauf der Anlage während der Dauer der wissenschaftlichen Begleitung gemäß den Vorgaben der LfL auf täglicher Basis vollständig und lückenlos zu dokumentieren;
7. den von der LfL gesondert benannten Personen alle einschlägigen Daten und Aufzeichnungen des Pilotbetriebes und des im Familienbesitz befindlichen landwirtschaftlichen Unternehmens, soweit von diesem Leistungen für den Pilotbetrieb erbracht oder von diesem in Anspruch genommen werden, offen zu legen;
8. die Probenahme von allen Einsatzstoffen und aus allen Anlagenteilen zu dulden,
9. gegebenenfalls nach Einweisung durch das Personal der LfL einzelne Probenahmen von Einsatzstoffen und aus Anlagenteilen selbst durchzuführen;
10. die Sicherheit des Personals der LfL auf dem Pilotbetrieb zu gewährleisten. Etwai-ge Risiken sind umgehend der LfL schriftlich und den mit der Durchführung be-trauten Personen vor Ort mündlich mitzuteilen;

11. die vollständigen Genehmigungsunterlagen der Pilotanlage vor Beginn der wissenschaftlichen Begleitung vorzulegen;
12. die LfL frühzeitig und uneingeschränkt über alle während der Dauer der wissenschaftlichen Begleitung geplanten Änderungs- oder Erweiterungsmaßnahmen an der Pilotanlage zu informieren;
13. Besichtigungen des Pilotbetriebes durch Dritte nach rechtzeitiger Information durch die LfL zu dulden und sich an der Durchführung zu beteiligen;
14. die von der LfL erhobenen Daten gegenüber Dritten vertraulich zu behandeln.

§ 4

Leistungen der LfL

Die LfL erklärt sich bereit:

1. eine finanzielle Anerkennung von bis zu xxx EUR in drei Raten nach folgenden Maßgaben auszuführen:
 - xxx EUR mit Unterzeichnung dieses Vertrages und Aufnahme des wissenschaftlichen Begleitprogrammes,
 - weitere xxx EUR nach Ablauf eines Jahres, wenn die Leistungen nach § 1 während dieses Zeitraumes durchgängig erbracht wurden,
 - weitere xxx EUR mit Abschluss der wissenschaftlichen Begleitung, wenn die Leistungen nach § 1 durchgängig erbracht wurden;
2. den Aufwand des Pilotbetriebes für Öffentlichkeitsarbeit bis zu xxx EUR gegen Nachweis zu erstatten;
3. bis zu 50 % der Kosten für neu zu installierende Messgeräte und Geräte zur automatischen Datenerfassung bis zu einem Betrag von maximal xxx EUR zu übernehmen, sofern diese Geräte nach Beendigung der wissenschaftlichen Begleitung auf dem Pilotbetrieb verbleiben sollen. Die Übergabekonditionen der entsprechenden Geräte sind in einer gesonderten Vereinbarung zu regeln;
4. den Pilotbetrieb durch das Personal der LfL unentgeltlich fachlich zu betreuen;
5. dem Pilotbetrieb die Einsichtnahme in alle Daten, die während der wissenschaftlichen Begleitung auf dem Pilotbetrieb erhoben werden, uneingeschränkt zu gewäh-

- ren, sowie alle aus den Ergebnissen der wissenschaftlichen Begleitung erstellten Berichte verfügbar zu machen;
6. alle Daten zum Pilotbetrieb bis zur Entscheidung über eine Veröffentlichung im Rahmen des Aktionsprogrammes Biogas in Bayern vertraulich zu behandeln. Erfolgskennzahlen des Pilotbetriebes dürfen nur mit Zustimmung des Anlagenbetreibers veröffentlicht werden;
 7. den Pilotbetrieb rechtzeitig über geplante Besichtigungen durch Dritte zu informieren.

§ 5**Änderungen/Salvatorische Klausel**

Änderungen, Ergänzungen und Nebenabreden zu dieser Vereinbarung sowie eine Kündigung bedürfen zu ihrer Wirksamkeit der Schriftform.

Sollte eine Bestimmung dieses Vertrages ungültig sein oder werden, so berührt dies nicht die Gültigkeit der übrigen Bestimmungen. Die unwirksame Bestimmung ist durch eine Regelung zu ersetzen, die dem mit der unwirksamen Bestimmung verfolgten Zweck am nächsten kommt. Gleiches gilt für die Ausfüllung von Lücken dieser Vereinbarung.

§ 6 Vorzeitige Beendigung

Sollte für einen der Partner dieser Vereinbarung eine Fortführung der wissenschaftlichen Begleitung bzw. eine weitere Zusammenarbeit aus Gründen, die der andere Partner zu vertreten hat, unzumutbar werden, kann die Vereinbarung mit sofortiger Wirkung gekündigt werden. Die Kündigung bedarf der Schriftform.

Ein Anspruch auf zum Zeitpunkt der Beendigung der wissenschaftlichen Begleitung noch nicht ausbezahlte Anerkennungsleistungen nach § 4 (1) besteht nicht. Bereits ausbezahlte Anerkennungsleistungen werden nicht zurückgefordert.

§ 7**Inkrafttreten**

Dieser Vertrag tritt mit Unterzeichnung durch beide Parteien in Kraft.

Freising, den

Bayerische Landesanstalt
für Landwirtschaft

Präsident der LfL

Geschäftsführer des Pilotbetriebes

Anhang 3: Lagepläne der Pilot-Biogasanlagen

-  Vorgrube
-  Gärbehälter
-  Silo
-  Verkehrsfläche
-  Biomasseintrag
-  Gärrestlager
-  BHKW-Raum
-  Kontrollraum
-  Trafo

Abb. A- 1: *Legende für die Lagepläne der Pilotanlagen*

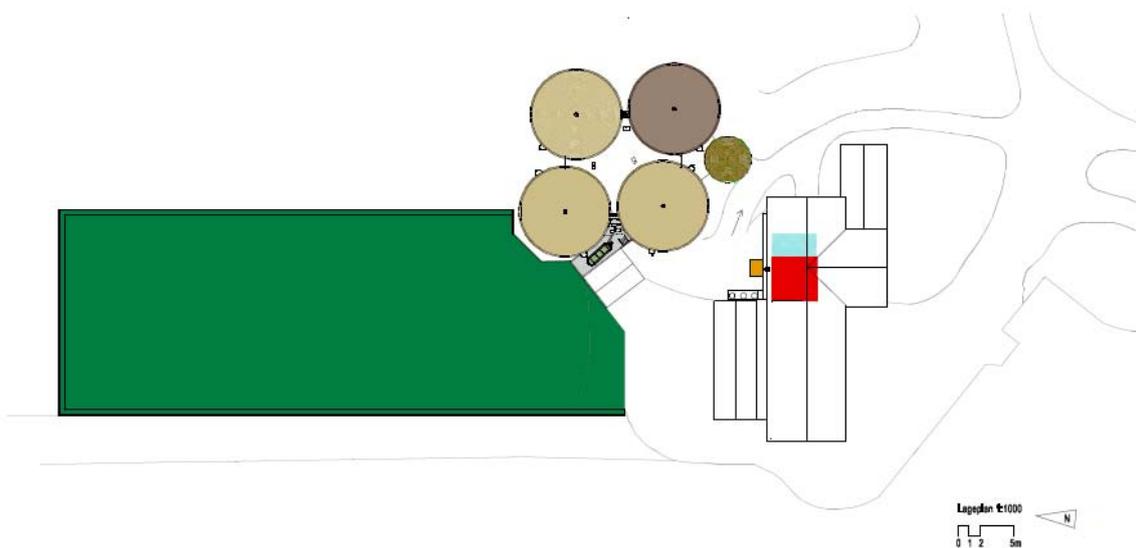


Abb. A- 2: *Lageplan Pilotanlage A*

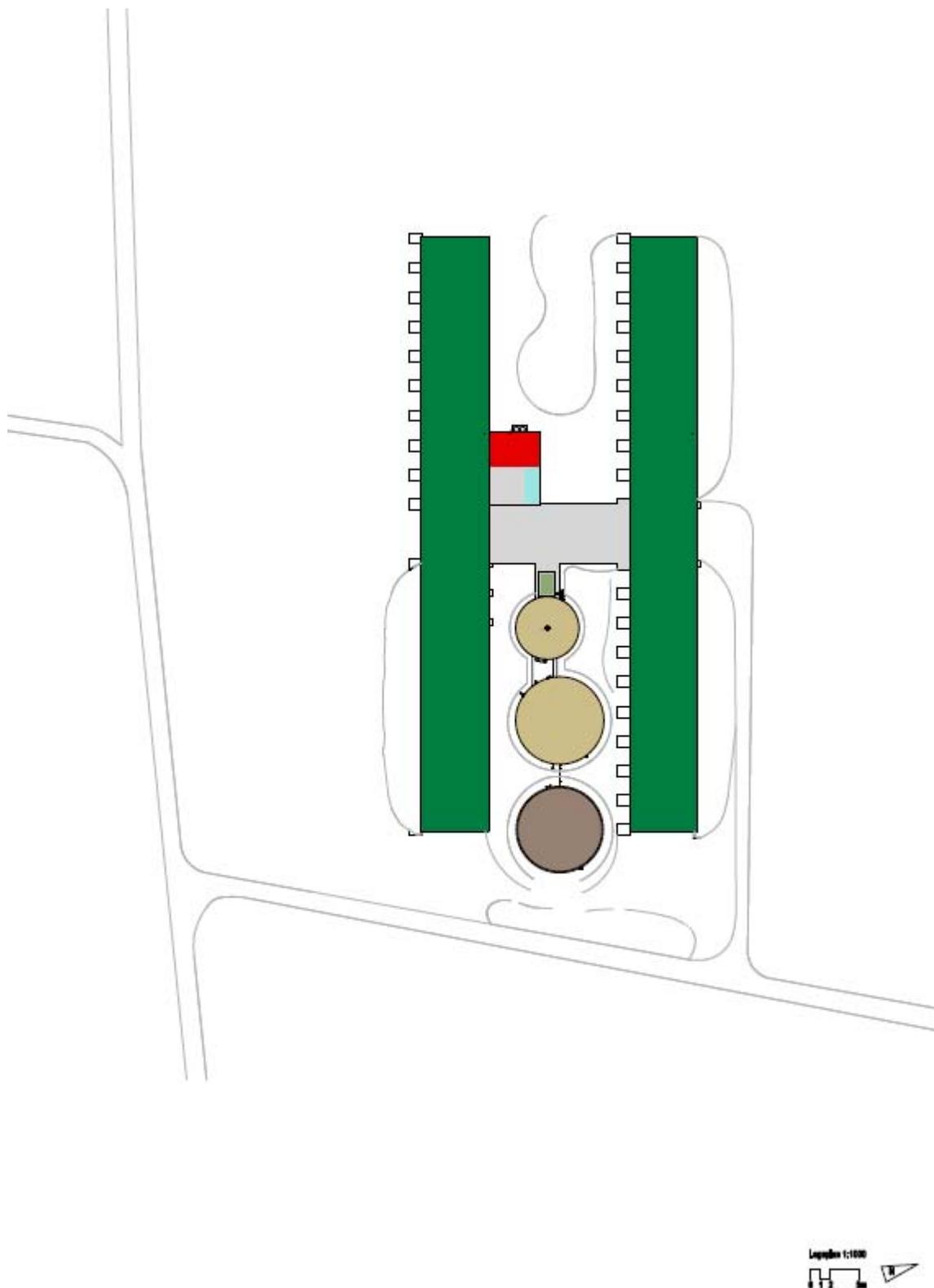


Abb. A- 3: Lageplan Pilotanlage B

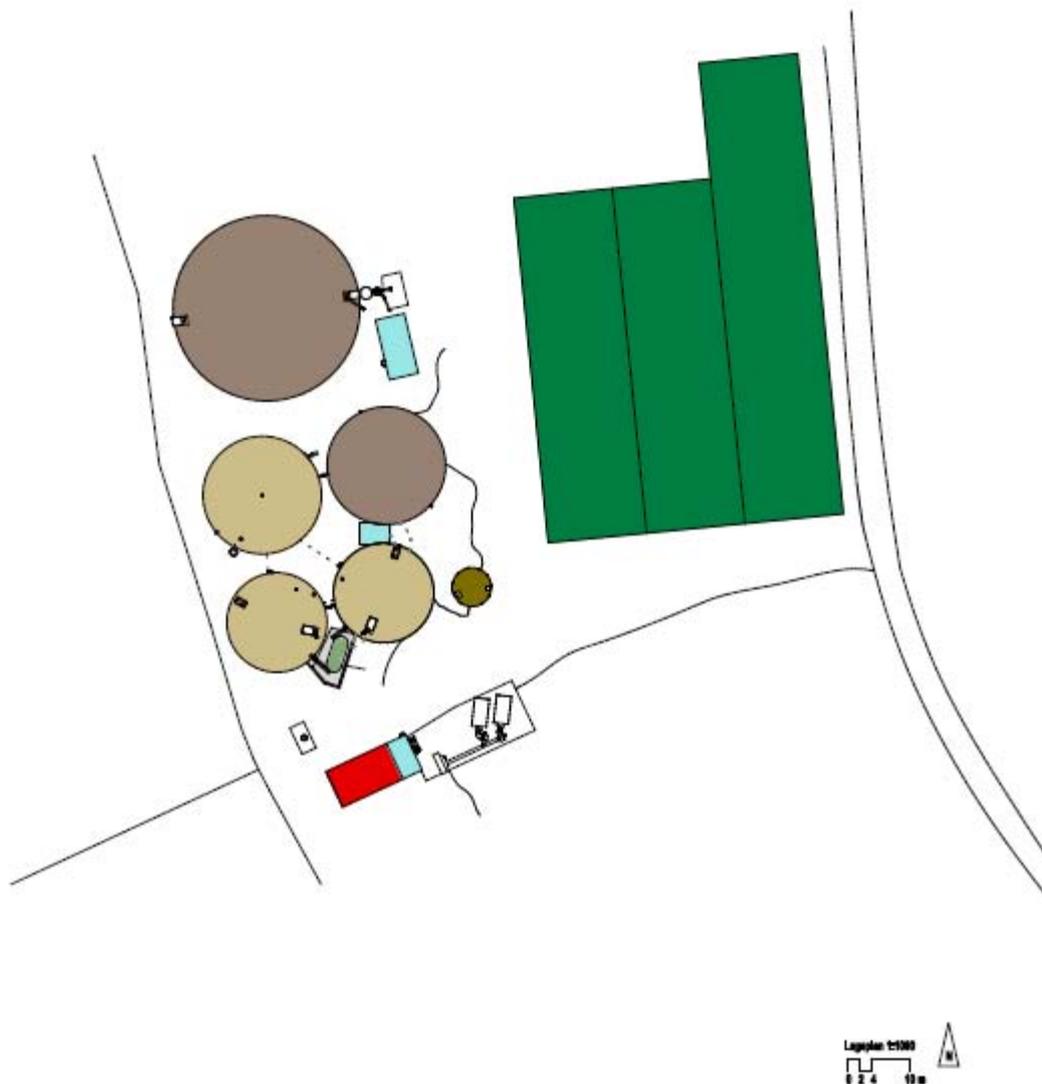


Abb. A- 4: Lageplan Pilotanlage C*

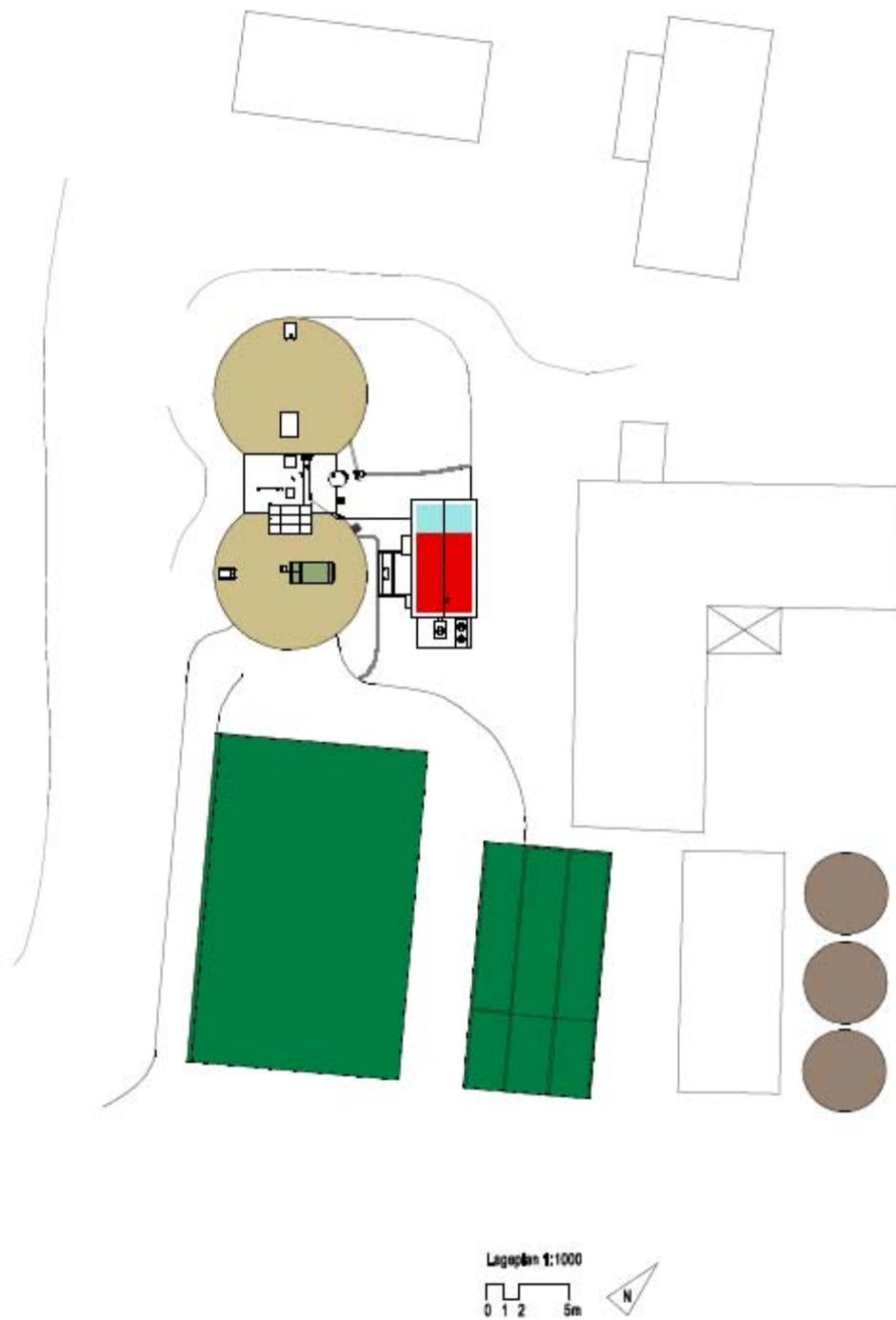


Abb. A- 5: Lageplan Pilotanlage D

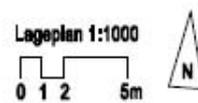
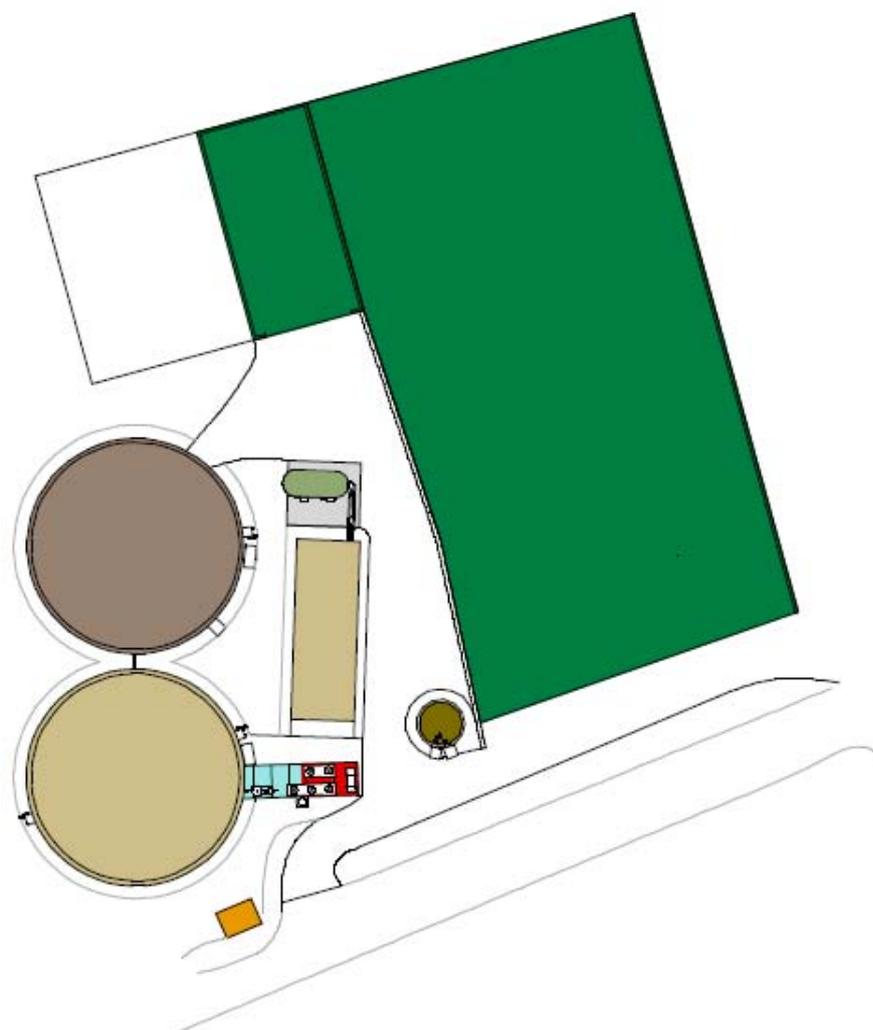


Abb. A- 6: Lageplan Pilotanlage E

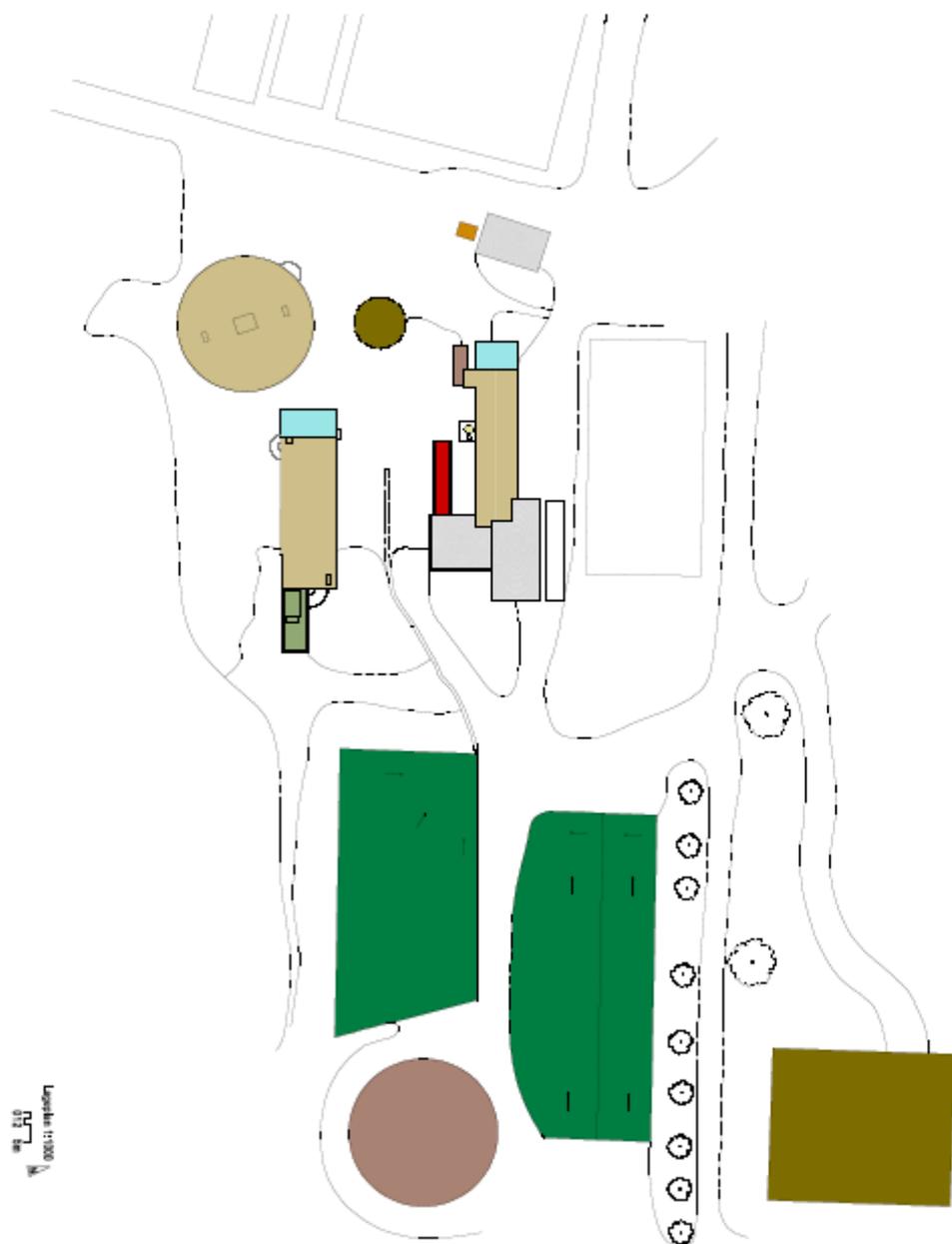


Abb. A- 7: Lageplan Pilotanlage F

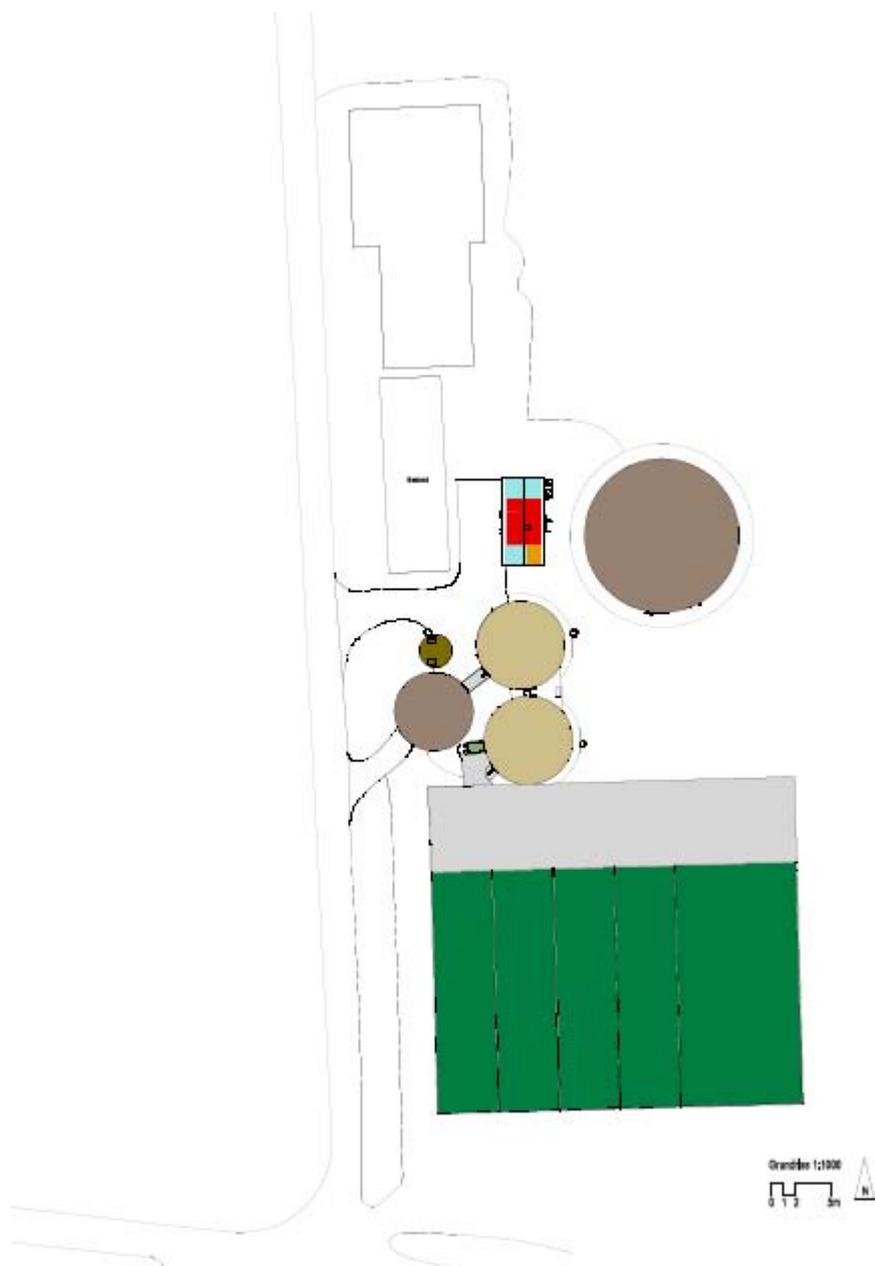


Abb. A- 8: Lageplan Pilotanlage G

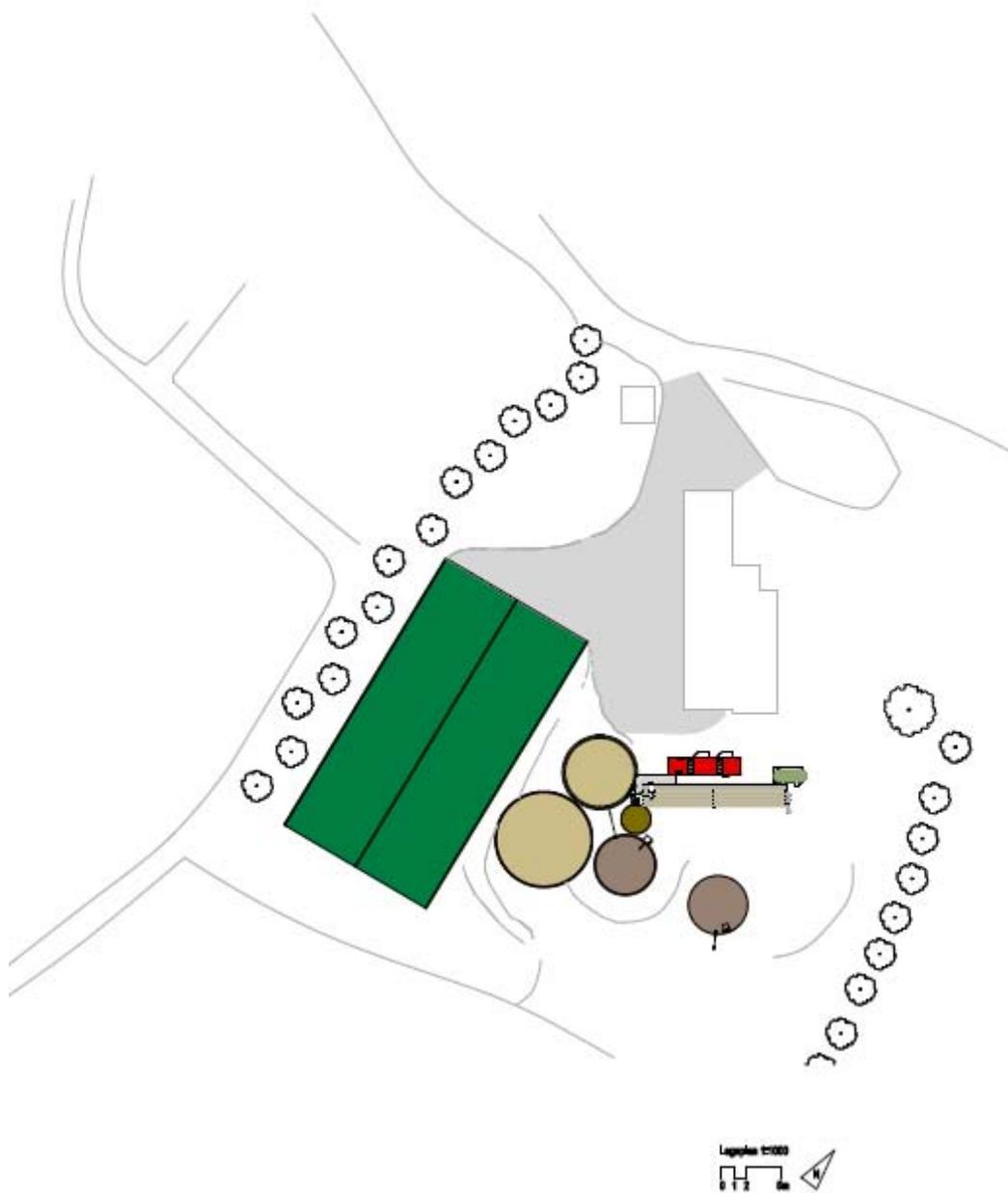


Abb. A- 9: Lageplan Pilotanlage H*



Abb. A- 10: Lageplan Pilotanlage I

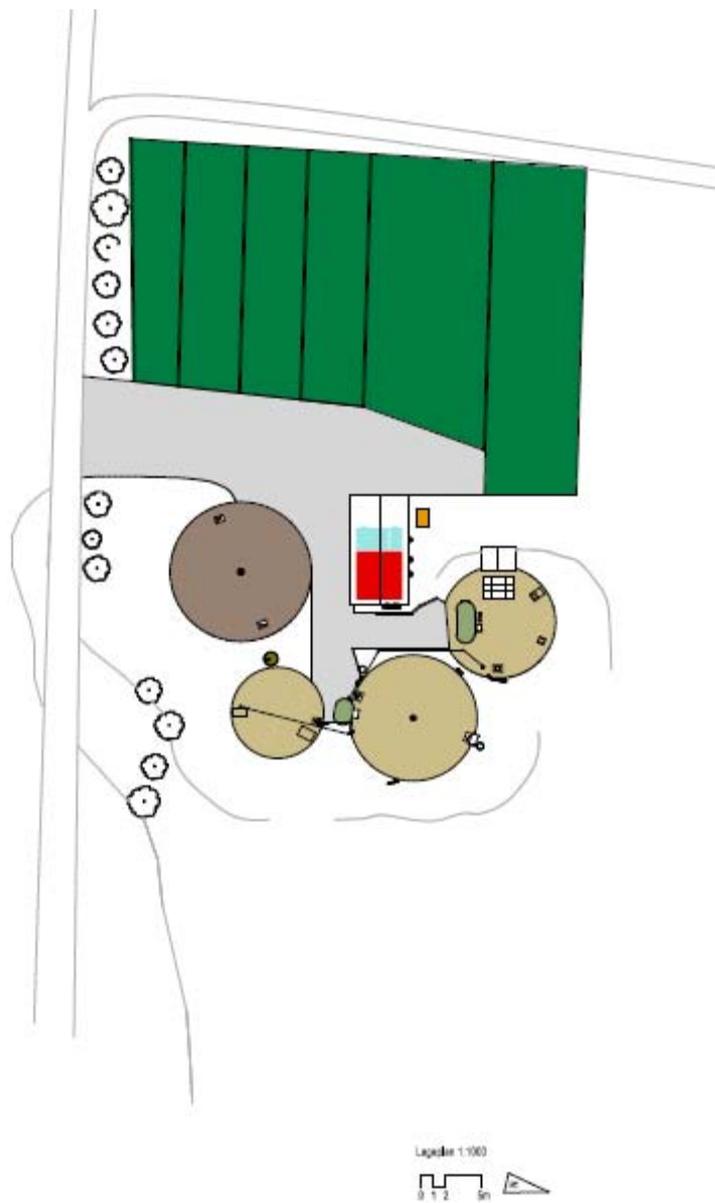


Abb. A- 11: Lageplan Pilotanlage J

Anhang 4: Zusammenstellung der verfahrenstechnischen Kenngrößen der Biogas- Pilotanlagen

Tab. A- 1: Zusammenstellung der Kennwerte der Biogasproduktion für die Pilotanlagen

ID Anlage	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Beobachtungszeitraum	d	639	672	365	865	793	823	609	200	488	640	609
FM-Eintrag	t	14.221,0	13.078,7	6.913,4	8.246,0	16.134,0	21.900,3	11.278,9	2.174,7	6.845,0	7.028,8	15.906,2
FM-Durchsatz	t*d-1	22,3	19,5	18,9	27,0	17,8	26,6	18,5	10,9	14,0	11,0	26,1
oTM-Eintrag	kg	3.855.465	3.319.475	1.636.444	2.213.474	4.629.132	5.383.130	2.558.573	507.049	1.638.405	2.060.631	3.907.197
oTM-Durchsatz	kg*d-1	6.034	4.940	4.483	7.257	6.788	10.704	4.201	2.535	3.357	3.220	6.416
Gesamt-Raumbelastung	kg oTM*(m ³ d) ⁻¹	2,0	1,9	1,3	2,0	2,7	3,0	3,0	3,8	1,9	3,1	1,9
Raumbelastung Hauptgärbehälter	kg oTM*(m ³ d) ⁻¹	3,0	4,0	3,2	5,1	17,1	6,5	5,7	9,2	11,8	3,3	2,3
Hydraulische Verweilzeit gesamt	d	127	126	192	131	78	141	83	62	127	111	131
Hydraulische Verweilzeit Hauptgärbehälter	d	85	72	89	51	13	60	42	26	21	100	105
Biogasertrag	Nm ³	2.684.736	2.261.576	1.269.568	1.748.331	3.410.811	3.638.746	1.826.134	390.790	1.254.441	1.503.027	2.735.031
Biogasrate	Nm ³ h-1	175	140	145	239	191	232	125	81	107	98	187
Methangehalt im Biogas	Vol.-%	54,4	52,8	52,4	49,9	50,7	51,4	51,9	52,5	51,3	53,9	49,5
Methanertrag	Nm ³	1.459.189	1.194.316	664.704	871.887	1.730.604	2.350.751	947.251	205.341	643.627	810.362	1.354.289
Methanrate	Nm ³ h-1	95	74	76	119	101	119	65	43	55	53	93
Biogasausbeute FM	Nm ³ t-1	189	173	184	212	258	209	162	172	183	214	172
Biogasausbeute oTM	NI*kg oTM ⁻¹	696	681	776	709	676	519	714	739	754	729	700
Methanausbeute FM	Nm ³ t ⁻¹	103	91	96	106	107	101	84	94	94	115	85
Methanausbeute oTM	NI*kg oTM ⁻¹	378	360	406	394	374	253	354	405	393	393	347
Biogasproduktivität	Nm ³ (m ³ d) ⁻¹	1,5	1,3	0,9	1,6	1,8	1,5	1,9	2,9	1,4	2,1	1,3
Methanproduktivität	Nm ³ (m ³ d) ⁻¹	0,76	0,68	0,50	0,78	0,97	0,76	1,0	1,5	0,74	1,2	0,65

Die angegebenen Werte sind Durchschnitts- bzw. Summenwerte über den jeweiligen gesamten Beobachtungszeitraum.

Tab. A- 2: Zusammenstellung der Kennwerte der Biogasverwertung für die Pilotanlagen

ID Anlage	A	B	C	C*	D	E	F	G	H	H*	I	J
Beobachtungszeitraum	639	672	365	305	865	793	823	609	200	488	640	609
Feuerungswärmeleistung	992	738	756	1.188	831	1.002	1.187	699	486	600	526	924
Bruttoleistung elektrisch	322	274	309	468	333	337	480	269	167	231	190	338
Bruttoleistung thermisch	377	231	325	591	332	420	484	249	196	272	138	356
Stromausbeute FM	347	324	392	416	432	455	433	348	368	395	399	310
Wärmeleistung extern	9	5	0	344	94	182	245	38	n.v.	98	65	75
Strombedarfsanteil BGA [§]	9,1	17,4	8,4	6,1	5,8	8,3	7,3	4,4	14,2	10,3	11,1	6,2
BHKW 1: Arbeitsausnutzung	0,98	0,82	0,80	0,94	0,71	0,97	0,91	0,95	0,67	0,92	0,59	0,89
BHKW 1: Theoretische Vollalaststunden	8.583	8.973	6.991	8.205	6.212	8.507	7.997	8.351	5.845	8.081	5.131	7.796
BHKW 1: Elektr. Nutzungsgrad	32,4	35,6	n.v.	n.v.	n.v.	33,6	40,5	34,2	34,3	38,4	34,7	36,5
BHKW 1: Zündölanteil	-	-	-	-	-	-	-	8,8	12,3	8,7	-	-
BHKW 2: Arbeitsausnutzung	-	-	0,83	-	0,85	-	-	0,96	-	-	-	n.v.
BHKW 2: Theoretische Vollalaststunden	-	n.v.	7.254	-	7.446	-	0	14.100	-	-	-	n.v.
BHKW 2: Elektr. Nutzungsgrad	n.v.	n.v.	n.v.	-	n.v.	-	n.v.	0,40	-	-	-	n.v.
BHKW 2: Zündölanteil	-	-	-	-	-	-	-	0,07	-	-	-	-
BHKW 3: Arbeitsausnutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHKW 3: Theoretische Vollalaststunden	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHKW 3: Elektr. Nutzungsgrad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHKW 3: Zündölanteil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrischer Nutzungsgrad	32,4	35,6	40,9	39,4	40,4	33,6	40,5	38,4	34,3	38,4	34,7	36,5
Gesamt												
Wärme-Nutzungsgrad	2,5	2,0	33,3	54,8	28,2	43,3	50,7	15,4	n.v.	36,2	47,1	21,1
Netto-Nutzungsgrad Methan	30,4	30,0	51,8	65,2	49,4	49,0	58,2	42,2	n.v.	50,9	42,8	42,4
Wärme-Nutzungsanteil extern	2,8	2,1	n.v.	n.v.	37,9	50,3	58,0	19,3	n.v.	39,7	60,0	n.v.
Heizwärme Fermenter	592.720	151.708	n.v.	n.v.	1.780.764	1.106.155	1.202.920	731.480	n.v.	742.243	437.530	n.v.
Wärme-Nutzungsanteil Fermenter	10,3	4,2	n.v.	n.v.	25,6	13,9	12,6	20,1	n.v.	23,3	21,4	n.v.
Arbeitsausnutzung gesamt	97,8	82,4	93,6	93,7	79,3	97,1	91,3	96,1	66,7	92,2	58,6	89,0
Theoretische Jahresvollalaststunden	8.570	6.917	8.202	8.205	7.003	8.507	7.997	8.407	5.845	8.081	4.939	7.783

§) inkl. BHKW; n.v.: nicht verfügbar. Alle angegebenen Werte sind Durchschnitts- bzw. Summenwerte über den jeweiligen gesamten Beobachtungszeitraum.

Anhang 5: Verlauf der Wochensummen der eingetragenen Substratmengen auf den Pilotanlagen

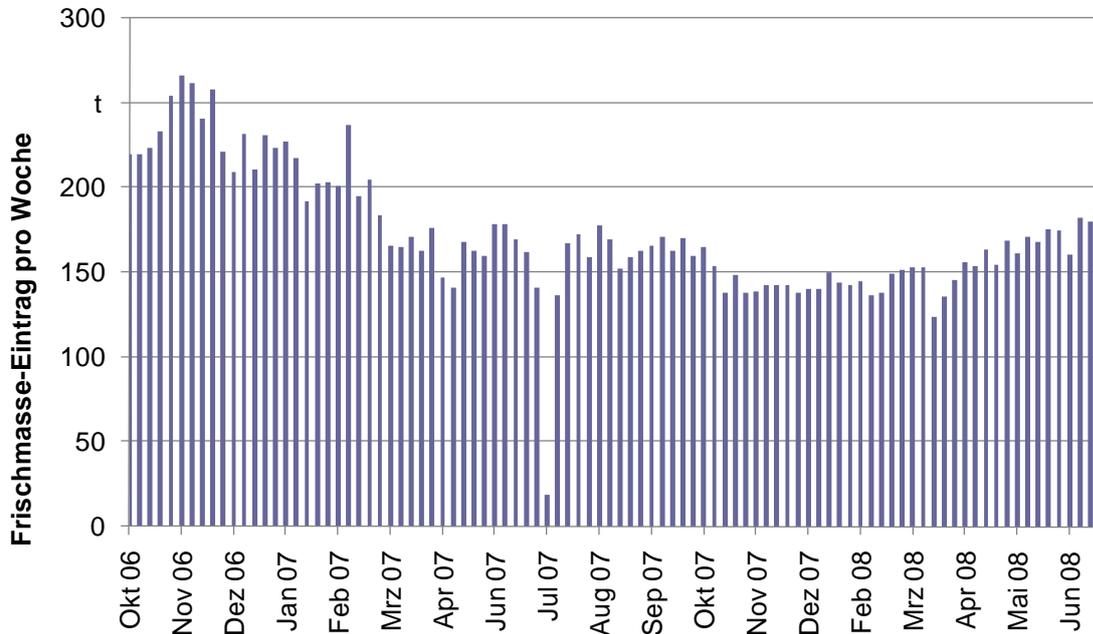


Abb. A- 12: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage A

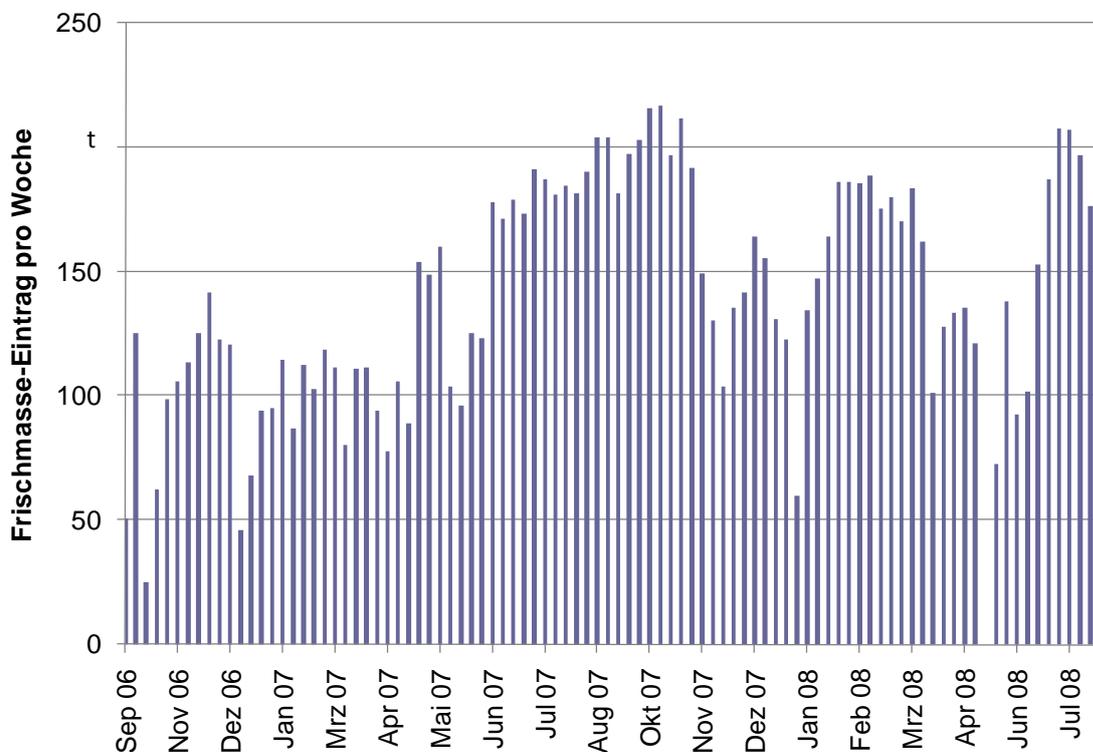


Abb. A- 13: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage B

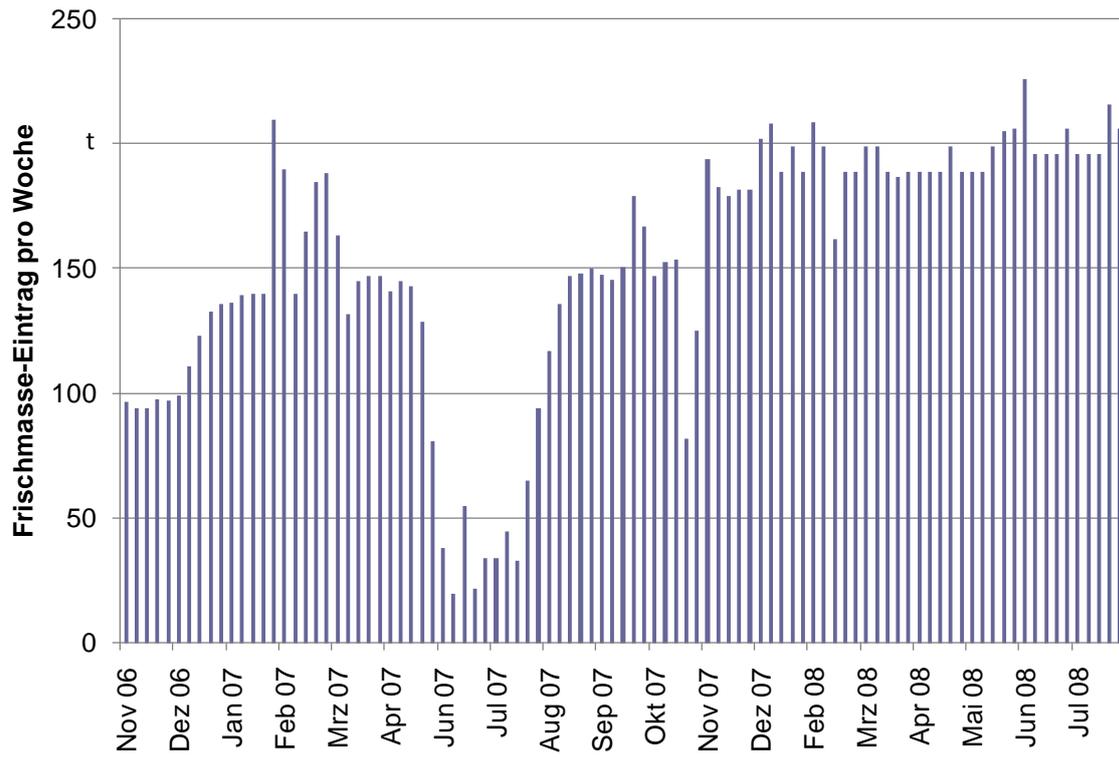


Abb. A- 14: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage C/C*

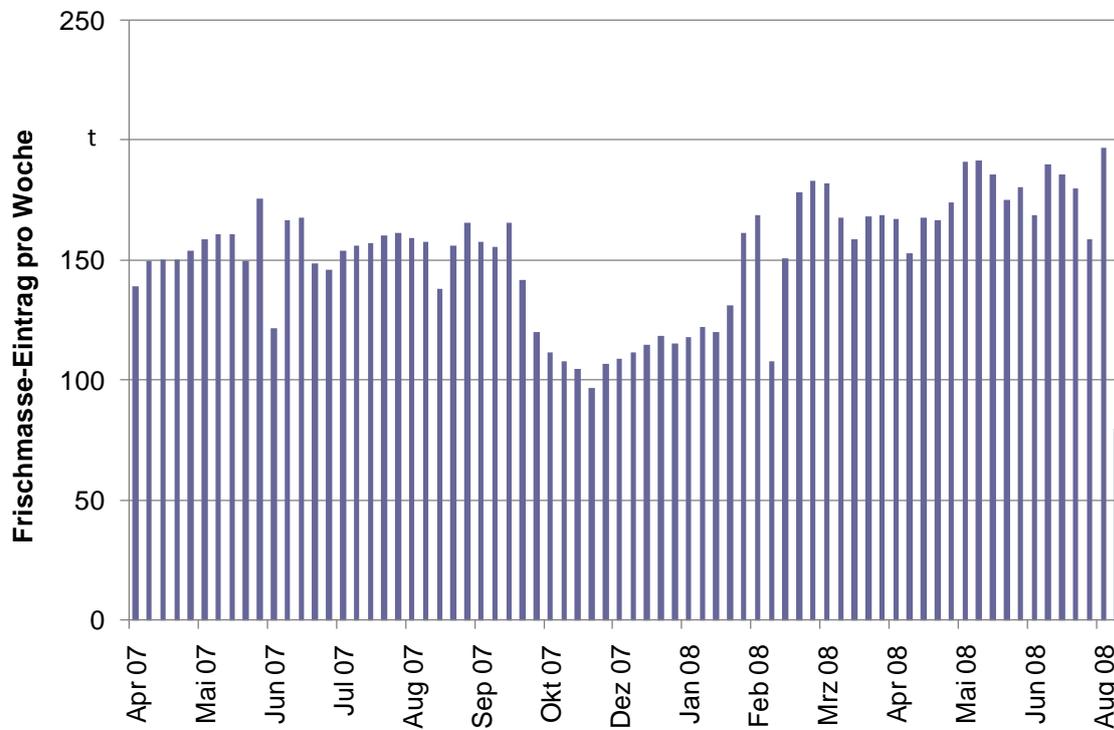


Abb. A- 15: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage D

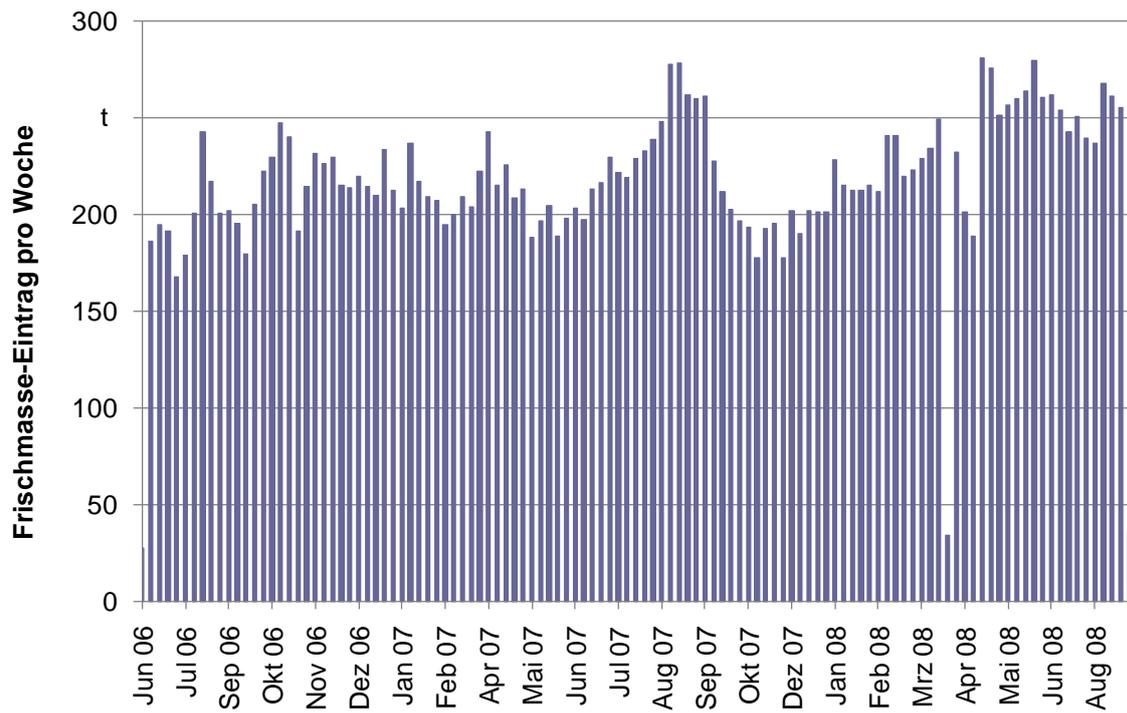


Abb. A- 16: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage E

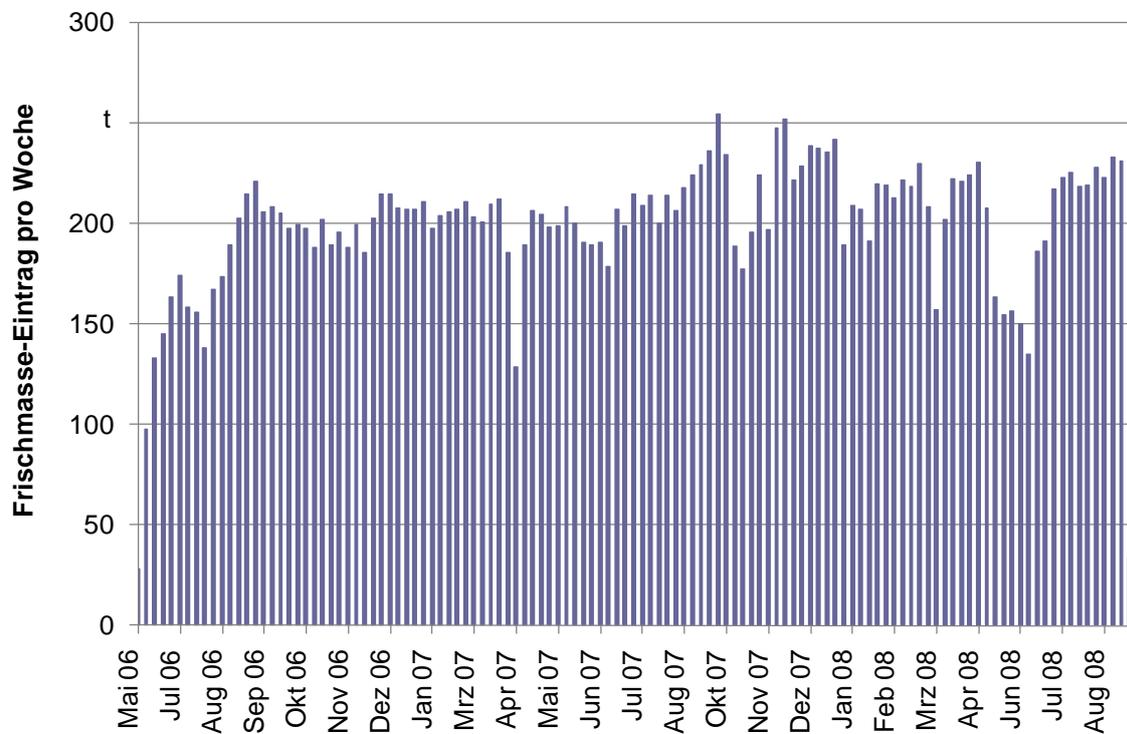


Abb. A- 17: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage F

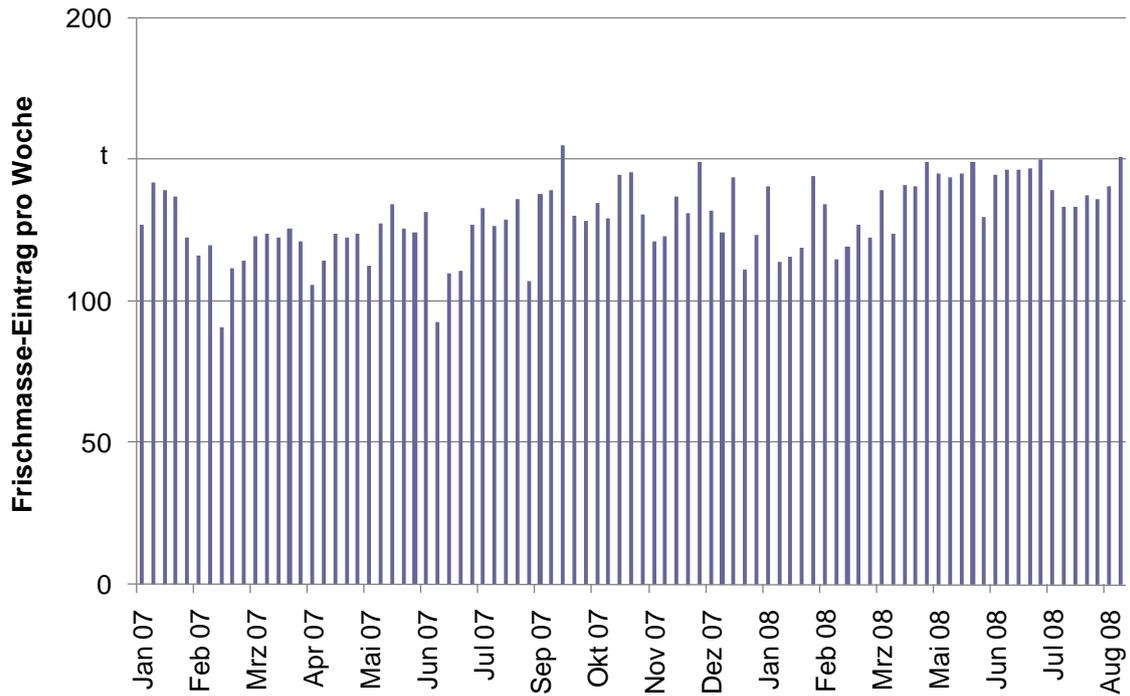


Abb. A- 18: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage G

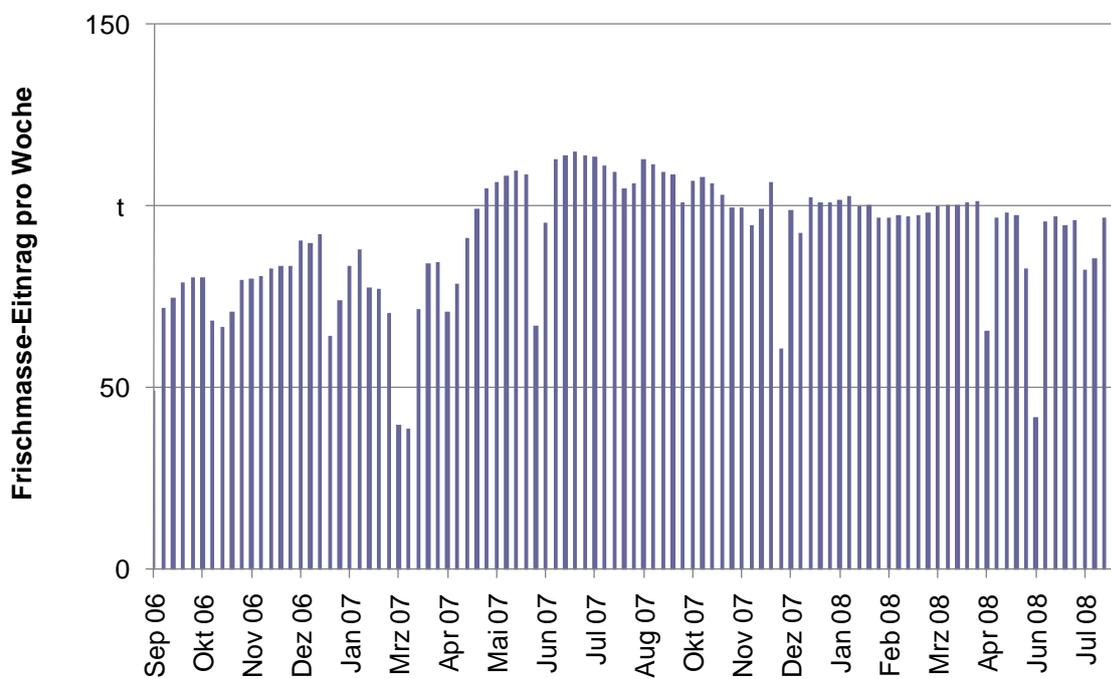


Abb. A- 19: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage H/H*

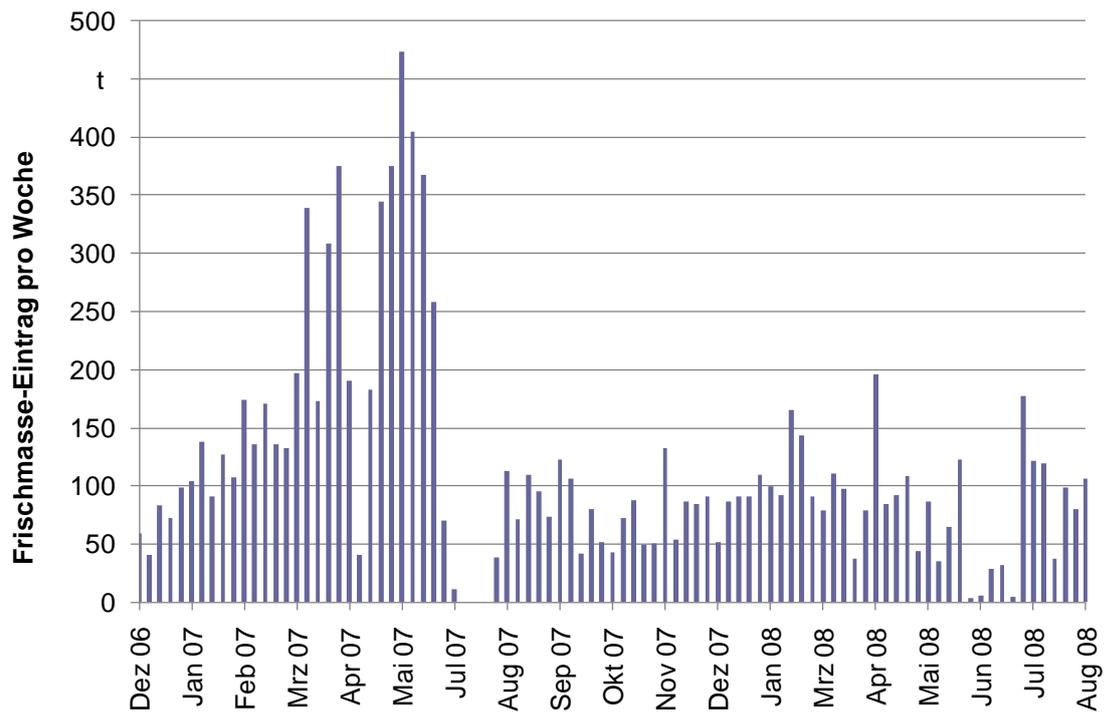


Abb. A- 20: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage I

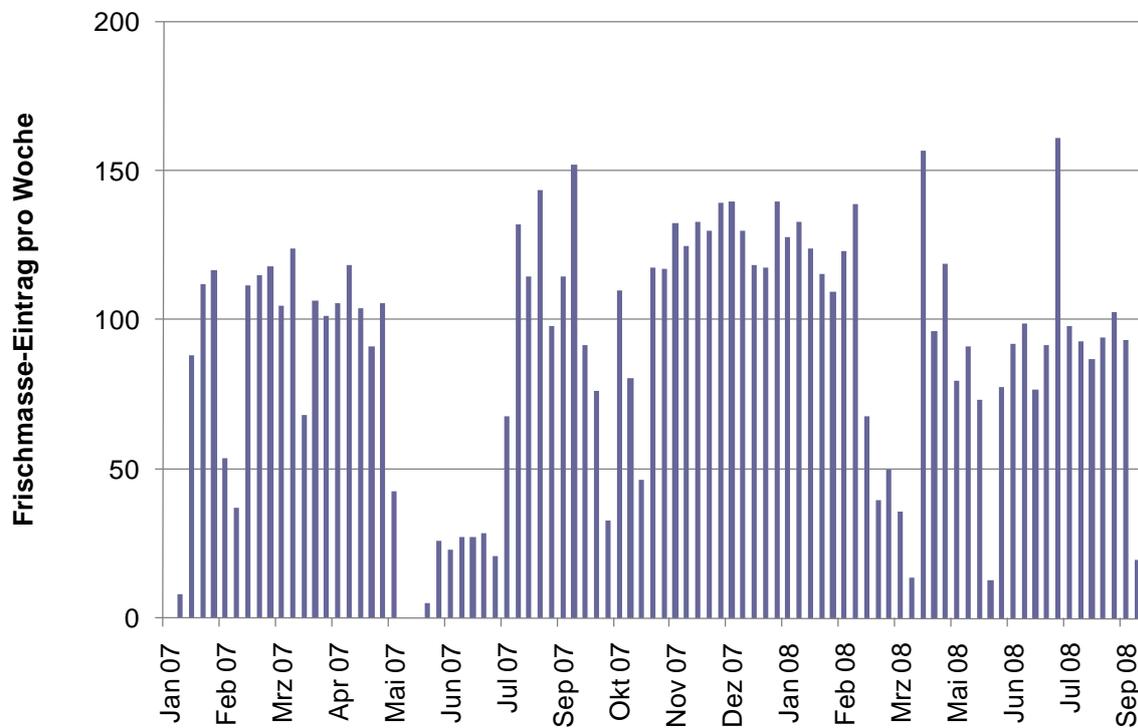


Abb. A- 21: Verlauf der Wochensummen des Frischmasse-Eintrags in Pilotanlage J

Anhang 6: Analysendaten zu den Einsatzstoffen und Gärgemischen der einzelnen Pilotanlagen

Tab. A- 3: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage A

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	33	Mittelwert	31,2	30,2	5.362	1.264	568	96,8	44,1	1,2	886
		Min	21,5	21,0	384	n.n.	n.n.	96,0	n.n.	n.n.	150
		Max	45,5	44,1	11.017	28.481	8.166	98,2	47,0	2,4	3.748
Grassilage	29	Mittelwert	26,0	23,7	10.704	835	1.582	91,0	42,6	2,1	1.148
		Min	19,5	17,9	2.017	n.n.	n.n.	85,7	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	61,0	56,5	59.576	2.804	6.020	95,0	48,2	3,3	5.500
GPS	8	Mittelwert	20,4	19,0	9.886	960	1.160	93,2	45,6	1,0	1.613
		Min	17,7	16,5	7.573	n.n.	n.n.	92,1	44,3	0,8	540
		Max	25,4	23,9	10.912	3.140	4.602	94,7	46,5	1,3	2.400
Rindermist	4	Mittelwert	22,3	38,6	1.695	267	n.n.	81,7	43,5	1,5	1.561
		Min	17,1	14,5	1.695	267	n.n.	67,9	43,5	1,5	799
		Max	29,2	64,8	1.695	267	n.n.	88,1	43,5	1,5	2.740
Geflügelkot	9	Mittelwert	57,1	85,0	4.691	106	4.084	85,0	36,6	3,0	6.259
		Min	35,6	82,1	775	n.n.	568	82,1	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	76,6	88,7	8.961	419	8.166	88,7	43,4	4,3	8.224
Maisschrot, CCM, LKS	9	Mittelwert	45,2	44,3	6.749	440	396	97,9	45,1	1,3	851
		Min	27,0	26,2	3.763	n.n.	n.n.	97,0	44,1	0,9	460
		Max	51,9	50,9	12.511	790	1.565	98,2	46,2	1,5	1.100
Gülle	7	Mittelwert	5,5	4,4	4.677	1.508	1.108	79,5	n.v.	n.v.	1.111
		Min	2,1	1,6	2.994	706	666	72,1	n.v.	n.v.	594
		Max	7,2	6,0	6.131	2.461	1.620	84,4	n.v.	n.v.	1.671

n.n.: nicht nachweisbar; n.v.: nicht verfügbar

Tab. A- 4: Analysendaten der Gärgemischproben von Pilotanlage A

	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter 1	26	Mittelwert	9,4	7,7	0,68	1.810	657	90	53	2.216
		Min	7,3	7,4	0,27	745	n.n.	n.n.	n.n.	1.395
		Max	12,2	8,0	1,38	3.980	2.577	441	658	3.377
Hauptgärbehälter 2	26	Mittelwert	9,2	7,7	0,64	1.372	589	62	14	2.160
		Min	6,9	7,4	0,25	61	n.n.	n.n.	n.n.	1.443
		Max	10,6	8,0	1,30	4.600	3.014	384	223	3.290
Nachgärbehälter	26	Mittelwert	7,5	8,0	0,35	1.790	35	n.n.	293	2.011
		Min	5,2	7,8	0,22	49	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	8,7	8,2	0,61	8.471	267	8	5.116	3.528

Tab. A- 5: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage B

	n	TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N	
		%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹	
Maissilage	16	Mittelwert	33,9	32,4	4.828	165	719	95,5	42,3	1,2	698
		Min	22,1	20,1	509	n.n.	n.n.	87,1	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	45,9	44,4	11.156	2.131	8.963	97,3	46,8	1,6	2.860
Kleegrassilage	28	Mittelwert	26,7	23,8	9.134	512	892	89,1	42,5	2,1	1.003
		Min	19,0	17,0	523	n.n.	n.n.	75,2	13,5	1,0	390
		Max	42,7	38,4	19.780	2.847	5.836	93,7	46,7	3,4	2.900
Wickroggen	3	Mittelwert	23,7	21,3	12.478	659	9	90,0	44,2	2,0	844
		Min	21,7	19,6	10.183	512	n.n.	89,7	43,8	1,8	744
		Max	24,8	22,3	14.702	856	26	90,2	45,0	2,4	977
CCM	2	Mittelwert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Min	66,1	65,0	2.955	n.n.	n.n.	98,4	44,4	1,5	1.120
		Max	66,9	65,8	2.955	n.n.	n.n.	98,4	45,9	1,6	1.400
Rindermist	3	Mittelwert	23,8	19,2	2.653	861	637	80,5	40,8	1,8	1.097
		Min	21,8	17,4	2.653	861	637	77,7	40,8	1,8	687
		Max	26,8	22,5	2.653	861	637	83,9	40,8	1,8	1.680

Tab. A- 6: Analysendaten der Gärgemischproben von Pilotanlage B

	n	TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N	
		%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	
Hauptgärbehälter	63	Mittelwert	13,7	8,1	0,45	1.870	1.403	31	84	2.927
		Min	9,0	7,7	0,16	29	n.n.	n.n.	n.n.	510
		Max	16,4	8,5	0,96	17.553	8.342	291	2.457	5.408
Nachgärbehälter	18	Mittelwert	11,0	8,0	0,29	1.995	194	6	96	3.183
		Min	5,9	7,6	0,18	83	n.n.	n.n.	n.n.	390
		Max	14,7	8,4	0,54	14.663	1.213	54	1.373	5.323

Tab. A- 7: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage C/C*

n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N	
		%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹	
Maissilage	28	Mittelwert	29,3	28,1	5.328	302	16	95,9	30,3	1,1	533
		Min	20,3	17,7	3.058	n.n.	n.n.	86,9	1,1	0,2	211
		Max	39,4	38,3	12.502	4.385	230	97,1	46,7	1,7	2.080
Grassilage	25	Mittelwert	25,4	22,8	10.493	1.886	1.784	89,6	34,2	2,2	1.184
		Min	16,2	14,0	3.214	n.n.	n.n.	85,7	1,3	1,3	473
		Max	38,8	33,8	20.679	4.802	11.634	95,9	46,7	2,8	2.890
GPS	19	Mittelwert	28,5	26,7	9.710	1.183	323	93,1	40,4	1,0	578
		Min	16,8	14,3	1.613	n.n.	n.n.	84,5	1,9	0,9	314
		Max	41,7	39,5	17.927	2.759	1.951	95,0	47,0	1,5	1.511
CCM	10	Mittelwert	63,2	62,1	2.190	21	5	98,2	20,8	1,7	1.787
		Min	56,3	55,2	1.275	n.n.	n.n.	95,9	1,6	1,6	1.008
		Max	68,6	67,5	3.299	78	32	98,6	46,4	1,8	4.370

Tab. A- 8: Analysendaten der Gärgemischproben von Pilotanlage C/C*

C	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter 1	26	Mittelwert	7,4	7,5	1,17	2.362	2.406	447	91	2.260
		Min	5,7	7,2	0,79	692	594	106	n.n.	1.519
		Max	8,3	7,8	1,70	3.940	3.847	748	301	3.571
Hauptgärbehälter 2	26	Mittelwert	7,9	7,5	1,43	2.334	3.873	734	257	2.313
		Min	6,9	7,1	0,96	599	1.665	356	n.n.	728
		Max	8,9	7,7	2,15	5.354	6.839	1.477	1.628	4.055
Nachgärbehälter 1	19	Mittelwert	7,3	7,9	0,55	822	854	99	5	2.247
		Min	6,4	7,5	0,37	188	n.n.	n.n.	n.n.	1.320
		Max	8,3	8,1	0,99	2.558	3.081	640	55	4.186
Nachgärbehälter 2	2	Mittelwert	-	-	-	-	-	-	-	-
		Min	6,4	7,6	0,38	164	118	n.n.	n.n.	1.968
		Max	7,1	7,9	0,43	925	134	n.n.	n.n.	4.527
C*	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter 1	26	Mittelwert	7,9	7,7	0,69	2.152	796	127	35	1.645
		Min	7,0	7,4	0,26	534	n.n.	n.n.	n.n.	600
		Max	8,9	7,9	1,46	4.091	3.679	752	195	2.443
Hauptgärbehälter 2	26	Mittelwert	7,7	7,7	0,63	1.885	770	119	48	1.901
		Min	6,7	7,4	0,29	345	n.n.	n.n.	n.n.	728
		Max	8,9	7,9	1,29	4.229	3.494	706	219	3.280
Nachgärbehälter 1	19	Mittelwert	6,8	7,8	0,36	766	18	5	6	1.858
		Min	6,4	7,6	0,25	130	n.n.	n.n.	n.n.	1.515
		Max	7,3	8,0	0,49	1.328	51	24	29	2.625

Tab. A- 9: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage D

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	51	Mittelwert	30,4	29,3	9.465	1.088	608	96,4	42,5	1,2	858
		Min	25,8	25,0	1.660	n.n.	n.n.	95,1	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	36,6	35,4	18.232	3.772	10.188	97,4	47,0	2,4	4.640
Grassilage	27	Mittelwert	24,1	21,3	7.961	590	747	88,5	40,8	2,2	713
		Min	14,5	12,6	2.043	n.n.	n.n.	81,5	n.n.	n	n.n.
		Max	37,7	34,0	17.706	2.254	4.995	93,2	47,0	3,3	2.340
Weizen-GPS	19	Mittelwert	35,5	33,8	8.795	254	104	95,0	42,1	1,6	1.165
		Min	30,1	28,8	695	n.n.	n.n.	93,7	6,9	0,9	450
		Max	43,3	41,7	15.574	1.086	1.555	96,4	46,7	2,5	2.780
Roggen-GPS	10	Mittelwert	23,4	22,2	8.967	1.082	4.065	94,8	45,1	1,5	1.318
		Min	18,6	16,9	209	n.n.	n.n.	91,2	39,5	1,0	468
		Max	39,1	37,4	15.671	2.497	10.790	97,1	46,3	2,2	3.590
Wintergerste- GPS	3	Mittelwert	30,2	28,4	11.544	1.403	n.n.	94,0	44,6	1,6	913
		Min	27,6	26,0	11.022	n.n.	n.n.	93,6	44,1	1,5	840
		Max	34,8	32,5	12.241	2.118	n.n.	94,4	45,4	1,8	1.050
CCM	3	Mittelwert	61,5	60,6	3.365	132	n.n.	98,5	45,3	1,5	1.450
		Min	61,5	60,6	2.374	117	n.n.	98,5	44,9	1,4	1.420
		Max	61,6	60,6	3.977	151	n.n.	98,5	45,5	1,5	1.470

Tab. A- 10: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage D

	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter	36	Mittelwert	8,5	7,9	0,62	1.480	1.116	132	43	2.270
		Min	6,3	7,6	0,28	36	n.n.	n.n.	n.n.	450
		Max	11,5	8,4	1,48	14.914	5.963	1.189	749	3.147
Nachgärbehälter	27	Mittelwert	6,7	8,1	0,39	1.006	229	12	49	2.158
		Min	3,5	7,7	0,21	29	n.n.	n.n.	n.n.	550
		Max	8,1	8,4	0,91	6.136	2.556	142	1.128	3.009

Tab. A- 11: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage E

n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N	
		%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹	
Maissilage	50	Mittelwert	30,2	29,0	5.749	137	131	96,1	41,0	1,6	1.024
		Min	15,7	14,9	279	n.n.	n.n.	94,6	n.n.	0,9	153
		Max	35,4	34,3	18.655	1.239	1.445	97,1	46,9	5,5	10.210
GPS	2	Mittelwert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Min	30,8	27,5	5.036	6	n.n.	76,6	41,6	1,4	374
		Max	36,0	29,1	5.869	80	1.372	94,3	46,8	1,5	444
Geflügelkot	47	Mittelwert	56,7	47,9	8.644	507	2.330	84,3	42,6	1,9	6.401
		Min	37,8	29,5	489	n.n.	n.n.	77,9	6,9	0,9	n.n.
		Max	82,2	71,2	23.118	4.913	15.991	87,1	47,0	5,5	11.181

Tab. A- 12: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage E

n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N	
		%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	
Hauptgärbehälter	23	Mittelwert	9,5	7,8	0,87	6.500	1.183	157	445	4.775
		Min	7,8	7,4	0,47	536	30	n.n.	n.n.	3.134
		Max	11,5	8,1	1,20	11.126	1.981	293	1.506	5.482
Nachgärbehälter	23	Mittelwert	8,1	8,3	0,26	1.335	50	4	1	4.473
		Min	6,3	7,8	0,12	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	500
		Max	10,7	8,5	0,44	11.454	261	44	21	5.620

Tab. A- 13: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage F

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	25	Mittelwert	33,1	31,8	6.376	239	61	96,2	34,1	1,0	756
		Min	28,0	26,7	2.071	n.n.	n.n.	95,4	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	47,2	46,2	13.965	1.702	871	97,7	46,7	1,3	4.938
Grassilage	9	Mittelwert	23,6	19,9	6.672	528	60	83,4	41,6	2,4	573
		Min	15,1	11,3	4.147	n.n.	n.n.	67,6	33,5	2,0	352
		Max	34,2	30,1	9.352	2.277	225	88,3	44,4	3,4	823
GPS	25	Mittelwert	33,0	31,1	9.740	216	166	94,2	34,9	1,4	935
		Min	21,7	19,8	291	n.n.	n.n.	89,8	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	51,2	46,8	20.342	2.191	2.303	96,7	47,8	2,5	5.956
Getreideschrot	11	Mittelwert	88,6	85,9	590	n.n.	n.n.	96,9	34,0	1,9	1.450
		Min	85,9	81,7	144	n.n.	n.n.	94,5	1,9	1,6	811
		Max	91,2	89,3	1.937	n.n.	n.n.	98,0	45,2	2,1	2.260
Maisschrot	26	Mittelwert	60,0	58,7	4.332	63	32	97,9	35,5	1,3	1.290
		Min	53,0	51,9	n.n.	n.n.	32	94,3	35,5	1,3	1.290
		Max	72,9	71,8	8.187	774	434	99,6	46,2	1,6	5.668
Geflügelkot	24	Mittelwert	58,0	48,7	13.740	314	3.680	84,0	26,9	4,1	6.529
		Min	49,0	41,6	4.896	n.n.	1.184	80,1	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	65,5	55,1	24.814	1.106	11.409	87,5	42,6	5,3	12.120

Tab. A- 14: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage F

	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter 1	26	Mittelwert	8,6	7,9	0,35	941	74	1	7	4.136
		Min	5,8	7,4	0,18	58	n.n.	n.n.	n.n.	2.120
		Max	11,1	8,5	0,64	2.779	469	14	80	8.230
Hauptgärbehälter 2	26	Mittelwert	8,8	8,1	0,33	995	147	11	12	3.853
		Min	6,2	7,4	0,18	46	n.n.	n.n.	n.n.	2.134
		Max	10,4	8,4	0,66	2.859	1.186	125	86	6.257
Nachgärbehälter	24	Mittelwert	6,5	8,2	0,24	351	23	4	4	4.467
		Min	4,8	7,8	0,13	27	n.n.	n.n.	n.n.	690
		Max	9,4	8,5	0,38	1.336	273	64	52	7.080

Tab. A- 15: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage G

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	28	Mittelwert	29,5	28,4	4.611	56	47	96,2	16,9	0,9	710
		Min	25,9	24,8	1.158	n.n.	n.n.	95,1	n.n.	n.n.	260
		Max	33,4	32,3	12.034	401	778	97,3	46,8	1,2	3.160
Grassilage	17	Mittelwert	25,5	22,8	6.062	506	1.229	89,7	24,4	1,9	761
		Min	17,3	15,9	3.113	n.n.	n.n.	83,6	n.n.	n.n.	322
		Max	39,8	35,1	12.323	2.101	3.670	94,4	45,5	2,6	1.500
GPS	16	Mittelwert	28,6	27,1	6.075	n.n.	21	94,8	19,1	1,2	847
		Min	15,5	14,2	3.210	n.n.	n.n.	91,8	n.n.	n.n.	218
		Max	36,3	34,6	8.224	n.n.	290	97,1	50,0	1,8	4.720
Getreideschrot	11	Mittelwert	86,8	84,7	158	n.n.	n.n.	97,5	2,2	n.n.	3.394
		Min	83,9	82,2	158	n.n.	n.n.	95,7	1,8	n.n.	2.530
		Max	89,9	87,8	158	n.n.	n.n.	98,2	2,4	n.n.	4.220
Schweinegülle	12	Mittelwert	5,6	4,1	3.220	1.828	494	73,2	39,9	2,5	4.625
		Min	1,5	1,1	646	221	13	66,6	36,8	2,4	1.880
		Max	9,3	6,2	5.222	3.071	1.247	82,0	43,0	2,6	9.320
Rindermist	8	Mittelwert	24,7	19,9	1.900	1.219	212	81,1	28,7	2,0	2.494
		Min	20,7	17,8	602	n.n.	n.n.	73,9	n.n.	n.n.	685
		Max	34,3	26,9	5.081	2.260	784	87,0	43,4	2,8	10.210

Tab. A- 16: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage G

	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter	26	Mittelwert	8,2	7,7	0,58	2.300	404	49	25	2.738
		Min	7,0	7,2	0,38	510	n.n.	n.n.	n.n.	1.280
		Max	10,6	8,2	1,00	3.969	1.920	271	144	3.518
Nachgärbehälter	30	Mittelwert	7,1	7,9	0,35	706	149	15	7	2.944
		Min	6,2	7,4	0,17	74	n.n.	n.n.	n.n.	560
		Max	8,2	8,4	0,78	2.583	1.493	159	100	3.984

Tab. A- 17: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage H/H*

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	35	Mittelwert	27,4	26,3	8.081	452	48	95,7	42,6	1,3	594
		Min	20,1	18,5	143	n.n.	n.n.	91,8	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	36,6	35,4	15.474	2.238	817	97,0	47,0	2,4	2.990
Grassilage	16	Mittelwert	28,6	25,1	9.437	374	95	88,2	38,6	2,1	589
		Min	18,9	17,6	4.227	n.n.	n.n.	82,4	n.n.	n.n.	n.n.
		Max	40,7	35,3	15.301	1.201	614	93,8	47,4	3,3	1.290
GPS	8	Mittelwert	25,0	23,5	10.204	531	91	94,1	44,3	1,4	490
		Min	18,3	17,5	3.706	100	n.n.	84,8	35,8	1,1	191
		Max	31,1	29,9	15.501	1.942	638	96,1	47,1	2,1	1.050

Tab. A- 18: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage H/H*

H	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter	11	Mittelwert	10,9	7,5	1,27	2.052	2.987	451	524	2.072
		Min	9,4	7,0	0,51	268	6	n.n.	n.n.	1.310
		Max	11,8	8,2	2,13	3.373	4.117	645	2.568	3.150
Nachgärbehälter	11	Mittelwert	8,9	8,1	0,50	644	848	44	n.n.	2.461
		Min	8,4	8,0	0,30	236	n.n.	n.n.	n.n.	1.655
		Max	9,7	8,2	0,75	1.190	2.462	254	n.n.	3.519
H*	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter	16	Mittelwert	10,1	6,8	2,27	4.889	961	108	2.431	2.065
		Min	8,1	5,9	0,31	70	n.n.	n.n.	n.n.	1.774
		Max	12,2	7,9	3,92	11.127	2.315	424	6.231	2.429
Nachgärbehälter 1	16	Mittelwert	7,4	8,0	0,32	3.956	561	n.n.	536	2.143
		Min	5,8	7,7	0,25	117	n.n.	n.n.	n.n.	410
		Max	8,1	8,3	0,42	13.141	3.581	3	6.966	5.300
Nachgärbehälter 2	15	Mittelwert	7,7	8,0	0,39	3.465	860	27	689	2.526
		Min	5,8	7,7	0,25	117	n.n.	n.n.	n.n.	2.055
		Max	9,7	8,3	0,75	13.141	3.581	254	6.966	4.370

Tab. A- 19: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage I

n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N	
		%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹	
Maissilage	16	Mittelwert	33,8	32,4	6.218	407	264	95,7	42,4	1,3	548
		Min	14,7	14,0	816	n.n.	n.n.	94,1	8,4	1,1	85
		Max	65,8	63,1	12.298	1.670	1.833	96,6	46,1	1,8	1.750
Ligavatorbrei	20	Mittelwert	34,7	33,8	4.464	250	79	97,5	43,9	3,1	1.075
		Min	5,4	5,2	285	0	0	94,1	34,0	1,3	350
		Max	48,1	47,3	19.939	1.519	1.355	98,8	46,1	8,5	2.604
GPS	2	Mittelwert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Min	23,1	21,3	1.893	29	3	92,4	46,0	1,3	231
		Max	24,5	23,0	4.883	119	76	93,7	46,4	1,5	418
Rindergülle	3	Mittelwert	7,6	5,7	1.075	44	n.n.	75,7	n.n.	n.n.	3.249
		Min	6,3	4,5	773	n.n.	n.n.	71,6	n.n.	n.n.	1.996
		Max	9,6	7,4	1.378	88	n.n.	78,4	n.n.	n.n.	4.980

Tab. A- 20: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage I

n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N	
		%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	
Vorgärbehälter	27	Mittelwert	16,9	4,9	-	6807	1489	20	621	2952
		Min	7,3	4,2	-	31	119	0	0	320
		Max	26,6	6,7	-	16257	5552	148	4625	4910
Hauptgärbehälter	26	Mittelwert	6,2	8,2	0,35	2.019	442	15	27	5.007
		Min	4,8	7,7	0,27	73	n.n.	n.n.	n.n.	3.035
		Max	7,5	8,4	0,55	10.699	2.256	91	298	6.940

Tab. A- 21: Analysendaten der Einsatzstoffe für Pilotanlage J

	n		TM	oTM	Essig- säure	Propion- säure	Butter- säure	oTM	C	N	NH4-N
			%	%	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	% TM	% TM	% TM	mg*kg ⁻¹
Maissilage	33	Mittelwert	31,6	30,3	5.107	215	1.161	96,0	44,8	1,4	740
		Min	27,5	26,2	2.734	n.n.	n.n.	95,2	18,1	1,1	280
		Max	35,6	34,2	10.695	2.015	14.272	96,6	47,3	3,1	3.350
Grassilage	28	Mittelwert	40,1	36,7	4.163	677	8.879	91,0	44,6	1,9	1.275
		Min	20,7	18,3	n.n.	n.n.	n.n.	87,7	33,5	1,4	198
		Max	70,6	64,1	8.720	2.872	110.949	94,9	47,4	2,8	2.950
GPS	26	Mittelwert	34,9	33,0	6.553	220	170	94,5	44,1	1,6	1.041
		Min	17,1	16,1	1.021	n.n.	n.n.	92,6	12,6	1,0	295
		Max	45,8	42,9	13.120	1.718	1.554	97,3	46,9	2,0	2.870
WKS	12	Mittelwert	86,6	84,4	118	n.n.	n.n.	97,6	41,8	2,3	3.310
		Min	84,2	80,2	29	n.n.	n.n.	95,3	14,8	2,1	2.470
		Max	88,9	86,9	254	n.n.	n.n.	98,0	46,0	2,5	3.890
Getreideschrot	2	Mittelwert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Min	86,6	84,5	n.n.	n.n.	n.n.	95,9	40,7	2,1	1.350
		Max	89,1	85,5	n.n.	n.n.	n.n.	97,6	50,3	4,5	1.350
Gülle	13	Mittelwert	8,8	6,9	4.070	1.064	226	78,7	41,5	2,3	2.143
		Min	7,7	6,0	1.177	n.n.	n.n.	76,3	39,3	2,1	370
		Max	10,6	8,4	5.921	1.918	534	81,1	42,6	2,3	3.521

Tab. A- 22: Analysendaten der Gärgemischproben für Pilotanlage J

	n		TM	pH	FOS/ TAC	Essig- säure	Propion- säure	Iso- Butter- säure	Butter- säure	NH4-N
			%	-	-	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹	mg*kg ⁻¹
Hauptgärbehälter 1	24	Mittelwert	10,0	7,9	0,46	1.743	624	113	48	3.175
		Min	8,3	7,4	0,16	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2.507
		Max	12,4	8,4	1,40	7.730	2.729	733	296	4.020
Hauptgärbehälter 2	27	Mittelwert	10,0	8,1	0,60	427	5.385	235	4	3.870
		Min	7,7	7,7	0,24	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	410
		Max	12,9	8,4	1,42	1.518	19.496	923	57	5.210
Nachgärbehälter	17	Mittelwert	8,7	8,1	0,49	1.587	4.141	174	40	3.758
		Min	5,5	7,8	0,16	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	520
		Max	10,6	8,4	0,92	10.087	11.839	848	466	5.670

Weitere Materialien

Die folgenden ausführlichen Unterlagen wurden im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Biogas-Pilotbetriebe erarbeitet und können von Interessierten gegen eine Schutzgebühr von der Landesanstalt für Landwirtschaft erworben werden (<http://www.lfl.bayern.de/publikationen/?context=/lfl/>):

- Dokumentationsmappen der einzelnen Biogas-Pilotanlagen (enthalten Schnittzeichnungen, Lagepläne, isometrische Darstellungen und eine Beschreibung baulicher Details einschließlich zahlreicher Fotos)
- Videos und Poster der Biogas-Pilotanlagen auf CD-ROM