



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen

&

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



Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen

Dipl.-Ing. agr. Andreas Lehner

Dr.-Ing. Mathias Effenberger

Dr. agr. Andreas Gronauer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
Zusammenfassung	12
1 Einleitung	15
2 Stand des Wissens	17
2.1 Verfahrenstechnische Defizite auf Praxisanlagen.....	17
2.2 Zerkleinerung von Einsatzstoffen zur Biogasproduktion	18
2.3 Substratkonditionierung durch Desintegration	19
3 Zielstellung	21
4 Material und Methoden	22
4.1 Messtechnik zur Erfassung verfahrenstechnischer Kennwerte auf den Praxisanlagen	22
4.2 Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsverlaufes	23
4.3 Untersuchungen zur prozessinternen Substratkonditionierung.....	23
4.3.1 Ausgangssituation	24
4.3.2 Maßnahmen.....	24
4.3.3 Methoden der Datenerhebung	25
4.4 Bestimmung des Restgaspotentials von Gärmedien der untersuchten Biogasanlagen	27
4.5 Technik zur Abschätzung des Betriebs von Überdrucksicherungen.....	28
4.5.1.1 Überdrucksicherung - System Wassertasse	29
4.5.1.2 Überdrucksicherung - System Verdrängungskörper	30
4.6 Beprobung der Anlagen und chemische Analytik	31
5 Ergebnisse und Diskussion	32
5.1 Betriebsverläufe der untersuchten Biogasanlagen	32
5.1.1 Anlage A	32
5.1.2 Anlage B	34
5.1.3 Anlage C	36
5.1.3.1 Ausbaustufe 1 (C).....	36
5.1.3.2 Ausbaustufe 2 (C*).....	38
5.1.4 Anlage D	39
5.1.5 Anlage E.....	42

5.1.6	Anlage F.....	46
5.1.7	Anlage G.....	48
5.1.8	Anlage H.....	51
5.1.9	Anlage I.....	55
5.1.10	Anlage J.....	58
5.2	Ermittlung des Restgaspotentials.....	63
5.3	Substratkonditionierung auf Pilotanlage B.....	70
5.3.1	Bildanalytische Vermessung.....	70
5.3.2	Bestimmung von Partikelfraktionen mit Hilfe von Siebkolonnen.....	70
5.3.3	Einfluss der Konditionierung auf die Gasausbeute.....	71
5.3.4	Entwicklung des Betriebsverlaufes.....	73
5.4	Überwachung der Überdrucksicherungen.....	75
5.5	Einsatz von Gärhilfsstoffen.....	77
6	Schlussfolgerung und Ausblick.....	79
7	Veröffentlichungen.....	80
	Literaturverzeichnis.....	81
	Anhang.....	83
	Anhang 1: Formular zur Ermittlung verfahrenstechnischer Defizite durch bayerische Landtechnikberater.....	83

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verfahrenstechnische Defizite an landwirtschaftlichen Biogasanlagen nach einer Umfrage bayerischer Landtechnikberater (Umfrage von 2006).....	17
Abb. 2: Mechanismen der Elektroporation (schematisch); links: eine Zelle in einer leitfähigen Lösung zwischen zwei Elektroden; rechts: die auf die Zellmembran wirkenden Kräfte (Kopplow et al., 2004)	20
Abb. 3: Anlage B - Fließschema	24
Abb. 4: Anlage B – Integration der Verfahren zur Konditionierung des Fermenterinhalt in die Pumpleitung und dazugehörige Probenahmestellen	25
Abb. 5: Foto zur Vermessung von Partikellängen durch Bildanalyse	26
Abb. 6: Siebkolonne zur Bestimmung von Partikelfractionen	26
Abb. 7: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Restgaspotentials	27
Abb. 8: Schematischer Aufbau einer modifizierten Überdrucksicherung (System Wassertasse)	29
Abb. 9: Schematischer Aufbau einer modifizierten Überdrucksicherung (mechanische Ausführung; Skizze: Vertriebsunterlagen Firma agrikomp GmbH, Stand 03.09.2003).....	30
Abb. 10: Anlage A – installierte und erreichte elektrische Leistung	32
Abb. 11: Anlage A – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1	33
Abb. 12: Anlage A – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2	33
Abb. 13: Anlage B – installierte und erreichte elektrische Leistung.....	34
Abb. 14: Anlage B – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung	35
Abb. 15: Anlage C – installierte und erreichte elektrische Leistung.....	36
Abb. 16: Anlage C – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1	37
Abb. 17: Anlage C – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2	37
Abb. 18: Anlage C* – erreichte elektrische Leistung	38
Abb. 19: Anlage D – installierte und erreichte elektrische Leistung	40
Abb. 20: Anlage D – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung	40
Abb. 21: Anlage D – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter	41
Abb. 22: Anlage E - installierte und erreichte elektrische Leistung	42
Abb. 23: Anlage E – Verlauf des TM-Gehalts und der Ammonium-Konzentration im Fermenter	43
Abb. 24: Anlage E – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung.....	43
Abb. 25: Anlage E – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter	44
Abb. 26: Anlage E – Verlauf der Konzentration von FFS im Nachfermenter	45
Abb. 27: Anlage E – Schematischer Aufbau.....	46

Abb. 28: Anlage F – installierte und erreichte elektrische Auslastung	46
Abb. 29: Anlage F - Externe Wärmeverwertung	47
Abb. 30: Anlage F – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1	48
Abb. 31: Anlage F – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2.....	48
Abb. 32: Anlage G – installierte und erreichte elektrische Leistung	49
Abb. 33: Anlage G – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung	50
Abb. 34: Anlage G - Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter.....	51
Abb. 35: Anlage H – installierte und erreichte elektrische Leistung	52
Abb. 36: Anlage H - Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung.....	53
Abb. 37: Anlage H – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter	54
Abb. 38: Anlage H – Verlauf der Konzentration von längerkettigen FFS im Fermenter	54
Abb. 39: Anlage H – Verlauf der Konzentration von FFS in Nachfermenter 2.....	55
Abb. 40: Elektrische Leistungsausnutzung bei Pilotanlage I.....	56
Abb. 41: Anlage I - Heizwärme und externe Wärmeverwertung.....	57
Abb. 42: Anlage I – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter.....	58
Abb. 43: Anlage J – installierte und erreichte elektrische Leistung.....	59
Abb. 44: Anlage J – externe Wärmeverwertung	60
Abb. 45: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS in Fermenter 1.....	61
Abb. 46: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS in Fermenter 2.....	61
Abb. 47: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS im Nachfermenter	62
Abb. 48: Restgaspotential der Pilot-Biogasanlagen im Jahr 2007 bei 22 °C bzw. 38 °C.....	63
Abb. 49: Restgaspotential der Pilot-Biogasanlagen im Jahr 2008 bei 22 °C bzw. 38 °C.....	64
Abb. 50: Abhängigkeit des Restgaspotentials (22°C) von der hydraulischen Verweilzeit	66
Abb. 51: Abhängigkeit des Restgaspotentials von der hydraulischen Verweilzeit und der Anzahl der Gärstufen	67
Abb. 52: Restgaspotential in Abhängigkeit vom FFS-Gehalt in der letzten Gärstufe -1 ...	68
Abb. 53: Restgaspotential in Abhängigkeit vom FFS-Gehalt in der letzten Gärstufe -2...	68
Abb. 54: Anteil der Partikelfractionen bei bildanalytischer Vermessung.....	70
Abb. 55: Längenverteilung je Partikelfraktion vor und nach der Zerkleinerung im zeitlichen Verlauf	71
Abb. 56: Verlauf der Biogasproduktion (Probenahme am 18.01.2007)	72
Abb. 57: Anlage B – Temperaturverlauf in Fermenter und Nachfermenter.....	74

Abb. 58: Anlage B – Verlauf von Anlagenleistung und Substratzugabe bei unterschiedlichen Maßnahmen	74
Abb. 59: Anlage B – Verlauf des Stromeigenverbrauches	75
Abb. 60: Anlage G – Verlauf von Futterwert und TM-Gehalt bei Maissilage	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Messgrößen und technische Ausstattung der untersuchten Biogasanlagen	22
Tab. 2:	Richtwerte der Prozessindikatoren für ein einphasiges Verfahren im Rührkesselreaktor (nach Effenberger et al., 2007).....	23
Tab. 3:	Messtechnik zur Erfassung von Gasverlusten an Überdrucksicherungen.....	30
Tab. 4:	Übersicht über Analysenparameter für Proben der Substrate, der Gärgemische und der Gärrückstände	31
Tab. 5:	Anlage C – Durchschnittliche Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren in Fermenter 1 und Fermenter 2 [mg Essigsäureäquivalent/l]	38
Tab. 6:	Anlage H – verfahrenstechnische Kennzahlen der zwei Ausbaustufen	52
Tab. 7:	Vergleich der Restgaspotentiale der Jahre 2007 und 2008 [Nl * (kg FM)]	65
Tab. 8:	Ergebnisse der Gärversuche bei Probenahme vor bzw. nach der Konditionierung	73
Tab. 9:	Registrierte Überdruckereignisse an den untersuchten Praxisanlagen.....	76
Tab. 10:	Einsatz von Wirtschaftsdünger und Gärhilfsstoffen in den Anlagen	77

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
TMPR	Tauchmotorpropellerrührwerk
TM	Trockenmasse
oTM	organische Trockenmasse
ÜDS	Überdrucksicherung
FFS	flüchtige Fettsäuren
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe

Zusammenfassung

Das Projekt wurde mit dem Ziel durchgeführt, Defizite im Bereich Technik und Anlageneffizienz auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu ermitteln. Dabei wurde beabsichtigt, durch die Untersuchungen Betreibern eine Hilfestellung zur Sicherung eines stabilen Anlagenbetriebes zu geben sowie Neueinsteigern wertvolle Ratschläge zur Anlagenplanung bereit zu stellen.

Durch die Befragung bayerischer Landtechnikberater wurden Anlagenbereiche ermittelt, die auf Praxis-Biogasanlagen in vielen Fällen Störungen verursachen. Die intensive Datenerhebung an zehn bayerischen Biogas-Pilotbetrieben lieferte die Datengrundlage für die Beurteilung des Anlagenbetriebes.

Bei einigen der untersuchten Anlagen wurden sehr zufriedenstellende Werte in der elektrischen Auslastung erreicht. Leistungseinbrüche hatten recht unterschiedliche Gründe. Bisweilen konnten Ausfälle technischer Komponenten wie Rührwerke oder Eintragstechnik für die Defizite verantwortlich gemacht werden. Bei drei der zehn Anlagen waren prozessbiologische Hemmungen die Ursache für den Leistungsrückgang. Allein das Niveau der Konzentration flüchtiger Fettsäuren ließ dabei keinen direkten Schluss auf die Leistungsstabilität der Praxisbiogasanlagen zu.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei vielen der untersuchten Biogasanlagen vor allem in der warmen Jahreszeit große Anteile der thermischen Energie ungenutzt blieben. Die Entwicklung geeigneter Wärmekonzepte stellte sich in vielen Fällen als schwierig heraus. Trotzdem besteht durch die Steigerung der Wärmeverwertung die einfachste Möglichkeit, die Gesamteffizienz einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zu steigern.

Zur Bewertung des Abbaugrades der Einsatzstoffe wurden Restgaspotentialmessungen durchgeführt. Die Messungen der Anlagen aus zwei aufeinanderfolgenden Jahren wichen teils deutlich voneinander ab. Es zeigte sich jedoch, dass bei einer Verweilzeit von unter 100 Tagen auch in mehrstufigen Anlagen mit einem erhöhten Restgaspotential von mehr als 1 % gerechnet werden muss. Für die Einschätzung des Restgaspotential-Niveaus kann mit Einschränkungen der Gehalt an flüchtigen Fettsäuren in der Gärrestprobe herangezogen werden. Anlagen mit einer Konzentration von weniger als 500 mg Essigsäureäquivalent/kg wiesen meist ein Restgaspotential von weniger als 1 % auf. Auf Grundlage des verfügbaren Datensatzes konnte jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gesamtverweilzeit und Restgaspotential formuliert werden.

Es wurden verschiedene Verfahren zur Substratkonditionierung an einer Praxis-Biogasanlage untersucht. Bei Verwendung eines Nasszerkleinerers konnte eine merkliche Reduzierung der durchschnittlichen Partikellänge bewirkt werden. Eine signifikant positive Auswirkung auf die Biogasausbeute konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Weiterhin wurde der Effekt eines Verfahrens zum Substrataufschluss mittels Hochspannung geprüft. Eine signifikante Steigerung der Biogasausbeute durch den Einsatz der Hochspannungselektrode konnte auch hier nicht belegt werden.

Die Messungen an Überdrucksicherungen bestätigten, dass es in der Praxis auch bei vergleichsweise ruhigem Betrieb wiederholt zu Überdruckereignissen kommt. Die Messungen lassen allerdings keinen Rückschluss auf die tatsächlich über die Überdrucksicherung entwichenen Gasmengen zu.

In sieben der zehn untersuchten Anlagen kamen zumindest zeitweise Gärhilfsstoffe zum Einsatz. Einige der Stoffe sollten zur Steigerung der Biogasausbeute beitragen. Hier konnte kein eindeutiger Effekt auf die erreichte Biogasausbeute nachgewiesen werden. Es ist festzuhalten, dass die Wirkung von Gärhilfsstoffen auf die Biogasausbeute bei Praxisanlagen schwer zu ermitteln ist, da es auf Großanlagen nicht möglich ist, den Anlagenbetrieb über einen längeren Zeitraum unter absolut konstanten Bedingungen sicher zu stellen. Vor allem die Qualität der Substrate unterliegt teils deutlichen Schwankungen.

Die Untersuchungen zeigten, dass bereits nach wenigen Betriebsjahren bei verschiedenen Anlagenkomponenten Verschleiß feststellbar ist. Die Eintragstechnik sowie die Lager von Rührwerken zeigten sich dabei besonders anfällig. Für den Betreiber ist es dringend notwendig, bereits bei der Anlagenplanung die eingesetzte Technik und die beabsichtigten Einsatzstoffe aufeinander abzustimmen.

1 Einleitung

Mit der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2004 wurden attraktive finanzielle Rahmenbedingungen für die landwirtschaftliche Biogasproduktion geschaffen. Festgeschriebene Stromeinspeisetarife gaben Planungssicherheit und schienen die Rahmenbedingungen für eine langfristig rentable Investition festzulegen. In der Folge konnte eine starke Zunahme im Bereich von Planung und Bau landwirtschaftlicher Biogasanlagen verzeichnet werden.

Im Laufe des Anlagenbetriebes muss der Betreiber mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen zurecht kommen, die sich direkt auf den wirtschaftlichen Erfolg des Projektes auswirken. Während einige dieser Faktoren kaum oder gar nicht beeinflusst werden können, bieten andere durchaus Möglichkeiten. Bei der gesetzlich geregelten Einspeisevergütung oder aber auch beim Substratpreisniveau eines jeden Jahres sind dem Betreiber quasi die Hände gebunden. Diese Größen müssen akzeptiert werden. Geht es jedoch darum, den Anlagenbetrieb bei hoher Auslastung stabil zu halten und die Anzahl der jährlichen Volllaststunden zu maximieren, ist das Geschick des Betreibers gefragt. Dabei ist einerseits das Sammeln von Erfahrungen im Austausch mit Berufskollegen und Fachberatung Grundvoraussetzung, andererseits gilt es, durch die Wahl geeigneter verfahrenstechnischer Komponenten den verlässlichen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Für den landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreiber ist somit zunächst einmal wichtig zu erkennen, wo sich die Stellschrauben auf seiner Anlage befinden, die es ihm ermöglichen, den Erfolg seiner Investition mehr oder weniger stark zu beeinflussen.

Die Höhe der Vergütung für eingespeisten Strom wurde in einer Phase beschlossen, in der der Preis für landwirtschaftliche Rohstoffe auf niedrigem Niveau lag und auch von vielen Fachleuten mittelfristig keine wesentliche Erhöhung erwartet wurde. Die vorübergehende Hochpreisphase für Agrarrohstoffe im Jahr 2007 zeigte jedoch eindrucksvoll auf, dass eine feste Einspeisevergütung nicht nur als Recht, sondern auch als Pflicht anzusehen ist. Der ursprüngliche Hauptgrund für den Einstieg in die Biogasproduktion – festgeschriebene Einspeisetarife – setzte die Betreiber wider Erwarten stark unter Druck und gefährdete die Wirtschaftlichkeit eines Großteils der bestehenden Anlagenkonzepte. Gerade in dieser Phase konnte in der Praxis verständlicherweise ein starkes Bestreben fest gestellt werden, die Prozessabläufe zu verbessern und bisher nicht genutzte Potentiale auszuschöpfen.

Da die prekäre Situation jedoch unter den gegebenen Bedingungen in vielen Fällen keinen rentablen Betrieb zuließ, wurden in der Folge die gesetzlichen Regelungen neuerlich diskutiert und überarbeitet, um grundsätzliche Voraussetzungen zum rentablen Betrieb von landwirtschaftlichen Biogasanlagen sicher zu stellen. Die Maßnahmen flossen in die Novelle des EEG ein, die zum Jahresbeginn 2009 in Kraft trat.

In vielen Punkten verbesserte Einspeisekonditionen – gepaart mit einem mittlerweile wieder deutlich niedrigeren Preisniveau für Agrarrohstoffe – führen gegenwärtig dazu, dass sich die landwirtschaftliche Biogasproduktion für Anlagenbetreiber wieder Gewinn bringend sowie für Neueinsteiger als interessante Option darstellt. Allerdings ist fest zu halten, dass in dieser erneuten Niedrigpreisperiode für Agrarrohstoffe in vielen Fällen das unbedingte Streben nach einer Effizienzsteigerung teils wieder etwas in den Hintergrund gerückt ist. Doch Experten aus der Land- und Ernährungswirtschaft sind sich einig, dass in Zukunft mit tendenziell steigenden Preisen für Agrargüter zu rechnen ist. Dabei werden für die Agrarmärkte insbesondere starke Preisschwankungen prognostiziert. In Anbetracht

dieser Aussichten ist es für Betreiber von Biogasanlagen unvermeidbar, stets nach der Optimierung von Prozessabläufen zu streben.

Einen Angriffspunkt zum erfolgreichen Betrieb einer Biogasanlage stellt die Auswahl geeigneter Anlagentechnik bereits in der Planungsphase dar. Mit den hohen Zuwachsraten in der Biogasbranche in den erwähnten Boomjahren wurde auch eine zunehmende Anzahl von Firmen im Bereich der Planung und Ausführung landwirtschaftlicher Biogaskonzepte aktiv. Während verschiedene Firmen Komplettlösungen aus einer Hand anbieten, beschränken sich andere auf den Vertrieb einzelner Anlagenkomponenten. Dabei werden je nach Hersteller und Konzeption teils recht unterschiedliche technische Lösungen angeboten. Ein Großteil der Baugruppen, die in der Biogastechnologie verbaut werden, hat seinen Ursprung in der Tierhaltung. So werden Misch- und Dosiereinrichtungen für Feststoffe verwendet, die teils aus der Tierfütterung bekannt sind. Auch bei der Durchmischung der Gärbehälter wird häufig Rührtechnik eingesetzt, die bereits aus der Güllelagerung bekannt ist. Firmen aus dieser Branche nutzten den boomenden Anlagenbau, um ihre Produkte neben der Tierhaltung nun auch im Bereich der landwirtschaftlichen Energieerzeugung zu vertreiben. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese technischen Einrichtungen beim Betrieb einer Biogasanlage deutlich stärker beansprucht werden als in der Tierhaltung. So sind zum einen deutlich höhere Substratdurchsatzmengen zu bewältigen, andererseits werden verschiedene Komponenten teils im Dauerbetrieb eingesetzt. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass Projektlaufzeiten von mindestens 20 Jahren angestrebt werden, um eine zufrieden stellende Rentabilität der Investition sicher zu stellen.

Für Betreiber ist es daher wichtig, in jedem individuellen Fall die Angriffspunkte auszumachen, die zur Verbesserung des Betriebsergebnisses beitragen können. In den hier dargestellten Untersuchungen werden auf Basis von auf Praxisanlagen erhobener Daten Empfehlungen zur Verbesserung der Effizienz und Betriebsstabilität landwirtschaftlicher Biogasanlagen gegeben. Hierzu gehört auch die Reduzierung von Gasverlusten im Verlauf des Anlagenbetriebes, da sich diese auf die Treibhausgasbilanz und Wirtschaftlichkeit der Energiebereitstellung aus Biogas auswirken.

2 Stand des Wissens

Die Produktion von Biogas in der Landwirtschaft wird in Deutschland schon seit mehreren Jahrzehnten betrieben. Als betriebswirtschaftlich eigenständige Produktionsrichtung erlangte die Biogaserzeugung allerdings erst mit der gesetzlichen Regelung der Einspeisebedingungen für produzierten Strom Bedeutung. Erst mit der Etablierung des NawaRo-Bonus in Form einer zusätzlichen Vergütung für Strom aus der ausschließlichen Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern wurden zur Biogasproduktion verstärkt nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. Der hier dargestellte Stand des Wissens beschränkt sich auf verfahrenstechnische Defizite von Biogasanlagen, die hohe Anteile nachwachsender Rohstoffe einsetzen. Dabei stellt die Konsistenz der verwendeten Materialien einen Schwerpunkt der Betrachtungen dar. Ebenso werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie auf die Beschaffenheit der Einsatzstoffe Einfluss genommen werden kann.

2.1 Verfahrenstechnische Defizite auf Praxisanlagen

Zur Identifizierung von Verfahrensbereichen der Biogasproduktion, die in der Praxis zu Störungen des Anlagenbetriebs führen, wurde zu Beginn der Untersuchungen eine Befragung der amtlichen bayerischen Landtechnikberater durchgeführt. Mithilfe eines Fragebogens (vgl. Anhang) sollten die Berater im jeweiligen Dienstbezirk das Auftreten verfahrenstechnischer Defizite auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen ermitteln. Abb. 1 kann zwar keine Information über konkrete Ursachen von Störungen liefern, doch zeigt sich, dass aus vielen Dienstgebieten vor allem von Problemen in den Bereichen Substrateinbringung und Rührtechnik berichtet wurde.

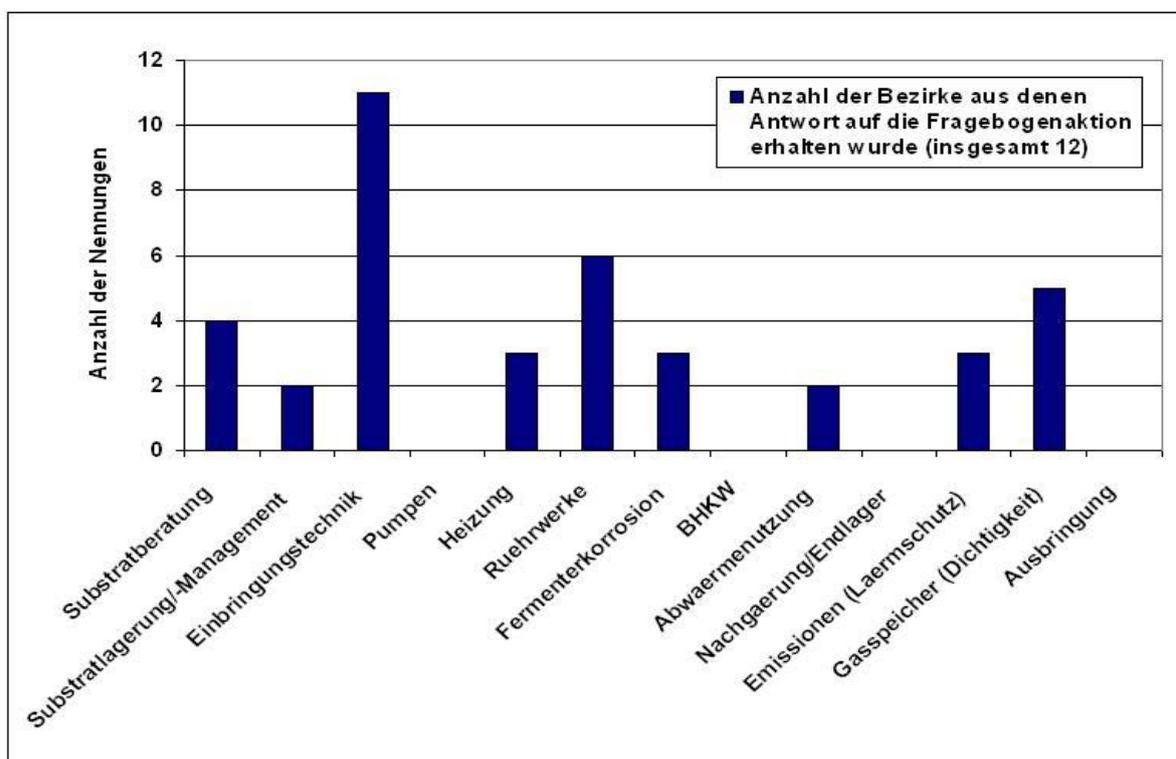


Abb. 1: Verfahrenstechnische Defizite an landwirtschaftlichen Biogasanlagen nach einer Umfrage bayerischer Landtechnikberater (Umfrage von 2006)

Bei der Substrateinbringung wurde neben dem Verstopfen des Eintragssystems und der Bildung von Klumpen auch die geringe Genauigkeit der integrierten Wägeeinrichtungen bemängelt. Auffällig ist, dass nach dieser Umfrage die Blockheizkraftwerke auf den befragten Anlagen keine Probleme verursachten.

Weitere Befragungen von Anlagenbetreibern wurden im Rahmen des Bundesmessprogramm II, einem bundesweiten Monitoring-Programm für Biogasanlagen, durchgeführt. Hier wurden als die störanfälligsten Funktionseinheiten identifiziert:

- Blockheizkraftwerke
- Feststoffeintragssysteme
- Pumpen, Rohrleitungen und Armaturen,
- Rührwerke
- Biogasprozess

Die oben genannten Einheiten machen dabei in der Summe bereits 78 % aller erfassten Störfälle aus (KTBL, 2009). Bei den Blockheizkraftwerken differierte die Störanfälligkeit in Abhängigkeit vom eingesetzten BHKW-Typ. Während bei Gasmotoren die Motorregelung und das Aufladesystem oft der Grund für Störungen waren, sind bei Zündöl-BHKW in vielen Fällen Defekte im Bereich des Brennstoffsystems als Ursachen für Störfälle auszumachen.

Wie die Untersuchungen weiter zeigten, ist im Bereich der Funktionseinheit Feststoffeintrag das Schneckensystem zur Förderung stapelfähiger Substrate die störanfälligste Komponente. Hohe Durchsatzmengen und bisweilen hohe Anteile faseriger Substrate tragen dabei zum Verschleiß der Komponenten bei. Dasselbe gilt für Pumpen und Rohrleitungen, die ebenfalls vor allem bei der Förderung faseriger Stoffe zu Problemen führen. Als geeignete Rührtechnik zur Durchmischung von Fermenterinhalt mit hohen Trockenmassgehalten haben sich in den letzten Jahren zunehmend langsam laufende Rührwerke wie Paddel- und Haspelrührwerke erwiesen. Die Schwachstellenanalyse im Rahmen des Bundesmessprogramms (KTBL, 2009) zeigt hier auf, dass in erster Linie Tauchmotor-Propellerrührwerke (TMPR) zu Problemen auf Praxisanlagen führten. Betriebsausfälle wurden dabei häufig durch Motorüberhitzungen aber auch durch Korrosion der Rührerlemente bedingt.

2.2 Zerkleinerung von Einsatzstoffen zur Biogasproduktion

In der landwirtschaftlichen Biogasproduktion kommt eine breite Palette an Einsatzstoffen zur Anwendung. Diese unterscheiden sich oft deutlich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Vor allem bei Substraten, die erhöhte Anteile an faserigen Strukturen aufweisen (z.B. Gräser), ist eine Zerkleinerung notwendig, um eine Handhabung in der Verfahrenskette Biogaserzeugung zu ermöglichen. Die Zerkleinerung von Substraten kann dabei an verschiedenen Stellen der Verfahrenskette erfolgen:

- bereits bei der Ernte/vor der Silierung
- bei der Feststoffdosierung
- vor der Einbringung in die Vorgrube
- durch Zerkleinerungsrührwerke in der Vorgrube

- in einer Geräteeinheit mit der Fördertechnik
- als Aggregat in der Förderleitung (FNR, 2006)

Wird die Zerkleinerung durch ein zusätzliches Aggregat in der Pumpleitung realisiert, so hat dies den Vorteil, dass bei einem Ausfall dieses Aggregates der Betrieb der Pumpe unabhängig davon weiterhin möglich ist. Überdies besteht in diesem Fall die Möglichkeit, das Gerät gut zugänglich zu installieren und damit wartungsfreundlich in den Prozess zu integrieren. Diese Variante war Gegenstand verschiedener im Rahmen des Projektes durchgeführter Untersuchungen (vgl. Kap. 4.3; S. 23). Probleme entstehen dadurch, dass die Förderleistung mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt stark abnimmt. Bei diesem System ist es wichtig, dass Fremdkörper bereits vor der Zerkleinerung abgeschieden werden (FNR, 2006). Durch Substratzerkleinerung wird die Oberfläche und somit die Angriffsfläche für die Bakterien größer. Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus, aber nicht zwingend die gesamte Gasausbeute steigt (FNR, 2006).

Bezüglich der Auswirkung einer intensiven Zerkleinerung von Substraten auf die Biogasausbeute des Substrates werden in der Wissenschaft jedoch teils unterschiedliche Meinungen vertreten. Winterberg (2005) sieht die Möglichkeit, durch eine mechanische Zerkleinerung, beispielsweise durch Mazerator, Schneidsieb oder Fräswerk, bei Steigerung des Faserabbaugrades um 25 % und einem Rohfaseranteil von 20 % bezogen auf die Trockenmasse den Gasertrag bei Maissilage um ca. 5 % zu steigern. Dem entgegengesetzt wurde bei Gärversuchen mit Grassilage unterschiedlicher Schnittlänge festgestellt, dass auf 5 mm zerkleinerte Silage im Vergleich zur unbehandelten Silage mit einer Häcksellänge von 55 mm keine höhere Methanausbeute liefert (Lechner, 2005).

Unbestritten ist jedoch, dass kürzere Schnittlängen die Handhabung bestimmter Substratgruppen in der Biogasproduktion positiv beeinflussen. Eine Zerkleinerung ist dabei vor allem bei langfaserigen Substraten wie z. B. Gras oder Stroh von Vorteil. Hier ist eine Zerstörung der Struktur wichtig, um einen schnelleren Aufschluss zu erhalten. Dadurch ist es möglich die Fermentationsleistung erheblich zu steigern und Probleme, wie z. B. verminderte Pumpfähigkeit, Leitungsverstopfungen, Verminderung der Rührfähigkeit sowie eine stärkere Neigung zur Schwimmdeckenbildung zu verhindern (BayLfU, 2004).

Nach Kaltschmitt & Hartmann (2001) sollte bei einer mechanischen Zerkleinerung eine Partikelgröße von kleiner 3 cm angestrebt werden. Dabei wird empfohlen, grundsätzlich langsam laufende Aggregate einzusetzen, um zu verhindern, dass Schwermetallabrieb in das Substrat gelangt.

2.3 Substratkonditionierung durch Desintegration

Neben der mechanischen Zerkleinerung besteht die Möglichkeit, die Verdaulichkeit von Substraten durch Desintegrationsverfahren zu steigern. Der Aufschluss von Medien mittels Desintegration wurde ursprünglich im Bereich der Abwassertechnik bei der Klärschlammbehandlung betrieben. In einer grundlegenden Begriffsdefinition versteht man darunter die Zerkleinerung von Klärschlämmen durch die Einwirkung äußerer Kräfte. Im Unterschied zur mechanischen Zerkleinerung wird bei der Desintegration der Aufschluss nicht durch Einkürzung, sondern durch eine Zerstörung der Zellstruktur erreicht.

Die Behandlung führt dabei zu einer Auflösung der Flockenstruktur des Schlammes und zu einem Aufschluss durch Mikroorganismen, die darin enthalten sind. Der Grad der Zerkleinerung ist abhängig von der eingesetzten Energie und den Eigenschaften des zu be-

handelnden Schlammes. Im Bereich der Klärtechnik verspricht man sich durch Desintegration eine Erhöhung des Abbaus der organischen Substanz, eine Steigerung der Biogas-Ausbeute und eine Reduktion des Faulschlamm-Anfalles (Abwasserverband Wiener Neustadt-Süd, 2007).

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist die Desintegration bisher nur wenig verbreitet. Ursachen hierfür sind die zusätzlichen Investitionen, deren betriebswirtschaftliche Sinnhaftigkeit bisher nicht hinreichend abgesichert ist. Einziges System, das bisher auf dem Markt in größerem Umfang zum Einsatz kommt, ist das thermische Desintegrationsverfahren. In der landwirtschaftlichen Biogasproduktion verspricht man sich von der Desintegration in erster Linie einen verbesserten Aufschluss lignozellulosehaltiger Substratbestandteile und in dessen Folge eine verbesserte Ausnutzung des vorhandenen Biogaspotentials der eingesetzten Substrate.

Beim Verfahren der elektrokinetischen Desintegration (vgl. Abb. 2) wird durch eine Stoßwellenbehandlung nach Überschreitung der dielektrischen Festigkeit des Behandlungsmediums ein elektrischer Durchschlag erreicht. So entsteht eine hohe Strahlungsintensität, die in Flüssigkeiten eine Schockwelle erzeugt. Diese führt zu Scherkräften, die auf die Mikroorganismen einwirken. Dies bedeutet, dass durch das Anlegen eines elektrischen Feldes die Zellmembranen zusammengedrückt werden, bis diese zusammenbrechen (= Elektroporation; vgl. Abb. 2). Dies führt teilweise bis zum Absterben der Zellen (Zimmermann, 1996). Die wichtigsten Einflüsse auf die Effektivität dieser Behandlung stellen die elektrische Feldstärke, der spezifische Energieeintrag und die Behandlungstemperatur dar.

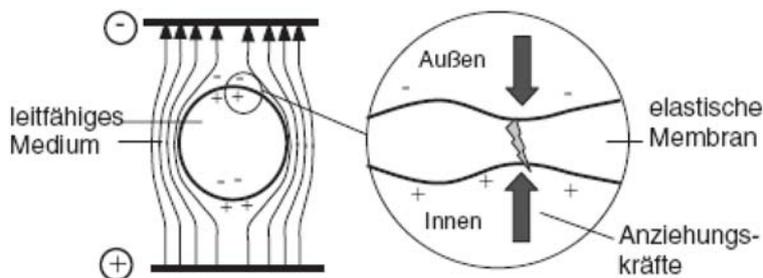


Abb. 2: *Mechanismen der Elektroporation (schematisch); links: eine Zelle in einer leitfähigen Lösung zwischen zwei Elektroden; rechts: die auf die Zellmembran wirkenden Kräfte (Kopplow et al., 2004)*

Ein alternatives Aufschlussverfahren stellt die Ultraschalltechnik dar. Durch die Behandlung einer Suspension mit hoher Frequenz kommt es im Medium zur Bildung von Hohlräumen (Kavitation), in deren Folge starke Scherkräfte entstehen. Auf diese Weise wird ein Aufschluss der Zellstrukturen bewirkt.

3 Zielstellung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Anlagenbetriebs dokumentiert und deren Effekte beurteilt. Ziel der Untersuchungen war es, Defizite im Bereich Technik und Anlageneffizienz auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu ermitteln. Auf diese Weise sollte eine Datengrundlage geschaffen werden, um Betreibern eine Hilfestellung zur Sicherung eines stabilen Anlagenbetriebes zu geben. Potentiellen Neueinsteigern in die landwirtschaftliche Biogasproduktion sollte damit bereits in der Planungsphase von Biogasprojekten Ratschläge zur geeigneten Auslegung und Dimensionierung der Anlage bzw. von Anlagenkomponenten bereit gestellt werden.

Durch die Begleitung von Praxis-Biogasanlagen über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren wurde die Möglichkeit geschaffen, die Dynamik verschiedener Prozessparameter darzustellen. Während die Betrachtung der Mittelwerte von Kennwerten zwar eine grobe Beurteilung von Prozessparametern ermöglicht, wurde in diesem Projekte die Dynamik von Kennzahlen über die Meßdauer dargestellt. Die Darstellung der Betriebsverläufe der untersuchten Anlagen anhand verschiedener Kennwerte zeigte auf, wie stabil die Anlagen über den Untersuchungszeitraum betrieben wurden bzw. wodurch die erfassten Betriebsstörungen verursacht wurden. Die Darstellung von baulichen oder prozesstechnischen Eingriffen sowie deren Effekte auf Praxisanlagen sollten Möglichkeiten aufzeigen, inwieweit sich konkrete Maßnahmen auf den Betriebsablauf auswirken.

4 Material und Methoden

4.1 Messtechnik zur Erfassung verfahrenstechnischer Kennwerte auf den Praxisanlagen

Die messtechnische Ausstattung von Biogasanlagen unterscheidet sich oft recht deutlich. Während neuere Anlagenkonzepte meist bereits eine gute Grundausstattung an Messtechnik aufweisen, haben kleinere und ältere Anlagen häufig Defizite. In der wissenschaftlichen Begleitung von zehn Pilot-Biogasanlagen (im Folgenden Anlage A bis J) wurde die auf den Praxis-Biogasanlagen vorhandene Messtechnik gegebenenfalls ergänzt. Tab. 1 zeigt die wesentlichen Größen, die auf den Biogasanlagen erfasst wurden.

Tab. 1: Übersicht zu den Messgrößen und zu deren Erfassung eingesetzten Messtechnik auf den untersuchten Biogasanlagen

Messgröße	Einheit	Messintervall	Messvorrichtung
Masse der Einsatzstoffe	kg	Tag	Wägezellen; dynamisches Wägesystem
Volumen der Einsatzstoffe	m ³	Tag	magnetisch-induktiver Durchflussmesser; Pumpenlaufzeit
Trockenrückstand Einsatzstoffe	der %	Monat	Waage und Trockenschrank
Glührückstand der Einsatzstoffe	der Ein-%	Monat	Waage und Muffelofen
Biogas-Volumenstrom	m ³ *h ⁻¹	kontinuierlich	strömungsmechanischer Durchflussmesser
Biogastemperatur	°C	kontinuierlich	PT100
Biogasdruck	hPa	kontinuierlich	Druckmessumformer
Biogas-Massestrom	kg*h ⁻¹	kontinuierlich	thermischer Massestrommesser
Biogas-Methangehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	IR- oder Wärmeleitfähigkeitssensor
Biogas-Kohlendioxidgehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	IR-Sensor
Biogas-Sauerstoffgehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	elektrochemischer Sensor
Brutto-Strom BHKW	kWh	kontinuierlich	Stromzähler an Generator клемmen
Brutto-Wärme BHKW	kWh	kontinuierlich	Wärmemengenzähler
Strombedarf BGA	kWh	kontinuierlich	Stromzähler Gesamtanlage oder Stromaufnahme Einzelaggregate
Wärmeabsatz	kWh	kontinuierlich	Wärmemengenzähler

Eine bedeutende Bezugsgröße und damit aber auch eine entscheidende Fehlerquelle für die Ermittlung von Kennzahlen stellt die Masse und Zusammensetzung der Einsatzstoffe dar. Eine korrekte Wägung zumindest der fest zugeführten Biomasse ist zur Bewertung von Anlagenkonzepten zwingend erforderlich.

Die Datenerfassung auf den Anlagen wurde unterschiedlich gelöst. Ein Großteil der Parameter wurde von den Anlagenbetreibern in einem Betriebstagebuch festgehalten. Die Zusammensetzung der Substrate und der Inhalte der Gärbehälter wurde in monatlichen Abständen analysiert. Die Analysen führte das institutseigene Labor sowie in der Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen der Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Weiter zeigt Tab. 1 eine Reihe von Parametern, die kontinuierlich erfasst wurden. Zu diesem Zweck wurden an den Biogasanlagen Datenlogger installiert, die vor allem bei dynamisch verlaufenden Messgrößen eingesetzt wurden.

4.2 Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsverlaufes

Für die Bewertung des Betriebsergebnisses einer landwirtschaftlichen Biogasanlage ist in erster Linie entscheidend, dass bestimmte Leistungsdaten, die der betriebswirtschaftlichen Kalkulation in der Planungsphase zugrunde gelegt wurden, im Durchschnitt über die gesamte Projektlaufzeit erreicht werden. Die Darstellung der Betriebsverläufe der zehn untersuchten Anlagen wird in einem weiteren Schritt die Dynamik aufzeigen, die sich im Laufe der Datenerhebung ergeben hat. Hierbei spielt zunächst die Ausnutzung der installierten elektrischen Leistung eine Rolle, da der Großteil der Betriebseinnahmen über die Einspeisung, d.h. den Verkauf von elektrischem Strom bestritten wird.

Überdies wurde die Konstanz (bio-)chemischer Kennwerte geprüft bzw. deren Verlauf verfolgt. Schließlich trägt ein stabiler Prozessverlauf dazu bei, den Aufwand für die Betreuung der Anlage zu reduzieren und senkt zugleich das Risiko finanzieller Einbußen aufgrund von Leistungsabfällen. An der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurden in diesem Zusammenhang Richtwerte für Prozessparameter definiert, die aufgrund von Erfahrungen aus der Praxis für die Sicherstellung eines gleichmäßigen Anlagenbetriebs zu empfehlen sind (vgl. Tab. 2).

Tab. 2: Richtwerte der Prozessindikatoren für ein einphasiges Verfahren im Rührkesselreaktor (nach Effenberger et al., 2007)

Prozessindikator		Fermenter	Nachfermenter
FFS	[mg _{eq.} *kg ⁻¹]	<4000	<2000
Essigsäure	[mg _{eq.} *kg ⁻¹]	<3000	<1000
Propionsäure	[mg _{eq.} *kg ⁻¹]	<1000	<500
Buttersäure	[mg _{eq.} *kg ⁻¹]	<50	<<50
FOS/TAC	[-]	<0,5 - 0,8	<0,3
Ammonium (NH ₄ -N)	[mg*kg ⁻¹]		<3000
pH-Wert	[-]	7,0 – 7,5	7,0 – 8,0
Methangehalt im Biogas	[Vol.-%]		>48

mg_{eq.}: Essigsäureäquivalent

Die aufgezeigten Parameter weisen dabei unterschiedlich schnell auf eine beginnende Destabilisierung der Gärbiologie hin. Die Werte sind lediglich als Richtwerte zu verstehen. Meist hat sogar der Verlauf der Werte eines Parameters für die anlagenspezifische Beurteilung mehr Aussagekraft als der absolute Wert.

4.3 Untersuchungen zur prozessinternen Substratkonditionierung

Anhand von Untersuchungen auf einer Pilot-Biogasanlage wurden die Effekte zweier Techniken zur Substratkonditionierung bei Verwendung in der Biogasproduktion ermittelt und bewertet.

4.3.1 Ausgangssituation

Bei der Praxisanlage handelte es sich um ein zweistufiges Konzept, d. h. dem Hauptfermenter schließt sich ein Nachfermenter an. Schließlich gelangt das Gärmedium in ein offenes Gärrestlager (vgl. Abb. 3). Die Praxisanlage wird von ökologisch wirtschaftenden Landwirten betrieben. Da im ökologischen Landbau Klee gras ein zentrales Glied in der Fruchtfolge bildet, stellt es auf dieser Anlage eine wichtige Komponente im Substratmix dar. Über die Projektlaufzeit wurde die Biogasanlage im Durchschnitt mit einem Klee grasanteil von ca. 80 % betrieben. Die Anlage wurde mit ca. 45°C im Fermenter und 32°C im Nachfermenter betrieben.

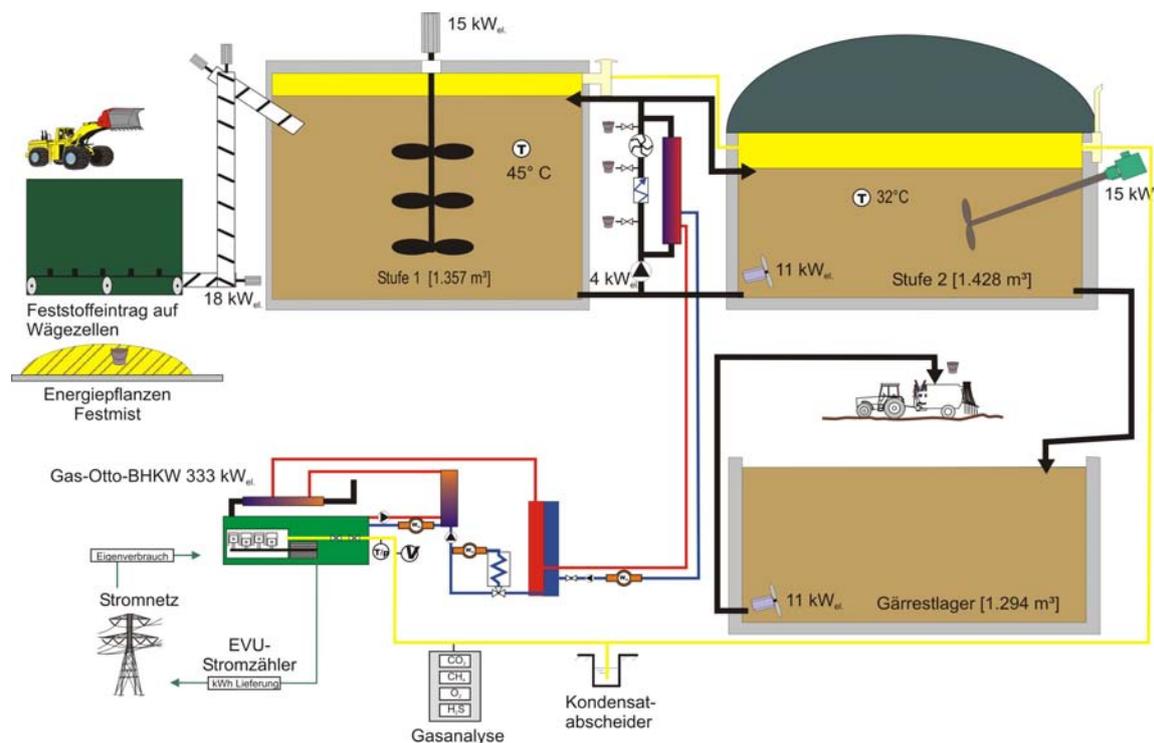


Abb. 3: Anlage B - Fließschema

Die Temperierung der Behälter erfolgte dabei mit einem externen Wärmetauscher, d.h. die Heizung der Behälter erfordert ein wiederholtes Umpumpen des Mediums durch den Heizkreislauf. Aufgrund des vergleichsweise hohen Fasergehaltes im Klee gras kam es wiederholt zu hohem Verschleiß bzw. zu Ausfällen an der Pumptechnik.

Hierzu trug auch der hohe Gehalt an oTM im Fermenter von durchschnittlich 13,7 % bei. Vor allem an den Biegungen der Rohrleitungen des Wärmetauscherkreislaufs traten zu Beginn der Untersuchungen häufig Verstopfungen auf. Das ungleichmäßige Strömungsverhalten des Substrats führte zu einem erhöhten Verschleiß der Drehkolbenpumpe. Da Verstopfungen an Pumpe und Leitungen auch zu einem Ausfall des Wärmetauschers führten, war es zu diesem Zeitpunkt nur schwer möglich, die angestrebte Fermentertemperatur sicher zu stellen.

4.3.2 Maßnahmen

Zur Verbesserung der Betriebssicherheit wurden verschiedene bauliche bzw. verfahrenstechnische Maßnahmen ergriffen. Zunächst erfolgte ein Austausch der Pumpleitungen mit

einem Durchmesser von 100 durch solche mit 150 mm Durchmesser, um die Gefahr von Verstopfungen zu reduzieren. Außerdem wurden auf der Anlage zwei Verfahren zum verbesserten Aufschluss des eingesetzten Substrates in Betrieb genommen.

Zunächst geprüft, ob ein Nasszerkleinerer eine Reduzierung der durchschnittlichen Partikellänge des Fermenterinhalt bewirkt. In einem weiteren Schritt wurde ein Verfahren zur elektrokinetischen Desintegration eingesetzt, mit dessen Hilfe der Aufschluss des Mediums weiter gesteigert werden sollte. Mithilfe einer Hochspannungselektrode wurde hierbei in erster Linie versucht, eine verbesserte Verdaulichkeit schwer abbaubarer Substratbestandteile zu erreichen (vgl. Kap. 2.3, S. 19).

Die beiden Aggregate wurden dabei in die Pumpleitungen der Biomasse integriert. Abb. 4 zeigt die Möglichkeiten der Probenahme längs der Pumpleitungen. Die Anordnung der Entnahmehähne ermöglichte es, Fermenterinhalt jeweils vor und nach dem Nasszerkleinerer bzw. der Hochspannungselektrode zu entnehmen.

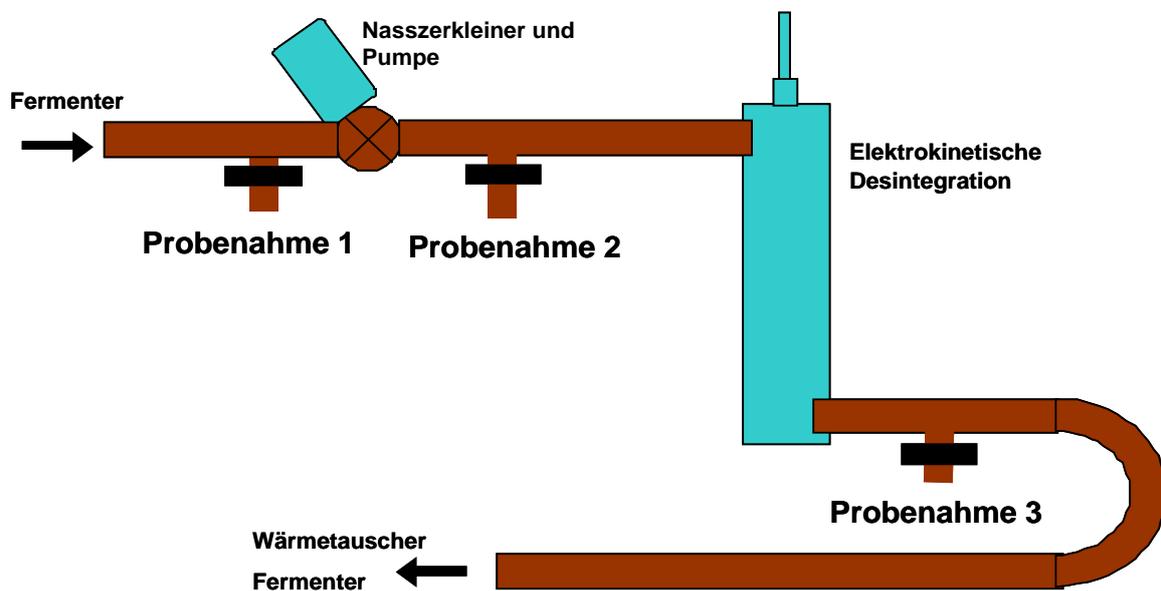


Abb. 4: Anlage B – Integration der Verfahren zur Konditionierung des Fermenterinhalt in die Pumpleitung und dazugehörige Probenahmestellen

4.3.3 Methoden der Datenerhebung

Um mögliche Wirkungen der Behandlungsschritte auf das Gasertragspotential des Fermenterinhalt zu prüfen, wurden in den Laborfermenteranlagen des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung zusätzlich Gasertragstests durchgeführt. Die Gärversuche in 2L-Fermentern im Labormaßstab über einen Zeitraum von 35 Tagen verglichen dazu die Biogaserträge bei unterschiedlichen Stufen der Vorbehandlung.

Der Effekt der mechanischen Zerkleinerung wurde zusätzlich durch Messung der Partikellängenverteilung vor und nach der Behandlung untersucht. Der Einfluss des Nasszerkleinerers wurde mit verschiedenen Techniken bestimmt. Da hierfür die Partikel in schüttfähiger Form vorliegen mussten, wurde das aus der Anlage entnommene Material zunächst ausgewaschen und getrocknet. Mit der Software Image Tool3[®] wurde eine bildanalytische Vermessung der Partikellängen durchgeführt. Hierzu wurde eine Stichprobe des Materials fotografiert und die Länge der vorkommenden Partikel am Bildschirm ver-

messen (vgl. Abb. 5). Da hier jedes Partikel einzeln vermessen werden musste, war die Methode sehr zeitaufwändig und demnach für die Analyse einer größeren Anzahl von Proben nur bedingt geeignet.



Abb. 5: Foto zur Vermessung von Partikellängen durch Bildanalyse

Überdies wurden aus der Tierernährung bekannte Siebkolonnen mit unterschiedlichen Lochweiten zur Aufteilung von Partikelfractionen eingesetzt. Die Lochweite des groben Siebes betrug 19 mm. Eine weitere Fraktionierung erfolgte über ein zweites Sieb mit Lochweite 8 mm (vgl. Abb. 6).

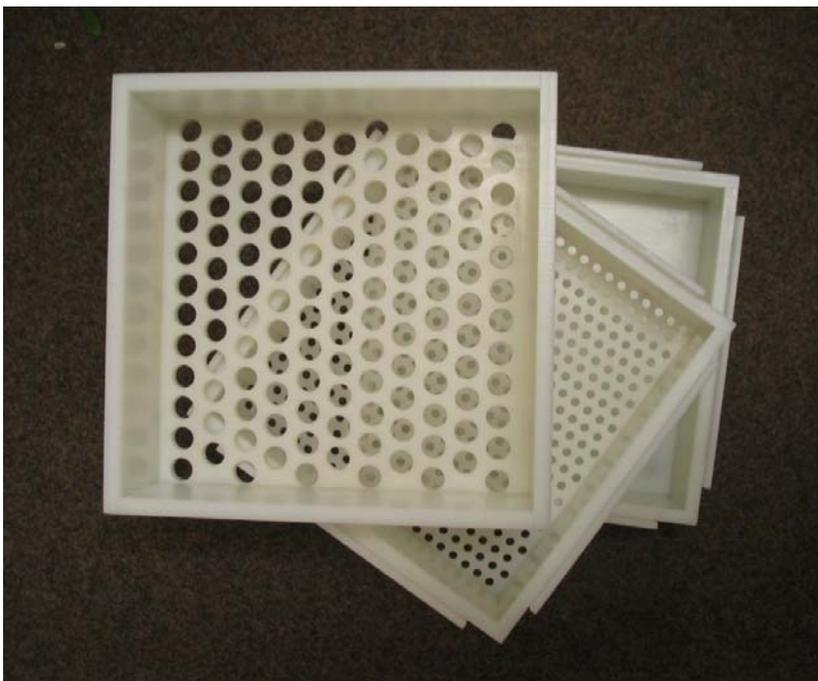


Abb. 6: Siebkolonne zur Bestimmung von Partikelfractionen

Die getrocknete Fermenterprobe wurde dazu auf das oberste, grobe Sieb gegeben. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Proben zu gewährleisten, wurden alle Proben mit identischer Intensität geschüttelt. Anschließend wurde der Anteil der in den einzelnen Siebebenen verbleibenden Fraktionen gravimetrisch bestimmt. Zusätzlich zu den Partikelfraktionen wurde der Gehalt an Störstoffen, wie z. B. Steinen, untersucht.

4.4 Bestimmung des Restgaspotentials von Gärmedien der untersuchten Biogasanlagen

Die Bereitstellung der Substrate stellt bei der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen den Hauptkostenfaktor dar. Neben einer Minimierung der Verluste während der Ernte des Silierprozesses ist daher die Maximierung der Biogausausbeute aus den eingesetzten Nawaro betriebswirtschaftlich geboten. Aber auch aus umweltökonomischer Sicht sollten die Einsatzstoffe weitestgehend ausgegoren werden, um die Energiebilanz der Biogasproduktion zu verbessern und die Methanemissionen während einer eventuellen Lagerung des Gärrestes in einem offenen Behälter möglichst gering zu halten.

Zur Bewertung des Abbaugrades des Gärrestes kann ein sogenannter Restgaspotentialtest dienen, bei dem eine Probe des Gärrestes unter Laborbedingungen vergoren wird. Die Ermittlung des Restgaspotentials wurde mit dem Ziel durchgeführt, Aussagen über die potenzielle Methanfreisetzung in nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlagern zu ermöglichen. Die Untersuchungen erfolgten in der Kleinformenteranlage des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (vgl. Abb. 7; Funktionsbeschreibung der Anlage beispielsweise in Gronauer & Kaiser, 2007). Versuche unter kontrollierten Laborbedingungen erlauben keinen direkten Schluss auf die tatsächlich aus dem Gärrestlager freigesetzten Methanmengen. Die ermittelten Werte ermöglichten jedoch eine vergleichende Bewertung der Abbaueffizienz unterschiedlicher Biogasanlagen.



Abb. 7: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Restgaspotentials

Die Anlagen wurden zu diesem Zweck in den Jahren 2007 und 2008 beprobt. Bei den Anlagen A und B stand für die Untersuchungen des Jahres 2008 kein Material zur Verfügung. Über einen Messzeitraum von 60 Tagen wurde die Produktion von Biogas bzw. Methan erfasst. Die Bestimmung des Restgaspotentials im Jahr 2007 wurde im Rahmen

einer am Institut für Landtechnik und Tierhaltung angefertigten Diplomarbeit durchgeführt und ausgewertet (Pirling, 2008).

Für die Untersuchungen zum Restgaspotential wurde angestrebt, auf den Pilotanlagen die Behälterproben an der Stelle des Abbauprozesses zu entnehmen, an der das Medium unmittelbar vor dem Übergang ins Gärrestlager steht. Die Entnahmemöglichkeiten unterscheiden sich dabei in Abhängigkeit vom Anlagenkonzept. Bei einem Teil der Anlagen gelangt der Behälterinhalt über Überläufe in das Gärrestlager. Hierbei war die Probenahme in den meisten Fällen unmittelbar an den Überläufen möglich. Bei anderen Anlagenkonzepten wird der Behälterinhalt über Pumpleitungen in das Gärrestlager überführt. In diesem Fall erfolgte die Probenahme an geeigneten Entnahmestellen an der Pumpleitung.

Die Vergärung erfolgte in 2-Liter-Fermentern über einen Zeitraum von 60 Tagen auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus. Ein Ansatz wurde bei 38°C (mesophiler Temperaturbereich), ein zweiter Ansatz bei 20°C (psychrophiler Temperaturbereich) vergoren. Dabei sollten die Untersuchungen auf niedrigerem Temperaturniveau eine Lagerung des Gärrests in einem unbeheizten Gärrestlager simulieren.

In der ersten Versuchsreihe konnte vor allem bei starker Sonneneinstrahlung der Sollwert der Innen-Temperatur von 20 °C an mehreren Tagen nicht eingehalten werden. Da die eingesetzten Wärmeschränke über keine Kühlfunktion verfügen, hatte dies zur Folge, dass bei den psychrophil zu vergärenden Proben die Soll-Temperatur ebenfalls überschritten wurde.

Um ein konstantes Temperatur-Niveau sicher zu stellen, wurden für die zweite Versuchsreihe im Jahr 2008 Umbaumaßnahmen getroffen. So wurde zunächst die Leistung der Klimatechnik erhöht. Weiterhin wurde im Container eine Trennwand installiert, um die Wärmeschränke der beiden Temperaturbereiche räumlich zu trennen. So musste nur ein Teil des Containers auf 20°C gehalten werden, während es im Bereich der warmen Proben ausreichend war, eine Container-Innentemperatur von 25°C zu gewährleisten. Hier konnte die Solltemperatur von 38°C über die Heizfunktion der Wärmeschränke erreicht werden.

4.5 Technik zur Abschätzung des Betriebs von Überdrucksicherungen

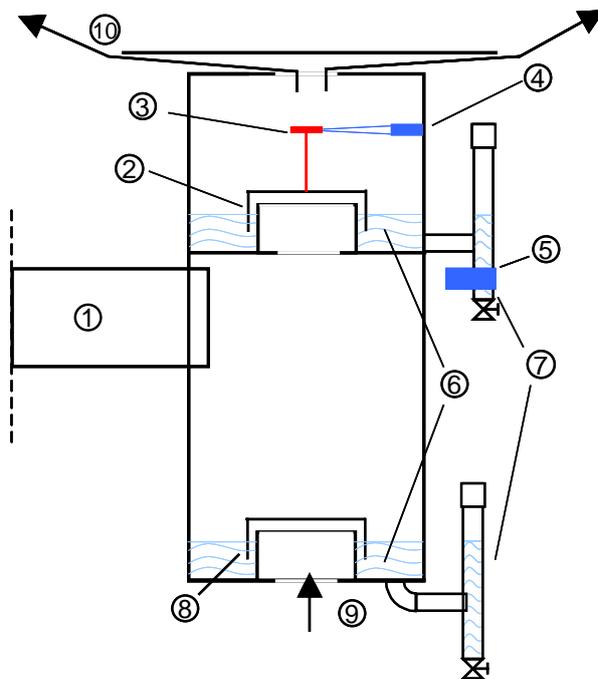
Überdrucksicherungen stellen eine wesentliche Einrichtung zur Wahrung der Betriebssicherheit auf Biogasanlagen dar. Für den Fall, dass die produzierte Gasmenge aufgrund einer Betriebsstörung nicht im BHKW umgesetzt werden kann oder das vorhandene Gaslagervolumen nicht ausreicht, muss eine Möglichkeit vorgehalten werden, einem Druckaufbau in den Gärbehältern entgegen zu wirken. Baut sich in der Gasphase ein definierter Druck auf, wird Biogas über diese Sicherheitseinrichtung an die Atmosphäre abgegeben, und eine Absenkung des Druckes stellt sich ein. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass Bauteile der Anlage wie etwa Folienhauben beschädigt werden. Um die Häufigkeit von Überdruckereignissen auf Praxisanlagen abschätzen zu können, wurden die auf den Anlagen vorhandenen Überdrucksicherungen messtechnisch nachgerüstet.

Grundsätzlich sind in der Praxis verschiedene technische Lösungen zur Regulierung des Drucks in den Gärbehältern möglich. Auf den bayerischen Pilot-Biogasanlagen kann dabei im Wesentlichen zwischen zwei Systemen unterschieden werden. Einerseits werden zur Regulierung des Drucks so genannte Wassertassen-Überdrucksicherungen verwendet, andererseits besteht bei Behältern mit Folienabdeckung die Möglichkeit, die Druckregula-

tion mithilfe mechanischer Überdrucksicherungen mit Verdrängungskörper sicher zu stellen.

4.5.1.1 Überdrucksicherung - System Wassertasse

Ein oft in der Biogaspraxis anzutreffendes System zur Vermeidung von Über- bzw. Unterdruck in den Gärbehältern stellt die Wassertassen-Überdrucksicherung dar (vgl. Abb. 8).



1	Verbindungsrohr zum Behälter
2	Tauchtasse für Überdruck; senkrecht geführt
3	Reflektionskörper
4	explosionsgeschützte Lichtschranke
5	explosionsgeschützter Drucksensor
6	Sperrflüssigkeit (Frostschutz)
7	Sperrflüssigkeitskontrolle mit Ablasshahn
8	Tauchtasse für Unterdruck; senkrecht geführt
9	Lufteintritt bei Unterdruck
10	Gasaustritt bei Überdruck

Abb. 8: Schematischer Aufbau einer modifizierten Überdrucksicherung (System Wassertasse)

Bei entstehendem Gasüberdruck im Gasspeicher hebt sich die Tauchtasse, bis bei Erreichen eines bestimmten Niveaus Gas aus dem Speicher entweicht. Ein auf der Führungsachse der Tauchtasse angebrachter Reflektionskörper strahlt das Licht zurück zu einer explosionsgeschützten Lichtschranke. Diese meldet das Öffnen der Überdrucksicherung

an einen Datenlogger. Dort wird das Signal mit Zeitcodierung gespeichert. Die Lichtschranke wurde so eingestellt, dass diese die Datenspeicherung für den Drucksensor unmittelbar vor dem Öffnen der Überdrucksicherung aktiviert.

4.5.1.2 Überdrucksicherung - System Verdrängungskörper

Bei Behältern mit Foliendach besteht die Möglichkeit, die Druckregulierung mittels mechanischer Überdrucksicherung zu gewährleisten (vgl. Abb. 9). Dabei wird der Gasdruck im Behälter über die Dehnung der Folienhaube bestimmt. Bei erhöhtem Druck kommt es zu einer Ausdehnung der Gashaube. Durch die zunehmende Wölbung der Gashaube wird über eine Kunststoffschnur ein Verdrängungskörper aus einem Wasser-/Glykolgemisch gehoben. Der Flüssigkeitsspiegel des Wasser-/Glykolgemisches senkt sich dadurch und legt eine Rohrverbindung zwischen dem Gasraum und der Atmosphäre frei. Auf diese Weise wird der Weg zum Entweichen des überschüssigen Gases freigegeben.

Dabei meldet ein explosionsgeschützter Sensor durch einen auf die Schnur aufgebrachten Magneten das Öffnen der Überdrucksicherung. Die erfassten Daten wurden mit Hilfe eines Datenloggers gespeichert.

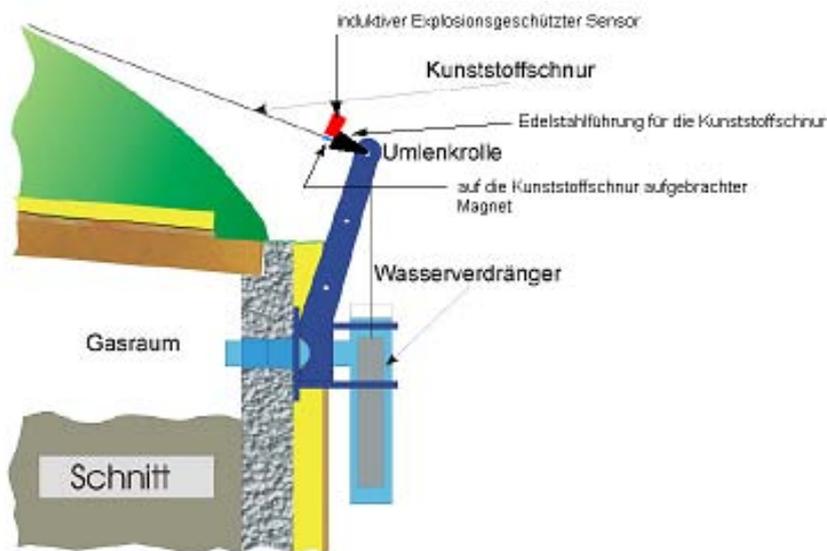


Abb. 9: Schematischer Aufbau einer modifizierten Überdrucksicherung (mechanische Ausführung; Skizze: Vertriebsunterlagen Firma agrikomp GmbH, Stand 03.09.2003)

Um eine Abschätzung der Häufigkeit von Biogasverlusten auf Grund von Überdrucker-eignissen zu ermöglichen, wurde an fünf Pilot-Biogasanlagen Messtechnik zur Erfassung des Gasverlustes über die Überdrucksicherungen installiert (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Messtechnik zur Erfassung von Gasverlusten an Überdrucksicherungen

Anlagen-ID	B	E	G	H	I
Messprinzip	Magnetsensor/ Lichtschranke	Lichtschranke	Magnetsensor	Lichtschranke	Magnetsensor
Anzahl Sensoren	1/1	2	2	1	1

4.6 Beprobung der Anlagen 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 sowie 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. Tab. 4 zeigt eine Übersicht zu den an den einzelnen Proben untersuchten Parametern.

Tab. 4: 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.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Betriebsverläufe der untersuchten Biogasanlagen

Die Darstellung der Betriebsverläufe der Pilotanlagen umfasst zunächst die elektrische Leistungsausnutzung über den Untersuchungszeitraum. Weiterhin wird dargestellt, wie sich die Nutzung der produzierten Wärme sowie der Bedarf an Heizwärme für die Gärbehälter im Jahresgang darstellt. Um Aussagen über die Stabilität des Abbauprozesses zuzulassen, wird der Verlauf der Konzentration an flüchtigen organischen Fettsäuren aufgezeigt.

Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Pilotanlagen wird in diesem Bericht verzichtet. Nähere Informationen zu den untersuchten Anlagen sind dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes „Pilotbetriebe zur Biogaserzeugung in Bayern“ zu entnehmen.

5.1.1 Anlage A

Anlage A konnte im Untersuchungszeitraum sehr konstant bei sehr hoher elektrischer Auslastung betrieben werden. Die Leistungsminderung Mitte 2008 wurde durch einen Brand des BHKW verursacht, der eine mehrtägige Überholung des Aggregates erforderte.

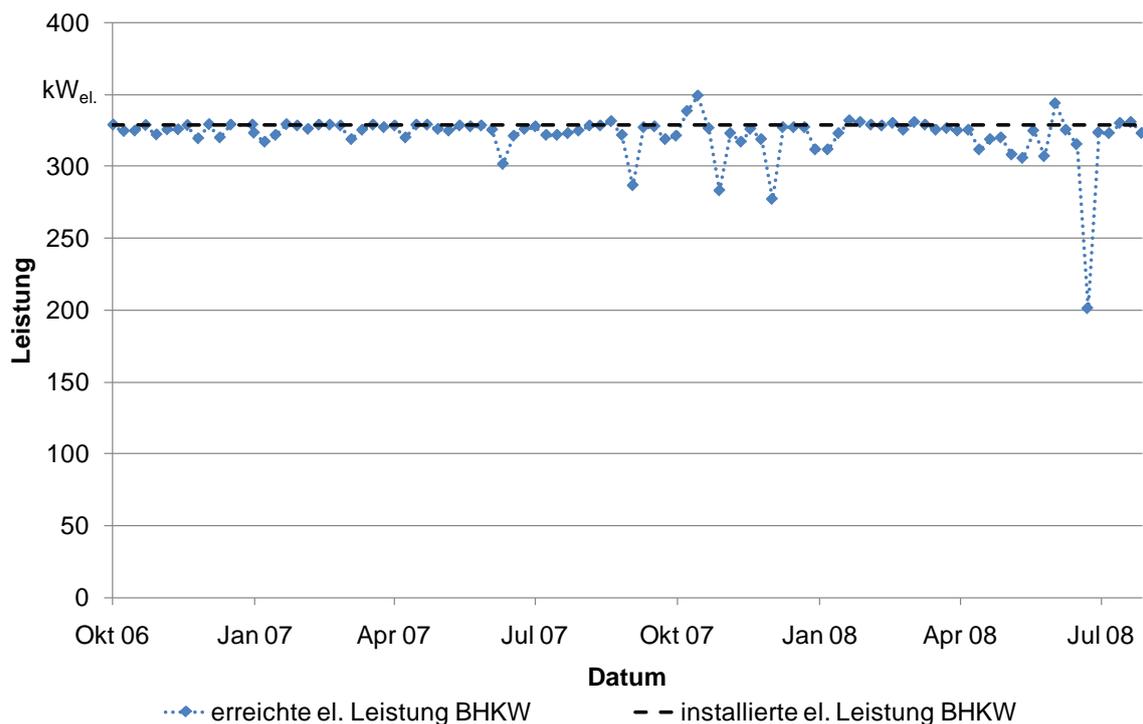


Abb. 10: Anlage A – installierte und erreichte elektrische Leistung

Demgegenüber stellte sich für Anlage A die Verwertung der produzierten Wärme als problematisch dar. Über den gesamten Untersuchungszeitraum konnte keine nennenswerte Wärmemenge verwertet werden. Lediglich ein geringer Anteil der Wärme wurde zur Beheizung des Wohnhauses sowie einer Werkstatt genutzt. Erst nach Ende der Datenerhebung konnte ein Wärmekonzept zur Versorgung eines Industriebetriebes über ein zusätzliches, ausgelagertes BHKW realisiert werden.

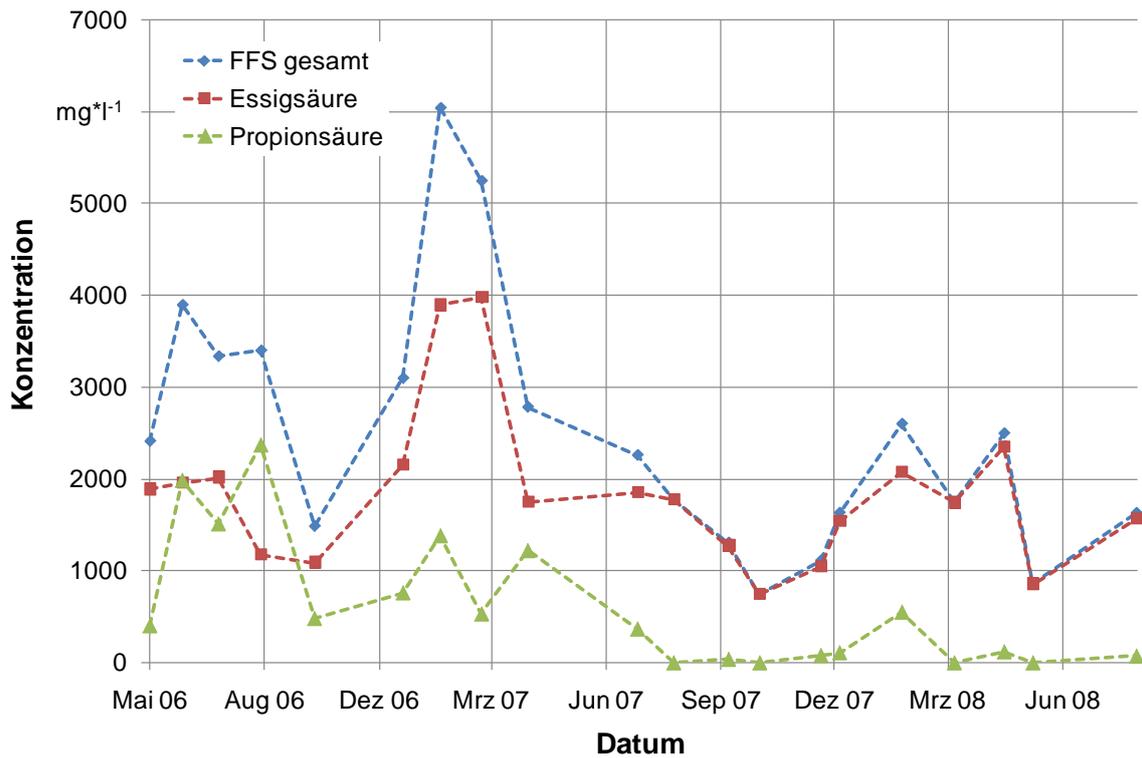


Abb. 11: Anlage A – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1

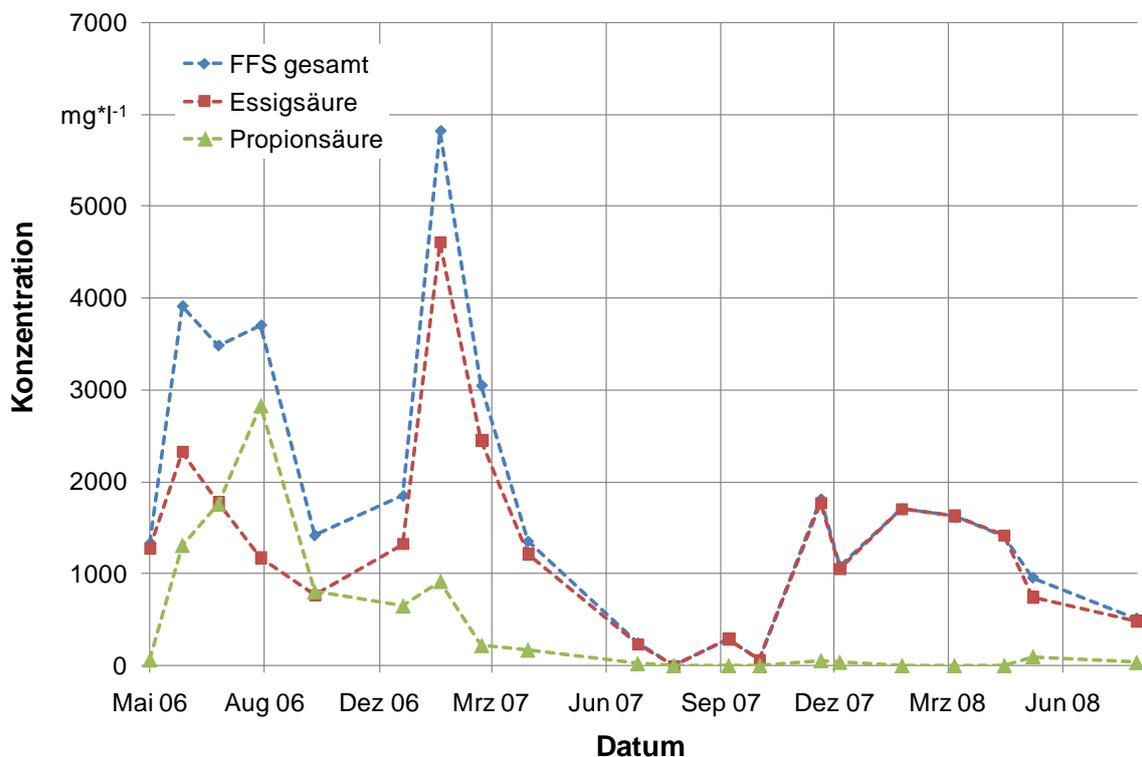


Abb. 12: Anlage A – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2

Zu Beginn der Untersuchungen wiesen die Proben der beiden Fermenter leicht überhöhte Fettsäurekonzentrationen auf (vgl. Abb. 11, Abb. 12). In diesem Zeitraum wurden mehr-

mals Umstellungen an der Substratzusammensetzung durchgeführt. So beinhaltete der Substratmix beachtliche Anteile (ca. 25 %) von Ganzpflanzensilage aus Grünroggen sowie teilweise aus Hafer. Anfang Januar 2007 wurde die Zugabe von Grünroggen-GPS beendet und durch Steigerung der Zugabe von Grassilage ausgeglichen. Dies kann eine Ursache für die vorübergehende Versäuerung in den beiden parallel geführten Fermentern sein, da die in diesem Zeitraum verwendete Grassilage einen Gehalt an Essigsäure von über $13.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ aufwies. Im weiteren Projektverlauf wurden Umstellungen an der Substratzusammensetzung reduziert bzw. weniger rasch durchgeführt. Die Konzentration an FFS wurde bis zum Ende der Untersuchungen in beiden Fermentern stets auf unter $3.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gehalten. Das ausschließliche Vorkommen von Essigsäure weist darauf hin, dass die zugeführte organische Substanz problemlos umgesetzt werden konnte.

Als störanfällige Komponenten erwiesen sich bei Anlage A die Förderschnecken zur Substrateinbringung. Ebenso mussten im Laufe der Erhebungen die Messer der Mischaggregate ausgetauscht werden, da es hier teils durch Fremdkörper im Vorratsbunker zu Störungen kam. Schließlich kam es gelegentlich zu Verstopfungen an den Überläufen von den Fermentern zum Nachfermenter.

5.1.2 Anlage B

Auf Anlage B kam es zu Beginn der Untersuchungen wiederholt zu Störfällen, die in erster Linie auf den hohen Anteil an faseriger Kleegrassilage zurück zu führen sind. Dies spiegelt sich in einer anfänglich sehr niedrigen elektrischen Arbeitsausnutzung wider (vgl. Abb. 13).

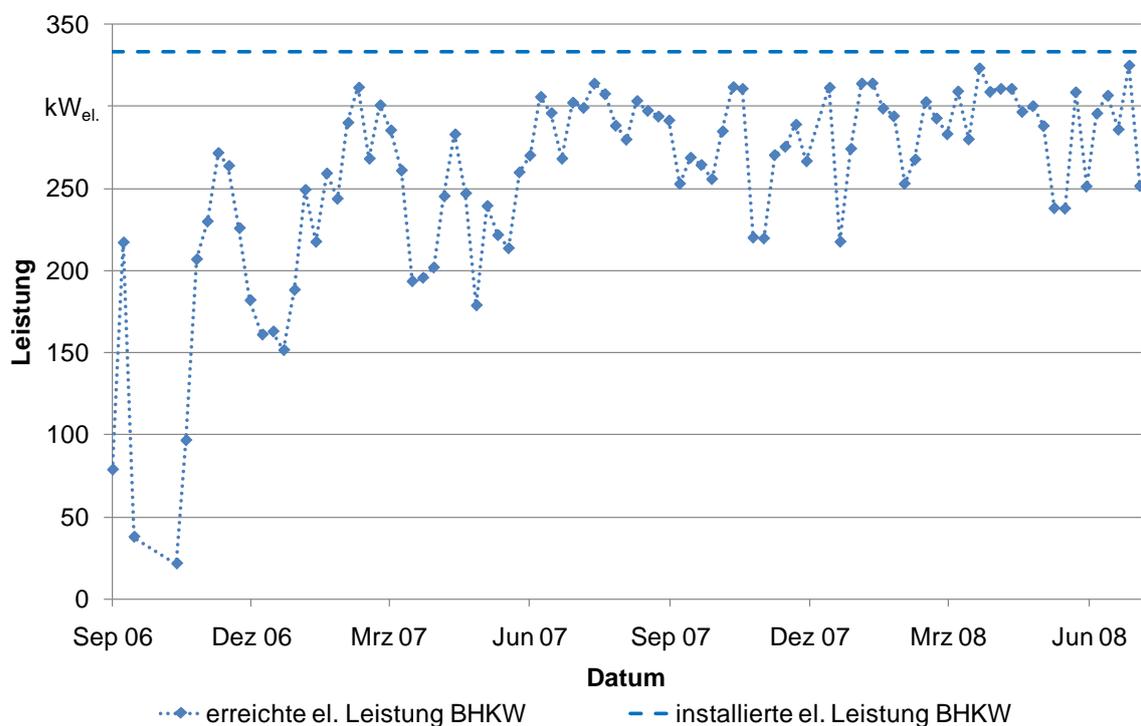


Abb. 13: Anlage B – installierte und erreichte elektrische Leistung

Es wurden daher umfangreiche Umbauten vorgenommen, um ein höheres Maß an Betriebssicherheit sicher zu stellen (vgl. 4.3, S. 23). So wurde der Querschnitt der Pumpleitungen erhöht, um Verstopfungen zu reduzieren. Im Rahmen dieser Umbauten wurde ein

Nasszerkleinerer installiert, der zur weiteren Zerkleinerung des Gärmediums beitragen sollte. Die auf Anlage B ergriffenen Maßnahmen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Landtechnik und Tierhaltung begleitet und ausgewertet (Klarl, 2007). Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in einer separaten Auswertung in Kapitel 5.3, S. 70ff) behandelt.

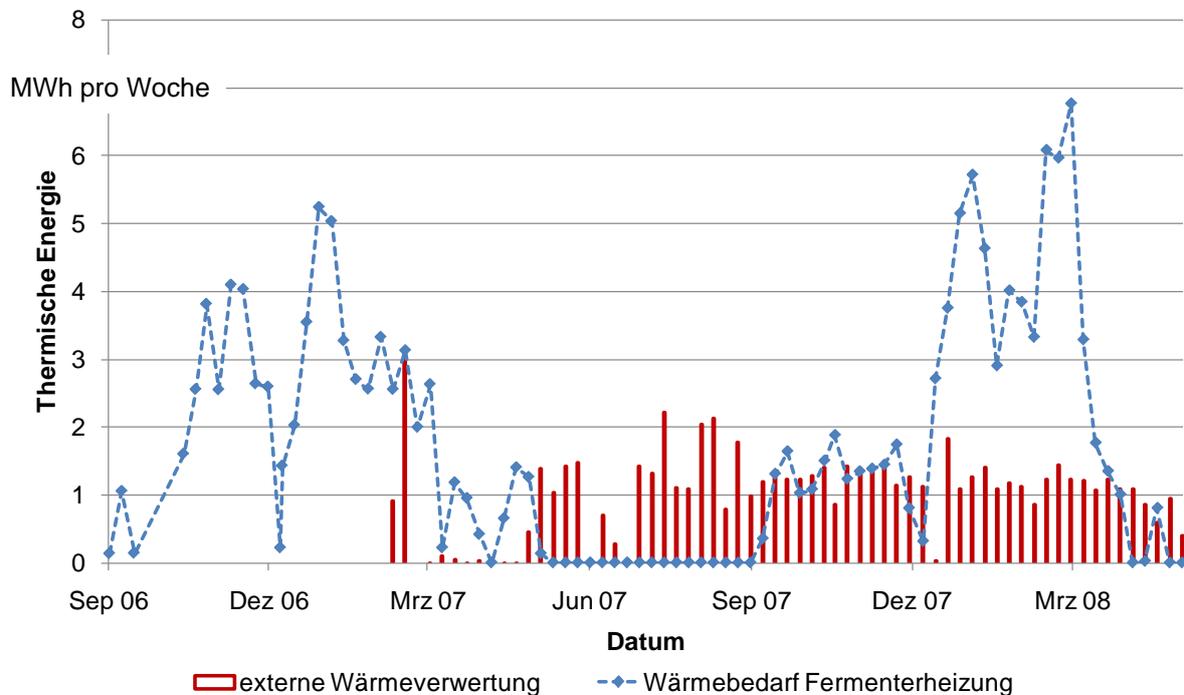


Abb. 14: Anlage B – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung

Anlage B wurde in Alleinlage abseits der Ortschaft errichtet. Daher konnte bei dieser Pilotanlage kaum Wärme extern verwertet werden. Ein geringer Anteil der Wärme wurde vom Betriebsleiter mit Hilfe eines umgebauten, isolierten Pumptankwagens an die Hofstelle verbracht, um das Wohnhaus zu beheizen. Hierzu wurde Warmwasser an der Anlage entnommen und dem Heizkreislauf des Wohnhauses zugeführt. Weiterhin wurde ein Teil der Wärme über einen Wagentrockner zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter genutzt. Wie Abb. 14 zeigt, konnte insgesamt aber nur sehr eingeschränkt Wärme abgesetzt werden.

Der Wärmebedarf zum Heizen der Gärbehälter zeigt erwartungsgemäß jahreszeitliche Schwankungen. Jedoch nimmt der Heizwärmebedarf bei dieser Anlage einen bemerkenswerten Verlauf, da in den Sommermonaten auf das Heizen der Gärbehälter gänzlich verzichtet werden konnte. Offensichtlich trägt hierzu die Fermentergeometrie bei, da hier Durchmesser und Höhe des Behälters annähernd gleich sind und im Vergleich zu Gärbehältern anderer Biogasanlagen eine geringe spezifische Oberfläche bedingen. Der Einbruch des Heizwärmebedarfes im Dezember 2006 war begründet durch den wiederholten Ausfall der Pumpe. Da bei dieser Anlage ein externer Wärmetauscher eingesetzt wird, führen Störungen an der Pumptechnik in der Folge auch zum Ausfall der Fermenterheizung (vgl. auch Kap. 5.3 (S. 70ff)). Weiterhin zeigte sich die Vertikalförder-schnecke als störanfällig gegenüber im Substrat enthaltenen Steinen.

5.1.3 Anlage C

Anlage C besteht aus zwei parallel betriebenen baugleichen Fermentern mit Betondecke. Als zweite und dritte Stufe folgen zwei in Reihe geschaltete Nachfermenter mit Folienhaube. Bei Anlage C wurde die Bewertung in zwei Teilperioden aufgeteilt, da es im Projektverlauf zu einer Anlagenerweiterung kam. In der ersten Ausbaustufe diente der Behälter der dritten Stufe als Gärrestlager. Im Zuge der Erweiterung wurde ein Gärrestlager mit einem nutzbaren Volumen von 4.029 m³ errichtet.

Weiterhin wurde die zunächst installierte elektrische Leistung von 380 kW_{el.} (2 x 190 kW_{el.}) durch ein weiteres BHKW mit einer installierten Nennleistung von 250 kW_{el.} erhöht. Aus rechtlichen Gründen konnte die Anlage innerhalb der Projektlaufzeit nicht mit der vollen installierten Leistung betrieben werden. Die Maximalleistung wurde auf 500 kW_{el.} beschränkt und stellt in dieser Höhe auch die Grundlage für die Auswertung der zweiten Teilperiode dar.

5.1.3.1 Ausbaustufe 1 (C)

Anlage C konnte über weite Strecken mit hoher Arbeitsausnutzung betrieben werden. Ab Mai 2007 war jedoch ein erheblicher Einbruch der Anlagenleistung zu verzeichnen, der im Wesentlichen mit dem instabilen Prozess in Fermenter 2 zu erklären ist (vgl. Abb. 15).

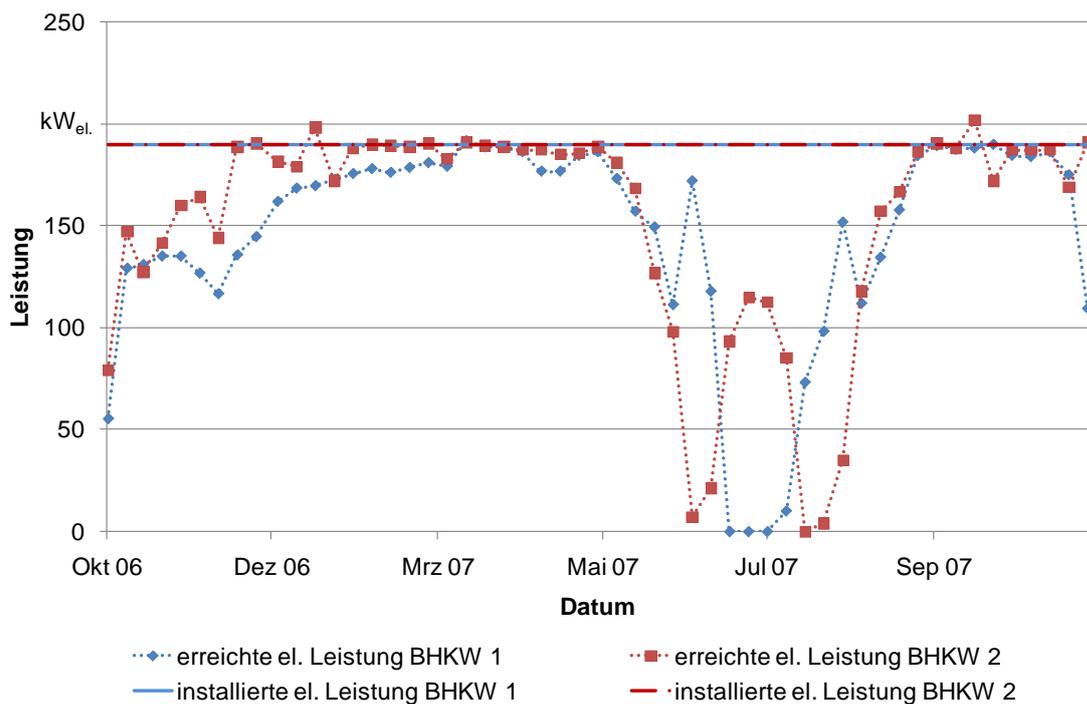


Abb. 15: Anlage C – installierte und erreichte elektrische Leistung

Während der Datenerhebung wiesen die parallel betriebenen Fermenter trotz identischer Betriebsweise in den chemischen Analysen deutliche Abweichungen auf. Während die Gehalte an organischer Trockenmasse erwartungsgemäß identisch waren, stellten sich die Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren deutlich unterschiedlich dar (vgl. Abb. 16, Abb. 17, Tab. 5). Vor allem die Anreicherung von Propion-, Iso-Butter- und Buttersäure in Fermenter 2 weisen auf einen im Vergleich zu Fermenter 1 gestörten Abbauprozess hin.

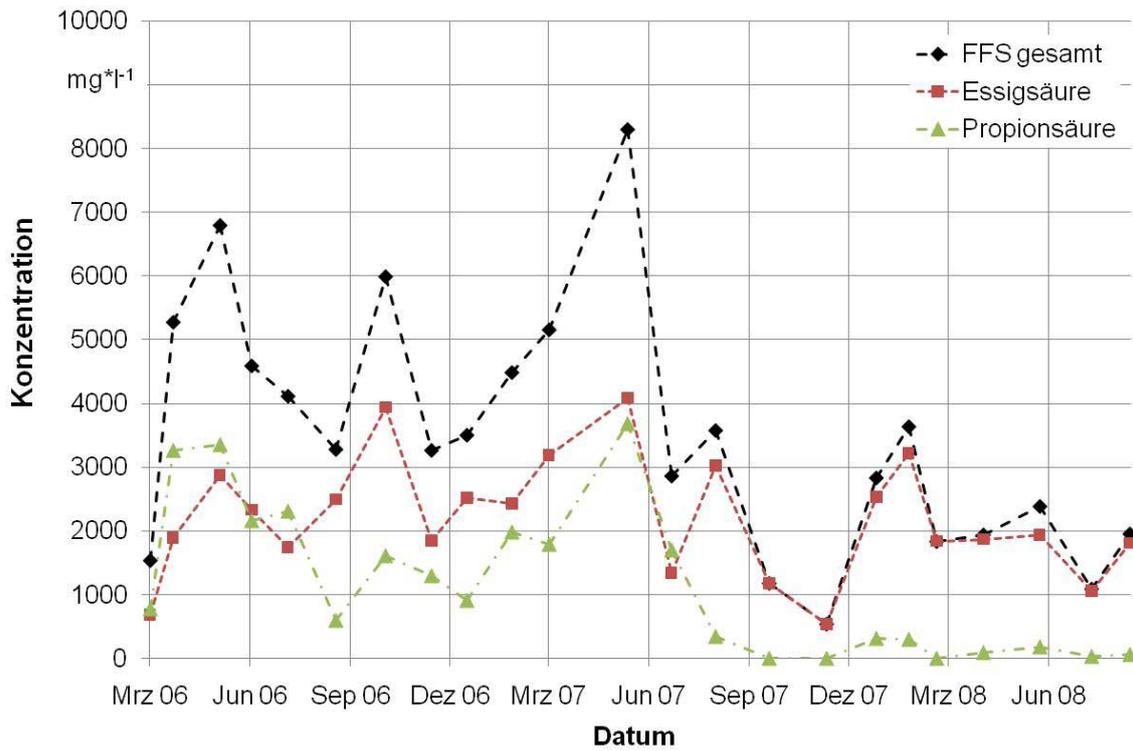


Abb. 16: Anlage C – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1

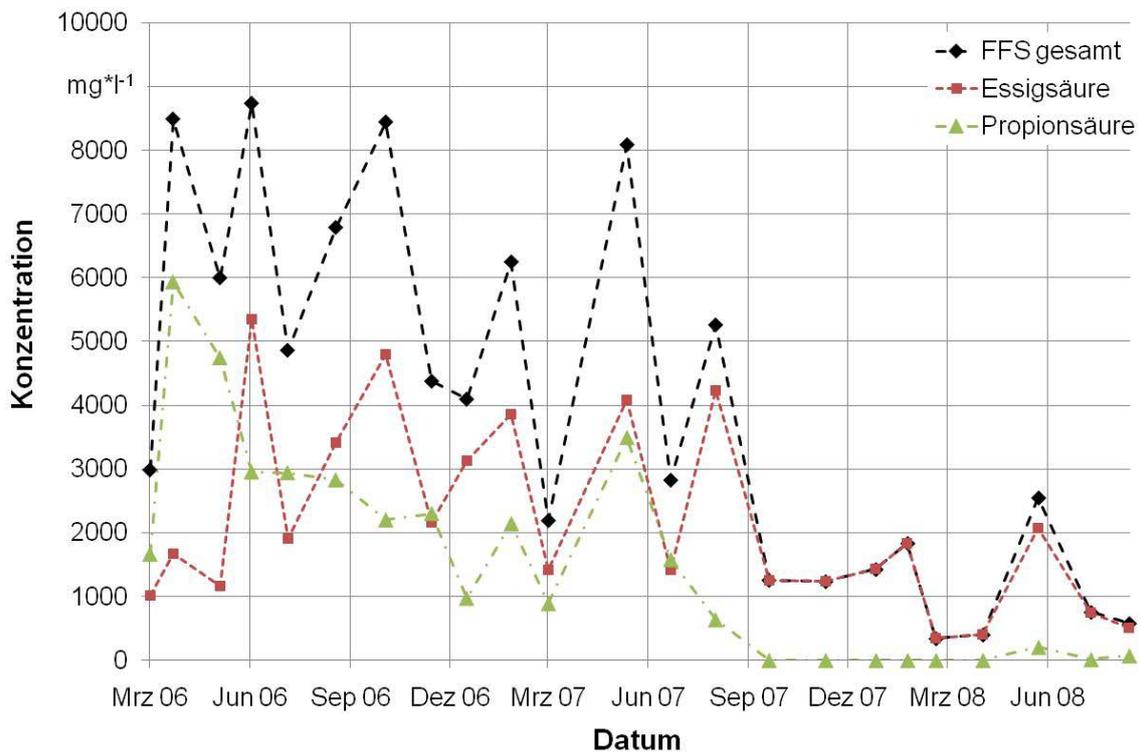


Abb. 17: Anlage C – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2

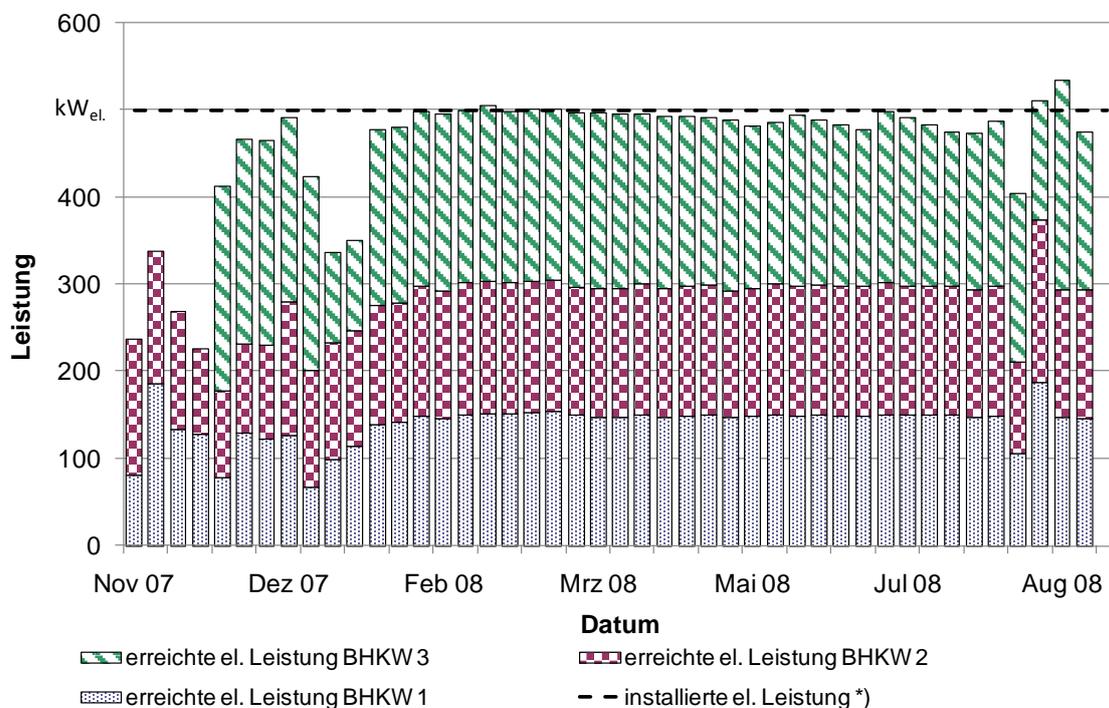
Tab. 5: Anlage C – Durchschnittliche Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren in Fermenter 1 und Fermenter 2 [mg Essigsäureäquivalent * l⁻¹]

	Flüchtige Fettsäuren							
	Fettsäuren gesamt	Essigs.	Propions.	Iso- Butters.	Butters.	Iso- Valerians.	Valerians.	Caprons.
F1	4457	2494	1788	300	73	392	44	5
F2	5552	2850	2404	413	218	492	46	10
F2/F1	+25%	+14%	+34%	+38%	+199%	+26%	+5%	+100%

Die Entwicklung gipfelte in einer vollständigen Destabilisierung des Abbauprozesses in Fermenter 2 Mitte 2007, in dessen Folge der Behälter komplett entleert werden musste. Mithilfe von Impfsupstrat einer naheliegenden Anlage wurde der Behälter wieder in Betrieb genommen und konnte im weiteren Betriebsverlauf bei deutlich niedrigeren Gehalten an Fettsäuren betrieben werden. Mittels der erhobenen Daten konnte keine klare Ursache für die unterschiedliche Entwicklung in den beiden Fermentern gefunden werden. Nach dem Entleeren und erneuten Animpfen konnte die Anlage im Folgenden wieder mit voller Arbeitsausnutzung betrieben werden (vgl. Abb. 15).

5.1.3.2 Ausbaustufe 2 (C*)

Im Oktober 2007 erfolgte die Inbetriebnahme eines weiteren BHKW. Aus genehmigungsrechtlichen Gründen wurde die Anlage mit einer Maximalleistung von 500 kW_{el.} betrieben.



*) genehmigte elektrische Leistung: 500 kW

Abb. 18: Anlage C* – erreichte elektrische Leistung

Die 190-kW-BHKW wurden dazu mit einer durchschnittlichen Leistung von etwa 150 kW_{el.}, das neu hinzu gekommene 250-kW-BHKW mit einer Leistung von etwa 200 kW_{el.} betrieben (vgl. Abb. 18).

Die Pilotanlage C* wurde bis zum Abschluss der Datenerhebung sehr stabil betrieben. In der zweiten Auswerteperiode kam es zu keiner übermäßigen Anreicherung von längerkettigen Fettsäuren, selbst die Konzentration von Propionsäure befand sich in beiden Fermentern auf sehr niedrigem Niveau.

Anlage C/C* nutzt die anfallende Wärme auf verschiedene Weise. Neben der Versorgung eines Seniorenheims und diverser Wohnhäuser mit Wärme für Heizung und Brauchwasser wird die Wärme zur Trocknung von Scheitholz in mehreren Abrollcontainern verwendet.

Während der Datenerhebung stellte sich bereits deutlicher Verschleiß an der Eintragstechnik ein. Um ein komplettes Durchscheuern des Metallbehälters zu vermeiden, wurden an der Wandinnenseite Verstärkungen aufgeschweißt.

5.1.4 Anlage D

Die elektrische Leistungsausnutzung von Anlage D war zu Projektbeginn nicht zufrieden stellend. Wiederholte Versuche des Anlagenbetreibers, die Raumbelastung zu erhöhen, hatten Hemmungen im Abbauprozess zur Folge, die zu einem Leistungsrückgang führten. Da die Anlage ohne jegliche Zugabe von Wirtschaftsdüngern betrieben wird, wurde vermutet, dass die Hemmungen in einem Mangel an Spurenelementen begründet sein können. Der Betreiber setzte im Verlauf der Untersuchungen verschiedene Gärhilfsstoffe ein. Im weiteren Projektverlauf konnte die Anlagenauslastung deutlich erhöht werden (vgl. Abb. 19).

Im Herbst 2007 wurde ein erneuter Rückgang der Anlagenleistung gemessen. In diesem Fall lag jedoch keine Störung im Abbauprozess vor. Steigende Substratkosten veranlassten den Betreiber, die Substratzugabe vorübergehend zu reduzieren. In diesem Zeitraum wurde in erster Linie der Betrieb von BHKW 1 reduziert, während BHKW 2 weiterhin bei hoher Auslastung betrieben wurde. Im Frühjahr 2008 wurde die Substratzugabe wieder gesteigert, sodass in der Folge die Anlagenauslastung erwartungsgemäß erhöht werden konnte. Gegen Ende der Datenerhebung konnte die Anlage bei nahezu vollständiger Auslastung der beiden BHKW betrieben werden.

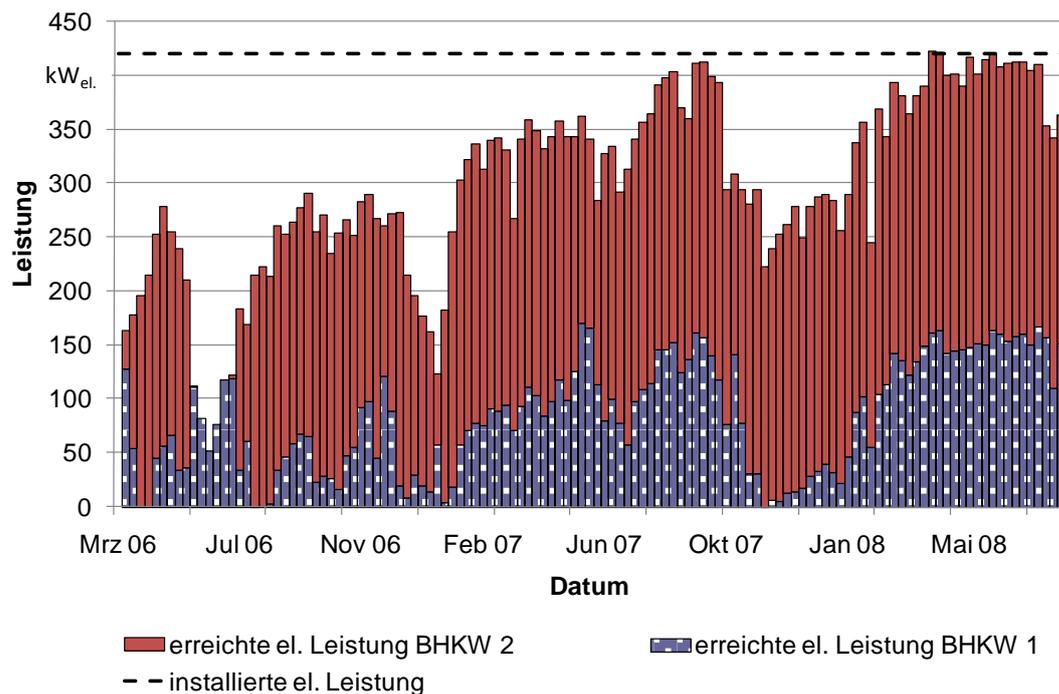


Abb. 19: Anlage D – installierte und erreichte elektrische Leistung

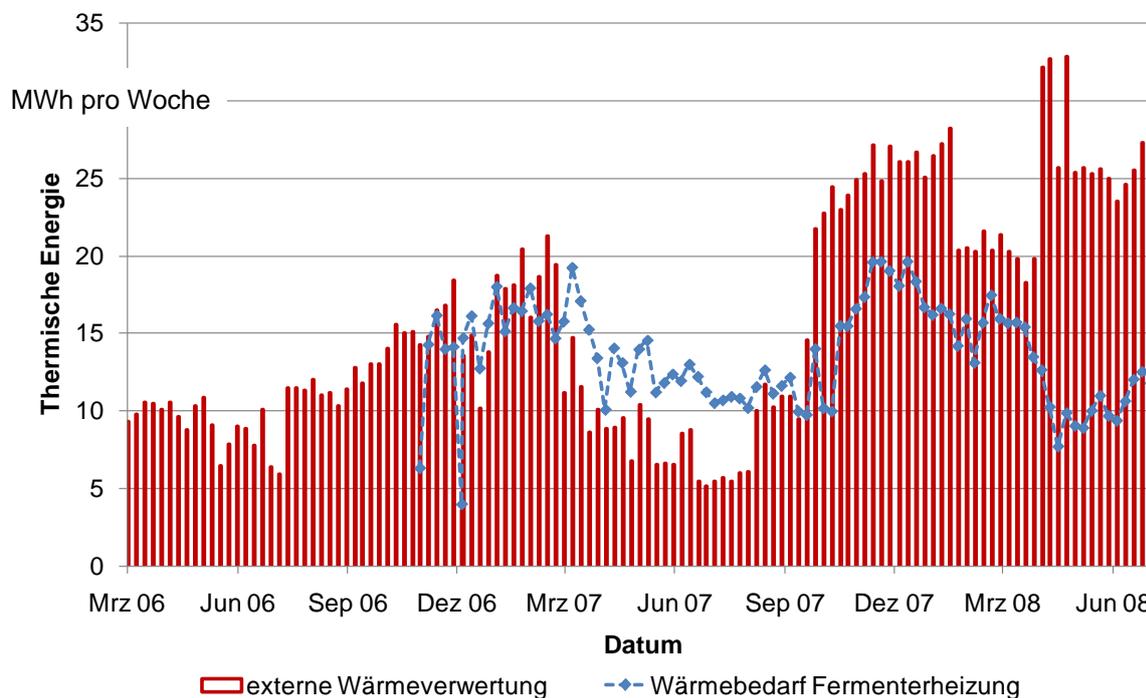


Abb. 20: Anlage D – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung

Zu Projektbeginn wurde bei Anlage D das Betriebsleiterwohnhaus sowie der landwirtschaftliche Betrieb mit Wärme versorgt. Im Laufe des Projektes kamen noch ein Ausstragshaus sowie ein Container zur Trocknung von Gütern hinzu. Abb. 20 zeigt die deutliche Steigerung der Wärmeverwertung in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums.

Im Durchschnitt konnten so 38 % der zur Verfügung stehenden Wärme extern abgesetzt werden.

Auffällig bei Anlage D ist der hohe Bedarf an Wärme zur Beheizung der Fermenter. Mit knapp 26 % der anfallenden Wärme wird hier im Vergleich zu den anderen Pilotanlagen der größte Anteil an der Gesamtwärme zur Fermenterbeheizung eingesetzt. Bei Anlage D sind die Gärbehälter komplett im Boden versenkt und werden dabei von Grundwasser umströmt. Dies kommt einer permanenten Kühlung der Behälter gleich und bedingt dementsprechend einen höheren Bedarf an Heizwärme.

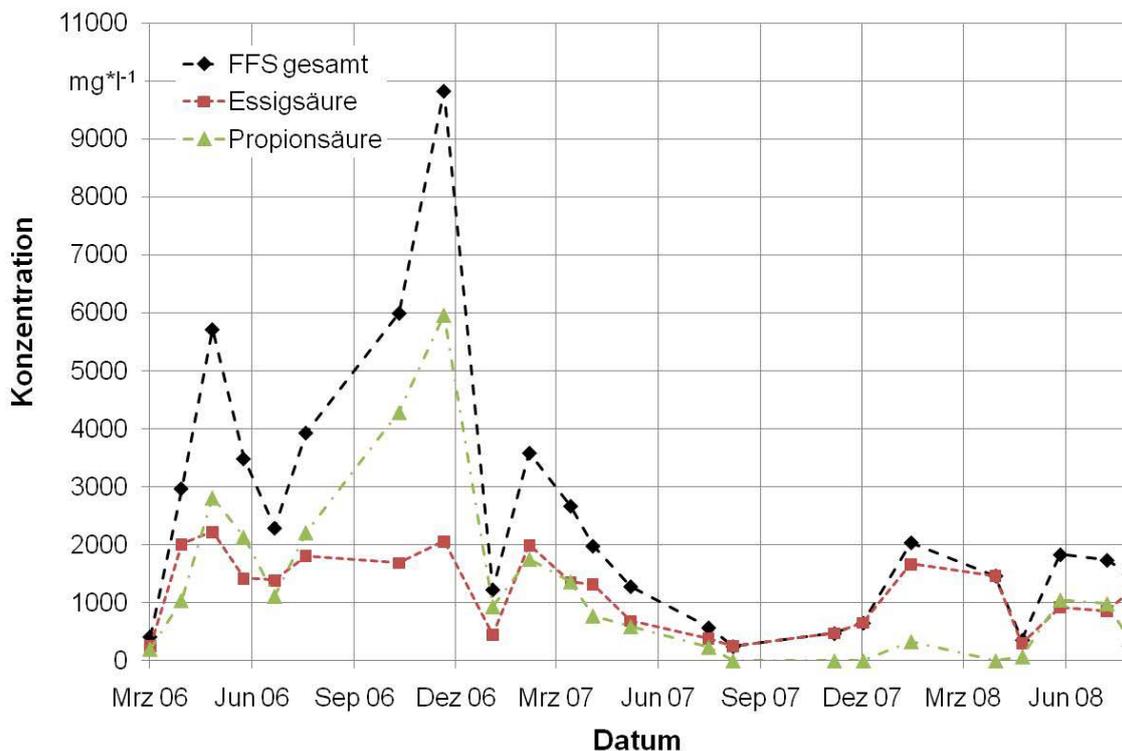


Abb. 21: Anlage D – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter

Wie Abb. 19 aufzeigt, wurde die Pilotanlage D zu Beginn der Datenerhebung bei unzureichender Leistungsausnutzung betrieben. Den instabilen Abbauprozess in diesem Zeitraum unterstreicht Abb. 21. Die Analysewerte der FFS im Fermenter zeigten deutlich erhöhte Gehalte an Propionsäure, die bisweilen die Konzentration an Essigsäure erheblich übertrafen. Dies weist auf eine starke Hemmung des Abbauprozesses hin. In dieser Phase war der Betreiber bestrebt, die Raumbelastung schrittweise zu steigern mit dem Ziel, die Ausnutzung der installierten Leistung zu erhöhen. Versuche, die Zugabe an Substraten zu erhöhen resultierten in erneuten Leistungseinbrüchen. Im weiteren Projektverlauf konnte durch die Zugabe verschiedener Gärhilfsstoffe (vgl. auch 5.5, S. 77) ein stabiler Prozess sicher gestellt werden. Die Gesamtkonzentration an Fettsäuren blieb in der Folge stets unter 2.000 mg·l⁻¹.

Im Laufe der Datenerhebung musste der Abschiebecontainer der Einbringtechnik ausgetauscht werden. Hier kam es bereits nach etwa drei Betriebsjahren zum vollständigen Durchrosten der Außenwand. Des Weiteren brach im Fermenter ein Rührpaddel ab.

5.1.5 Anlage E

Anlage E konnte über den gesamten Zeitraum der Datenerhebung sehr konstant bei hoher elektrischer Arbeitsausnutzung betrieben werden (vgl. Abb. 22). Eine besondere Herausforderung dieses Anlagenkonzepts war in erster Linie der stabile Betrieb unter Einsatz eines verhältnismäßig einseitigen Substratmixes. In der Pilotanlage kommen neben dem Hauptsubstrat Maissilage (71 %) erhebliche Anteile an Masthähnchenmist (24 %) zum Einsatz.

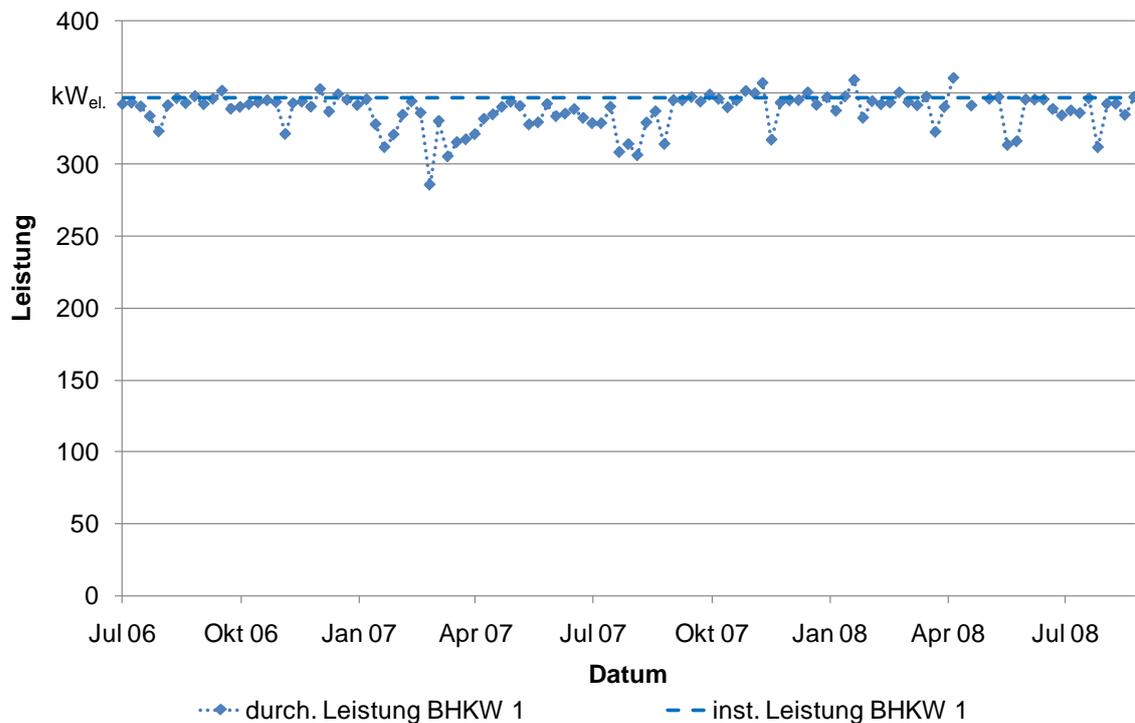


Abb. 22: Anlage E - installierte und erreichte elektrische Leistung

Aufgrund des hohen Stickstoffgehalts dieses Wirtschaftsdüngers kam es zu einer Anreicherung von Stickstoff in den Gärbehältern. Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, wurden bis zu 20 m³ Wasser pro Tag zugegeben, was einen erheblichen Mehranfall an Gärrest zur Folge hatte. Da die Anlage nicht auf die Lagerung solch hoher Gärrestmengen ausgelegt war, musste eine Reduzierung des Gesamt-Gärrestanfalls angestrebt werden. Zu diesem Zweck wurde auf der Anlage eine Separationsvorrichtung zur Trennung von festen und flüssigen Bestandteilen des Gärrestes in Betrieb genommen. Der feste Gärrest mit TM-Gehalten von über 20% wurde außerhalb des Gärrestlagers auf einer Dunglagerplatte gelagert. Auf diese Weise trug die Maßnahme zur Reduktion des Anfalls von flüssigem Gärrest bei.

In den folgenden Monaten konnte eine Verringerung der Konzentration an Ammonium-Stickstoff erreicht werden (vgl. Abb. 23). Ebenso konnte der Gehalt an Trockensubstanz im Fermenter durch die Separation von 10 % auf etwa 8 % gesenkt werden. Die elektrische Arbeitsausnutzung der Anlage konnte dabei auf einem Wert von über 95 % gehalten werden.

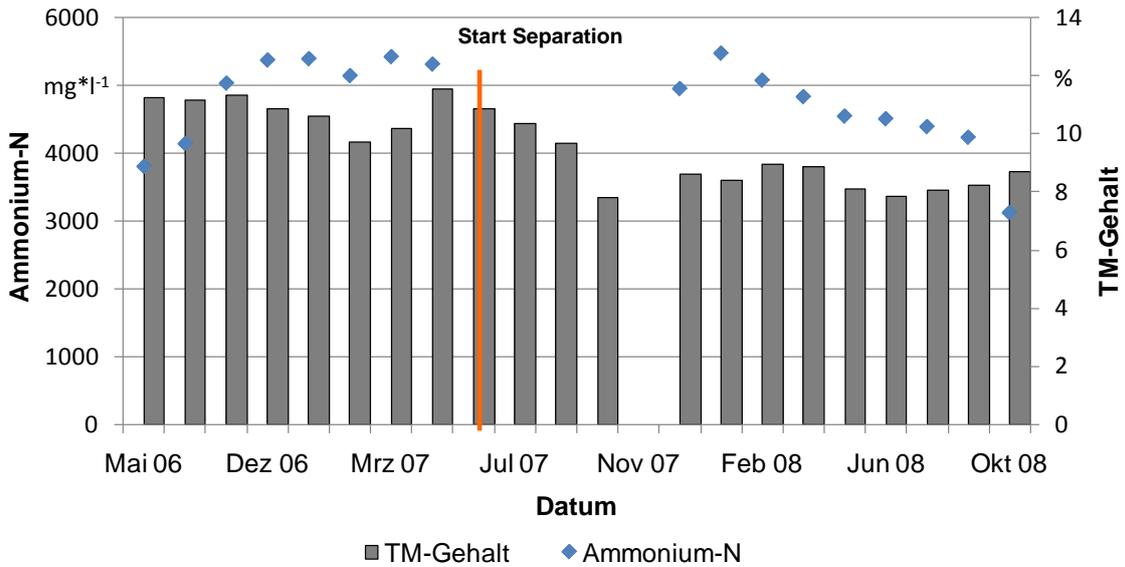


Abb. 23: Anlage E – Verlauf des TM-Gehalts und der Ammonium-Konzentration im Fermenter

Bei Anlage E konnte die anfallende Wärme sehr gut innerbetrieblich genutzt werden. So konnten über die Projektlaufzeit 50 % der Wärme verwertet werden. Ein erheblicher Anteil wurde dabei zur Beheizung der Masthähnchenställe eingesetzt, weiterhin wurde in Mobilcontainern Scheitholz getrocknet. So konnte in der zweiten Hälfte des Projektzeitraumes auch in der warmen Jahreszeit ein bedeutender Teil der vorhandenen Wärme genutzt werden. Die Erfassung der Heizwärme für die Fermenter war erst ab September 2007 möglich. Hier nimmt der Bedarf den erwarteten jahreszeitlichen Verlauf. Dabei wurde mit durchschnittlich 14 % der Gesamtwärme ein vergleichsweise geringer Anteil zur Beheizung der Fermenter benötigt.

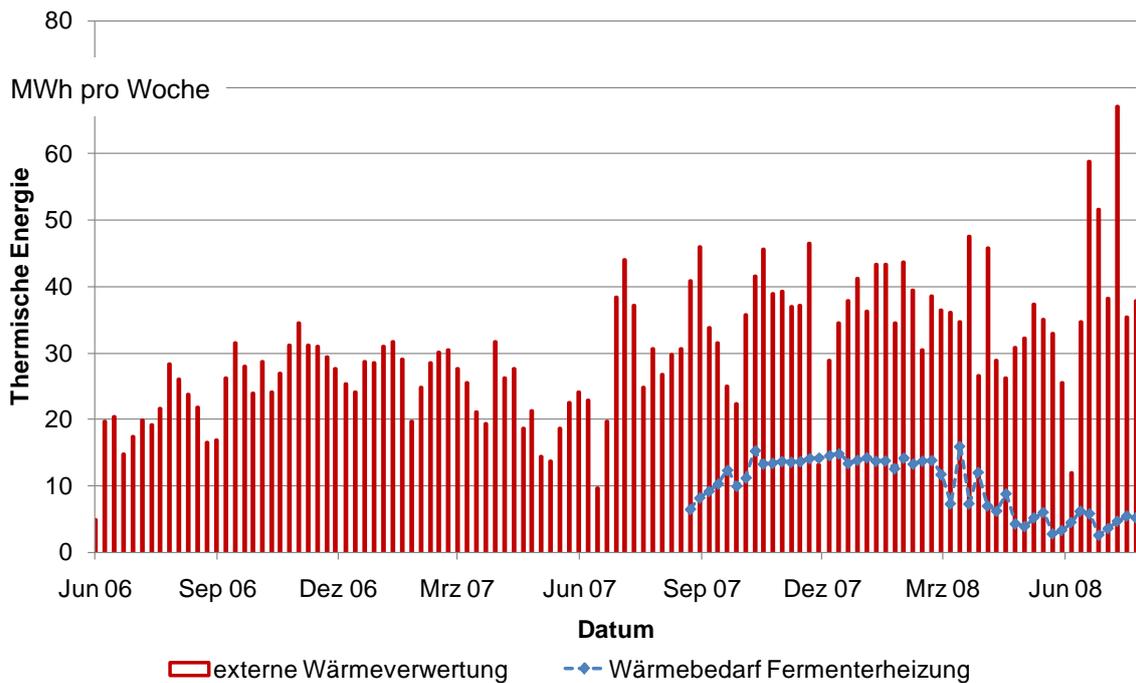


Abb. 24: Anlage E – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung

Der Verlauf der Fettsäurekonzentration im Fermenter bei Anlage E zeigt auf, dass sich diese Anlagenkonzeption wesentlich von den anderen untersuchten Anlagen unterscheidet (vgl. Abb. 25).

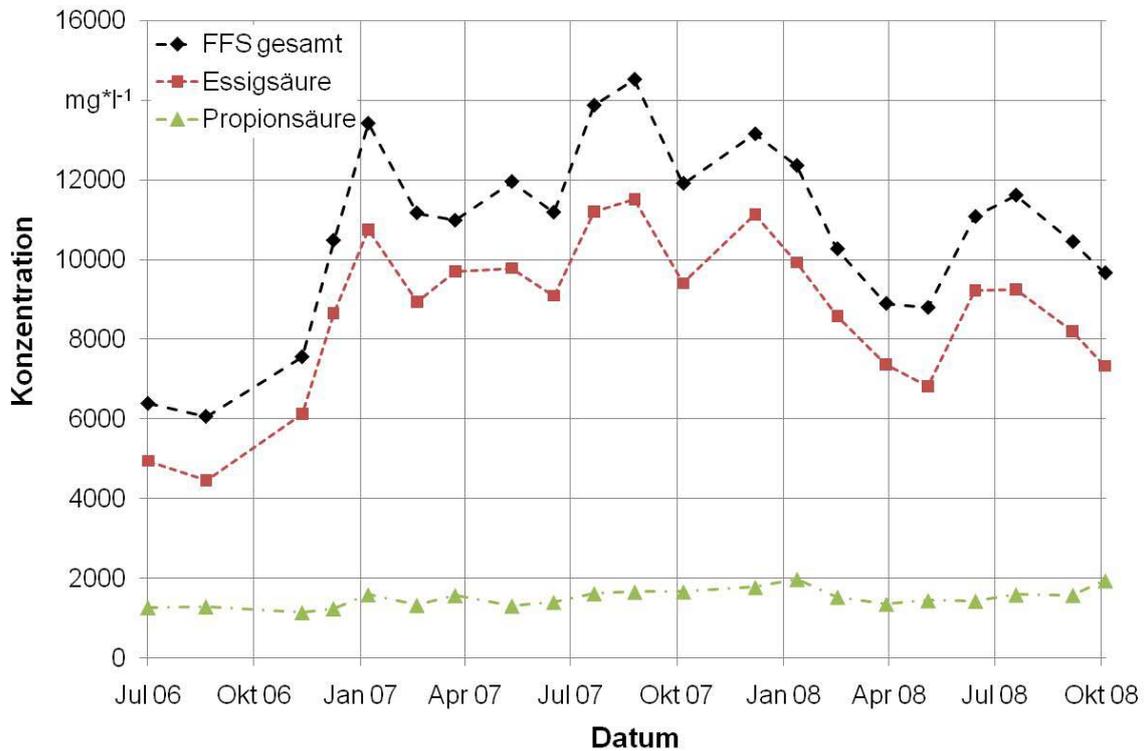


Abb. 25: Anlage E – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter

Mit einer durchschnittlichen Konzentration an Essigsäure von knapp $8.700 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ wurde die Pilotanlage über den gesamten Untersuchungszeitraum sehr stabil betrieben. Der Gehalt an Propionsäure wies dabei stets Werte zwischen 1.500 und $2.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ auf, sodass zu keiner Zeit Hinweise auf eine Destabilisierung des Prozesses durch zu hohe Fettsäuregehalte festgestellt werden konnten. Im Nachfermenter zeigte sich ebenfalls ein sehr konstantes Niveau der Fettsäurekonzentration, allerdings blieb der Wert für die Gesamtfettsäure permanent unter $2.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (vgl. Abb. 26).

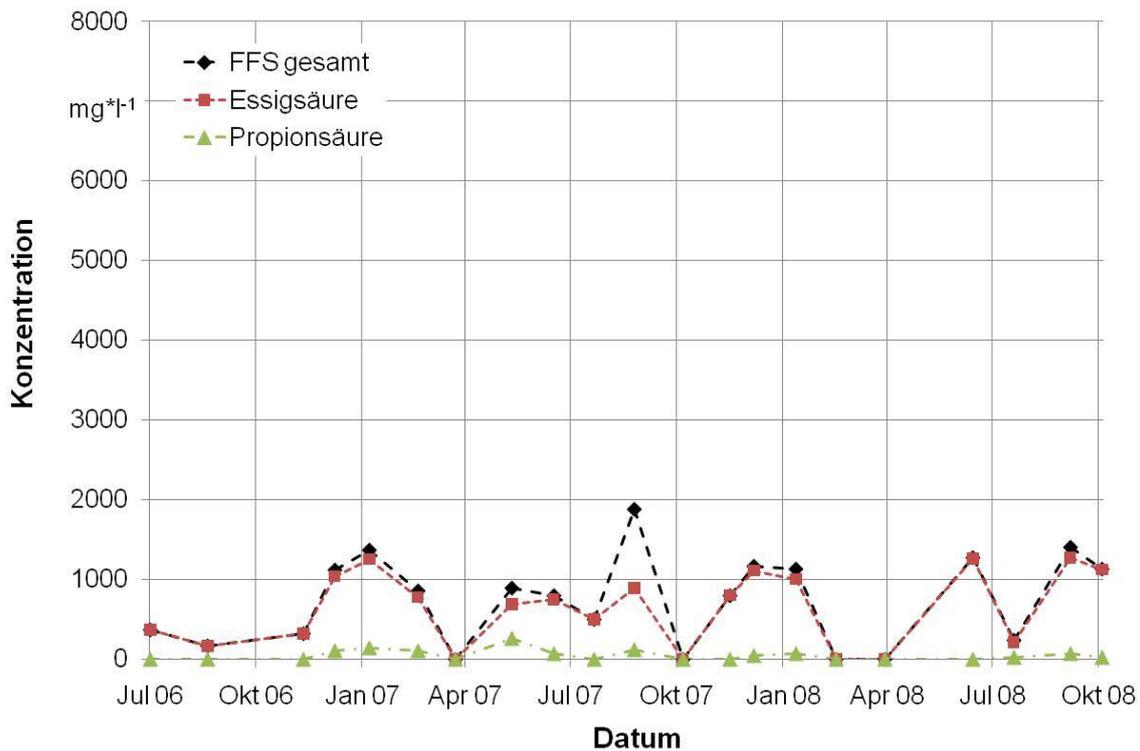


Abb. 26: Anlage E – Verlauf der Konzentration von FFS im Nachfermenter

Dabei lagen die Fettsäuren nahezu vollständig in Form von Essigsäure vor. Abb. 27 zeigt den schematischen Aufbau der Pilotanlage E. Da die Substratzugabe ausschließlich in den Fermenter erfolgt, stellt sich aufgrund seines geringen Nutzvolumens eine sehr hohe Raumbelastung von durchschnittlich $17 \text{ kg oTM} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ein. Da eine derart hohe Raumbelastung einen stabilen Betrieb unmöglich machen würde, wurden täglich durchschnittlich 100 m^3 des deutlich größer dimensionierten Nachfermenters in den Fermenter zurückgepumpt. Durch die regelmäßige Rückführung von dieser Menge reduzierte sich die durchschnittliche Verweilzeit des Materials im Fermenter auf ca. 3 Tage. Dieses Anlagenkonzept beruht also auf der Kombination einer hoch belasteten ersten Stufe, die in Richtung Hydrolyse gedrängt wird, mit einer gering belasteten zweiten Stufe der Methanisierung.

Zu Beginn der Untersuchungen traten bei Anlage E wiederholt Probleme mit Schwimmschichten, insbesondere im Gärrestlager auf. Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, wurde die Antriebsleistung der Rührwerke im Nachfermenter erhöht. Außerdem wurde durch den Einbau eines Schlepper betriebenen Rührwerks ins Gärrestlager eine weitere Möglichkeit geschaffen, im Bedarfsfall verstärkt zu rühren. Desweiteren kam es an mehreren Tagen zur Verstopfung des Separators. In diesem Fall musste ein Teil der Zuleitung ausgebaut und gereinigt werden.

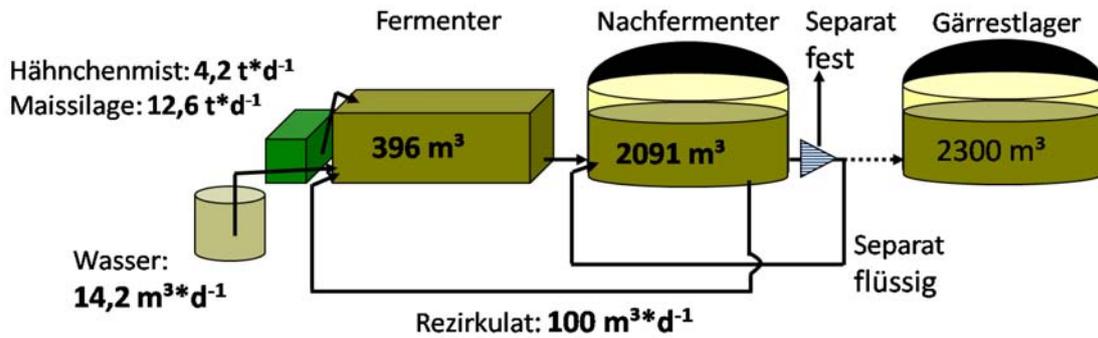


Abb. 27: Anlage E – Schematischer Aufbau

5.1.6 Anlage F

Anlage F besaß zwei parallel betriebene liegende Fermenter sowie einen stehenden Nachfermenter. Die Anlage erreichte über die gesamte Projektlaufzeit eine sehr zufrieden stellende elektrische Auslastung. Sie ist bereits seit 2002 in Betrieb und wurde im Juni 2006 von einer elektrischen Gesamtleistung von 330 kW_{el.} auf 526 kW_{el.} aufgerüstet. In diese Zeit fielen die ersten Wochen des Auswertzeitraums. Dementsprechend wurde die installierte Leistung zunächst noch nicht vollständig ausgeschöpft. Die beobachteten Leistungsabfälle resultierten meist aus Problemen mit den Rühraggregaten. Vor allem die Lager der horizontalen Rührwellen in den beiden Fermentern verursachten wiederholt Ausfälle.

Der bedeutendste Abfall der Anlagenleistung ab Mai 2008 war ebenfalls auf Probleme an einem der horizontalen Rührwerke zurück zu führen. Der betroffene Fermenter musste komplett außer Betrieb genommen werden, sodass die Anlage über mehrere Wochen nur noch in Teillast betrieben werden konnte.

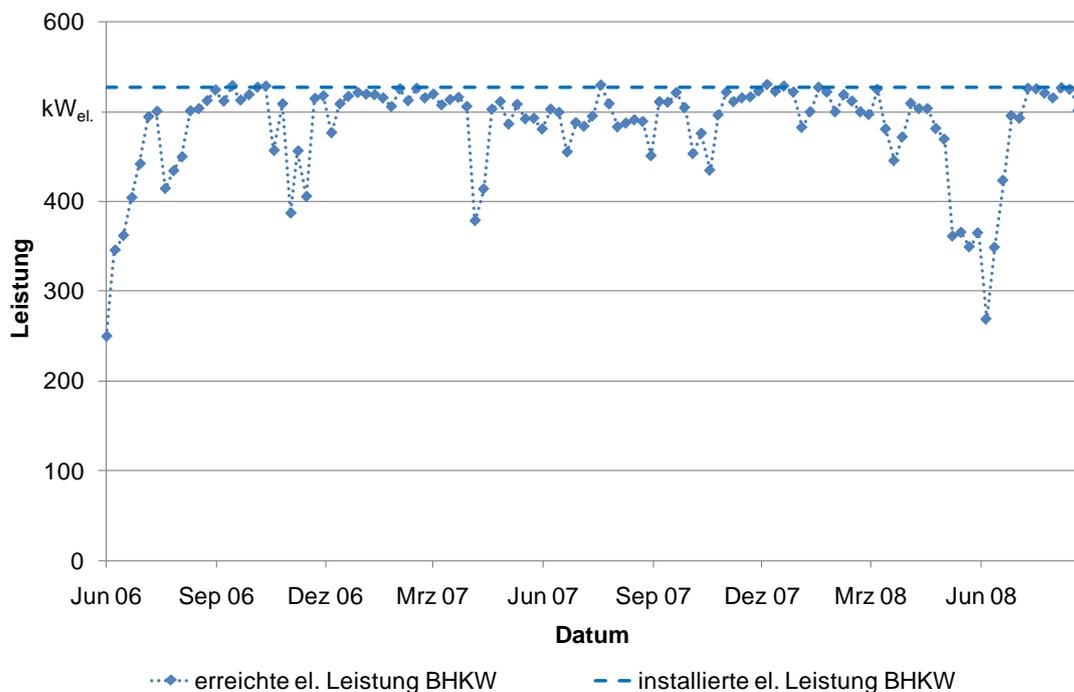


Abb. 28: Anlage F – installierte und erreichte elektrische Auslastung

Die Pilotanlage F wies bereits zu Beginn der Untersuchungen ein sehr überzeugendes Wärmekonzept auf. Neben der Beheizung verschiedener Wohngebäude wurde die produzierte Wärme zusätzlich zur Beheizung eines Industriebetriebes und einer Gärtnerei sowie zur Trocknung von Holzhackschnitzeln eingesetzt. Der Jahresgang der Wärmenutzung zeigt – im Gegensatz zu Anlagen mit ausschließlicher Beheizung von Wohngebäuden – einen deutlich geringeren Rückgang der externen Wärmeverwertung in der warmen Jahreszeit (vgl. Abb. 29). Auf diese Weise konnten im Untersuchungszeitraum durchschnittlich 58 % der verfügbaren Wärme abgesetzt werden, während knapp 13 % der produzierten Wärme zur Beheizung der Gärbehälter benötigt wurden.

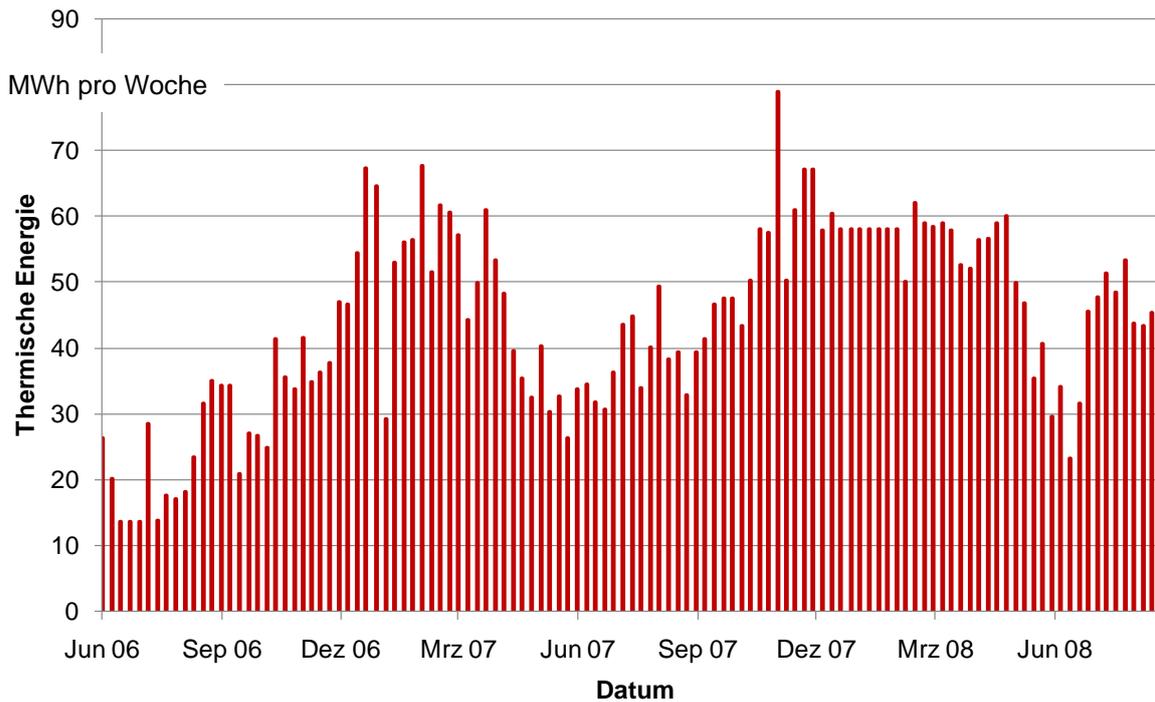


Abb. 29: Anlage F - Externe Wärmeverwertung

Bei Anlage F kam es während des gesamten Untersuchungszeitraums zu keiner wesentlichen Versäuerung in den Fermentern. Die Gesamtkonzentration an FFS stieg zu keinem Zeitpunkt über $4.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Dabei wurden mit Ausnahme eines Probenahmetermins Propionsäuregehalte von deutlich unter $1.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ gemessen (vgl. Abb. 30, Abb. 31)

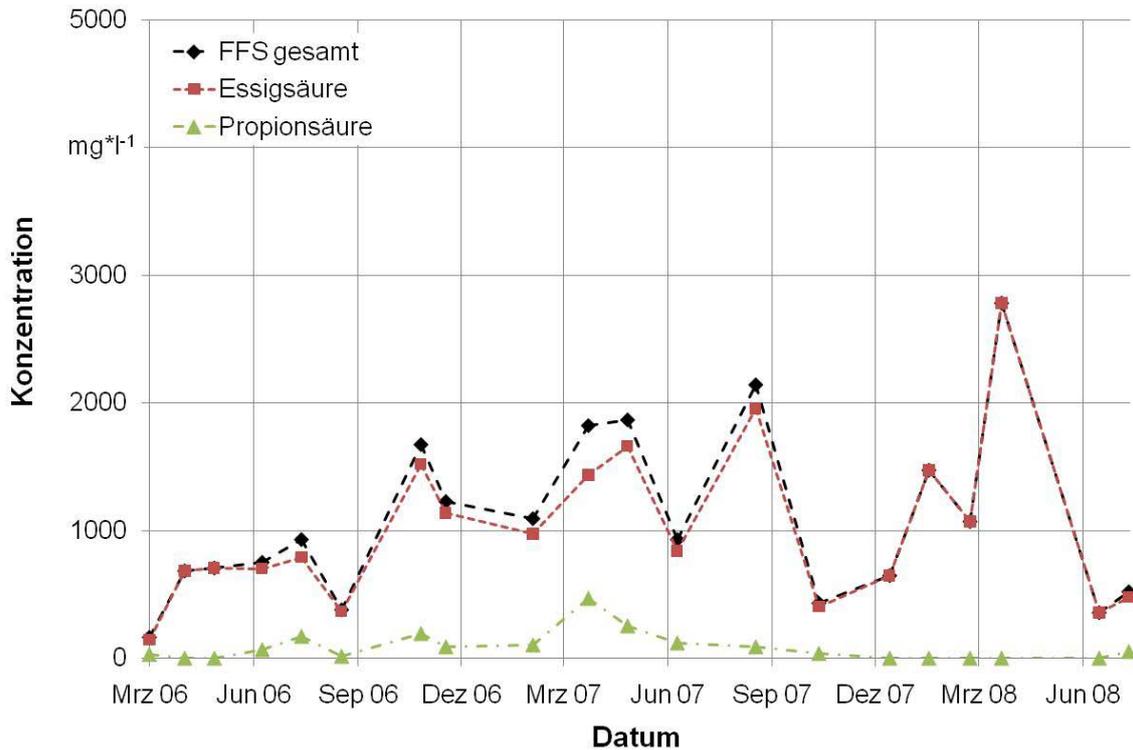


Abb. 30: Anlage F – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 1

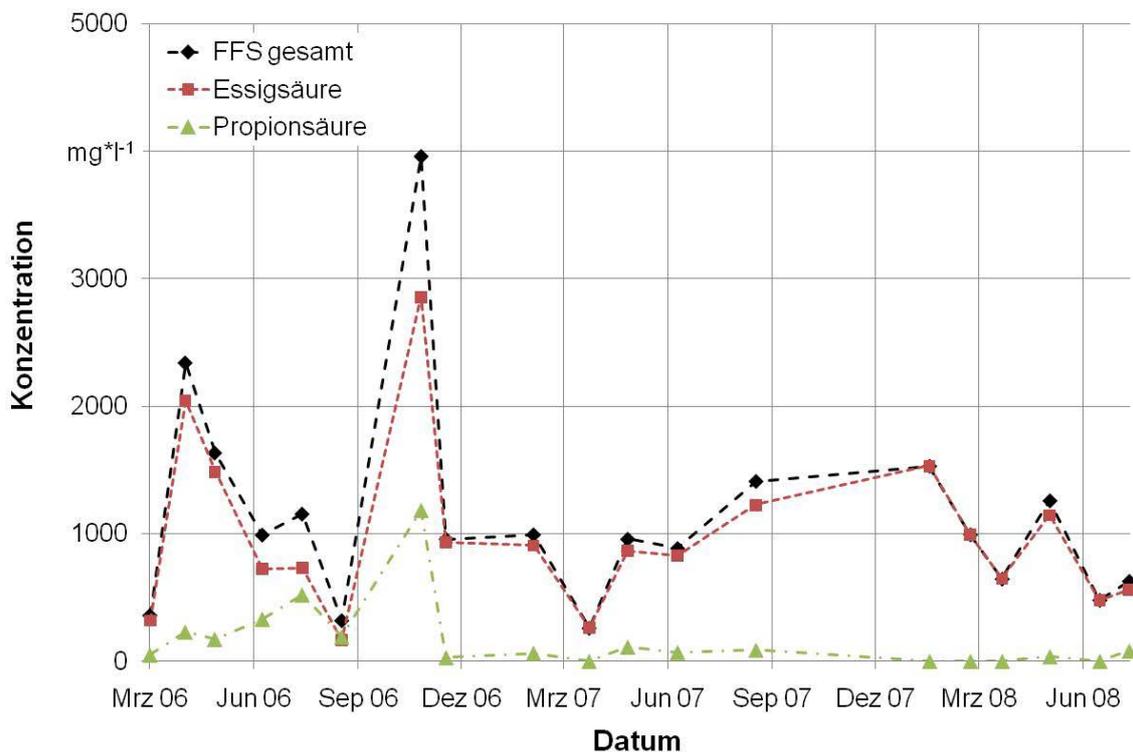


Abb. 31: Anlage F – Verlauf der Konzentration von FFS in Fermenter 2

5.1.7 Anlage G

Anlage G wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum mit sehr guter elektrischer Arbeitsausnutzung betrieben (vgl. Abb. 32). Die beiden Zündstrahl-BHKW mit einer in-

stallierten elektrischen Leistung von 80 bzw. 200 kW_{el.} konnten fast über den gesamten Untersuchungszeitraum unter Vollast gefahren werden. Im Juli 2008 kam es zu einem mehrtägigen Ausfall des kleineren BHKW, der den Leistungsabfall in diesem Zeitraum begründet.

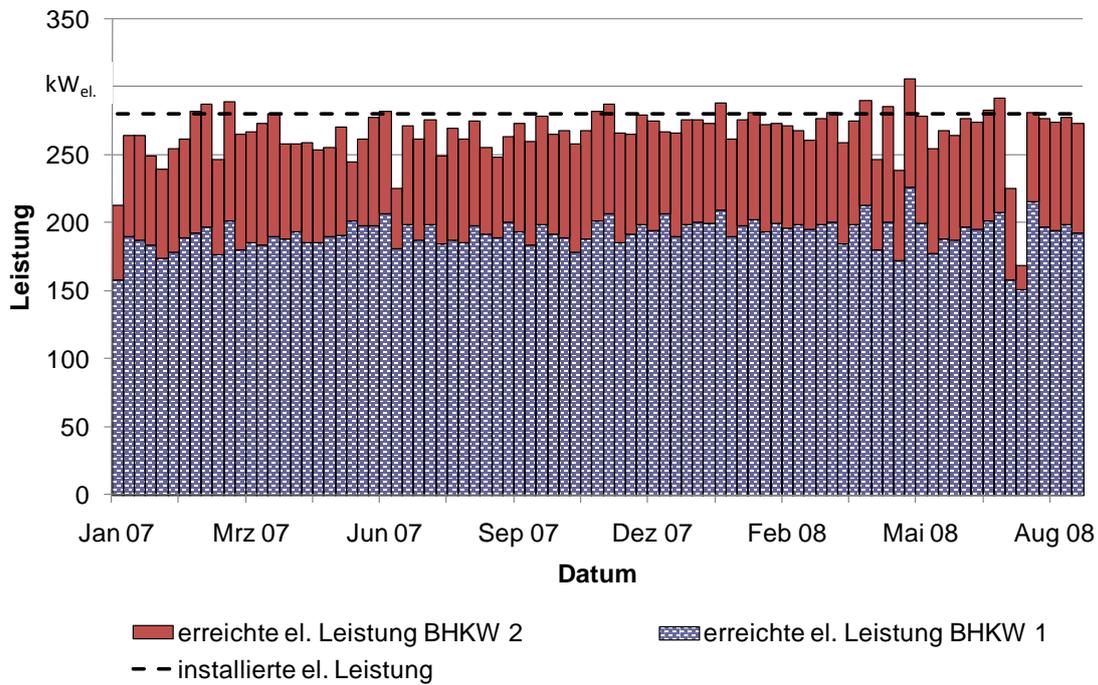


Abb. 32: Anlage G – installierte und erreichte elektrische Leistung

Bei Anlage G wurde die produzierte Wärme außer für die Beheizung der Gärbehälter zum Heizen des anliegenden Mastschweinestalls sowie weiterer Stallungen der naheliegenden Ortschaft genutzt. Weiterhin wurden Wohngebäude beheizt.

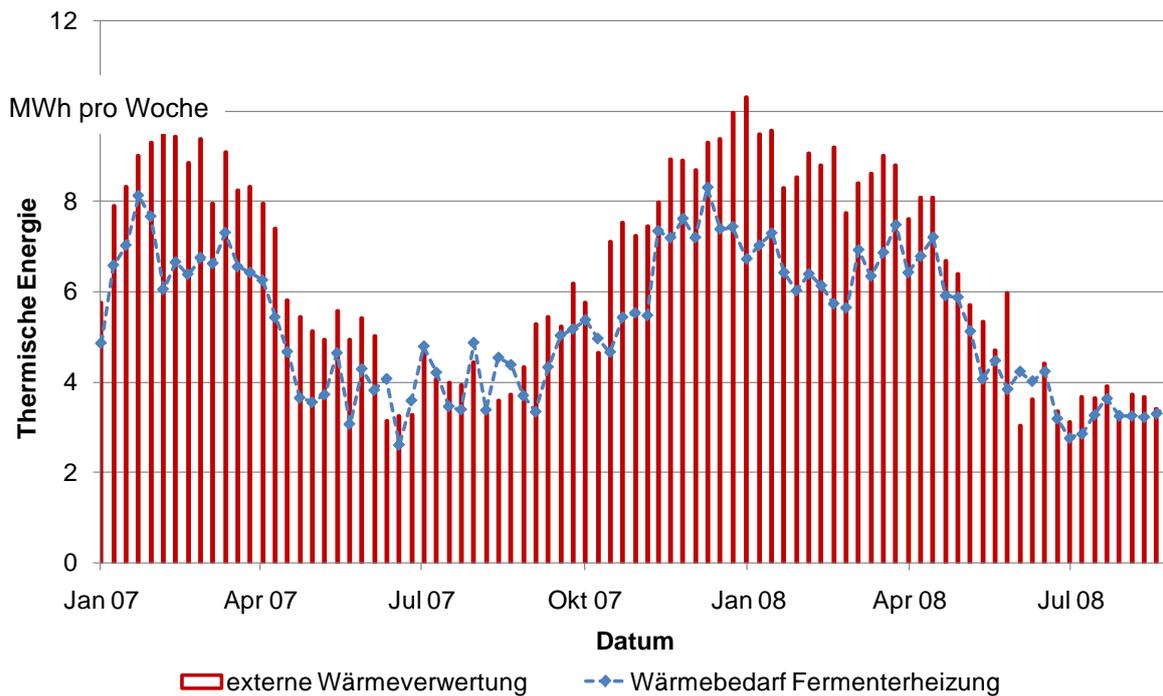


Abb. 33: Anlage G – Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung

Da im Untersuchungszeitraum neben der Nutzung zur Heizung von Gebäuden keine Wärmeverwertung möglich war, konnten lediglich in der kalten Jahreszeit wesentliche Anteile der anfallenden Wärme abgesetzt werden (vgl. Abb. 33).

Der Verlauf der Gehalte an Essig- und Propionsäure im Fermenter (vgl. Abb. 34) zeigte sich fast über den kompletten Untersuchungszeitraum sehr stabil. Lediglich im April 2007 kam es kurzzeitig zu einer Konzentrierung von Propionsäure bis auf knapp $2000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ und einem gleichzeitigen Abfall der Essigsäurekonzentration.

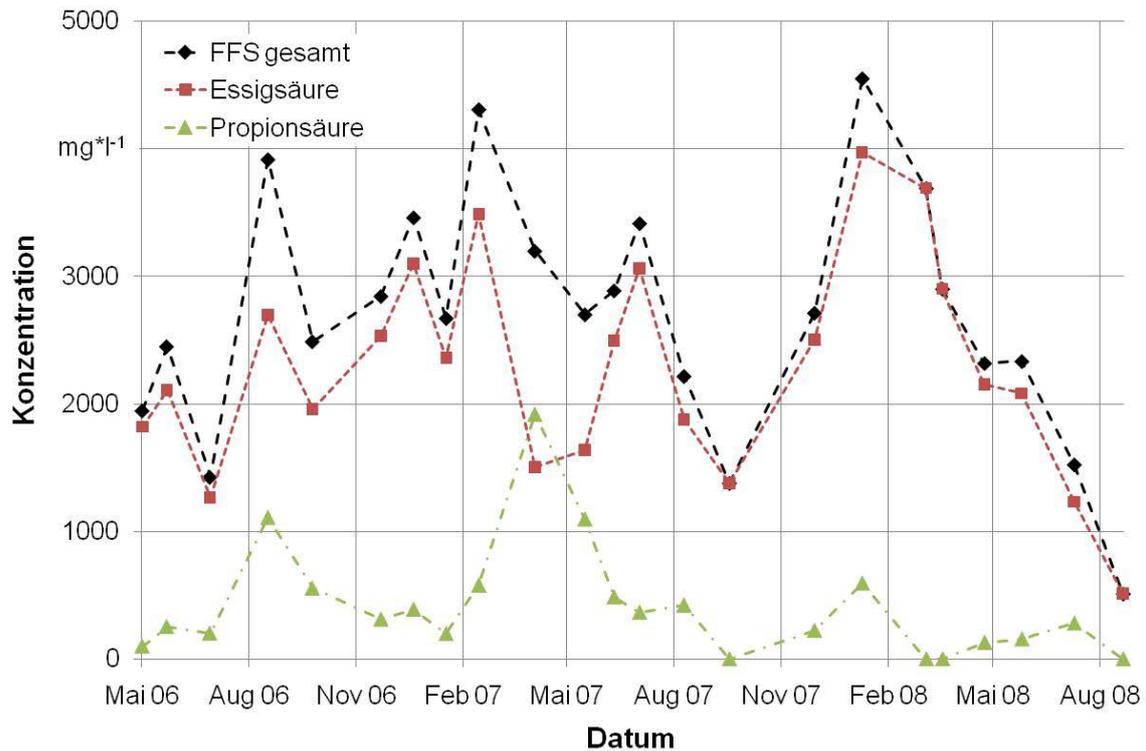


Abb. 34: Anlage G - Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter

Im Rahmen der Erhebungen traten bei Anlage G vereinzelt Verstopfungen am Überlauf vom Fermenter zum Nachfermenter auf. In mehreren Fällen mussten die Lager der Schnecken der Eintragstechnik ausgetauscht werden. Aufgrund von Leckagen musste der Abgaswärmetauscher ersetzt werden.

5.1.8 Anlage H

Anlage H wurde während der Projektlaufzeit erweitert ($H \rightarrow H^*$). Zum bestehenden liegenden Fermenter (276 m^3) und dem stehenden Nachfermenter (396 m^3) wurde ein weiterer stehender Nachfermenter (1106 m^3) errichtet. Damit wurde auf dieser Anlage der Gesamtgärraum von 672 m^3 auf 1178 m^3 deutlich erhöht. Die installierte BHKW-Leistung von $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ blieb unverändert. Der Verlauf der Arbeitsausnutzung zeigt auf, dass in der ersten Betriebsphase mit dem vorhandenen Gärraum eine Auslastung des BHKW nicht möglich war (vgl. Abb. 35). Ab April 2007 konnte mit Inbetriebnahme des zusätzlichen Nachfermenters die Anlagenauslastung nach und nach auf Vollast gesteigert werden. Der vorübergehende Leistungseinbruch Ende 2007 wurde durch Wartungsarbeiten am BHKW verursacht. Im Juni 2008 musste die Leistung kurzzeitig reduziert werden, da die Folienhaube eines Nachfermenters ausgetauscht werden musste.

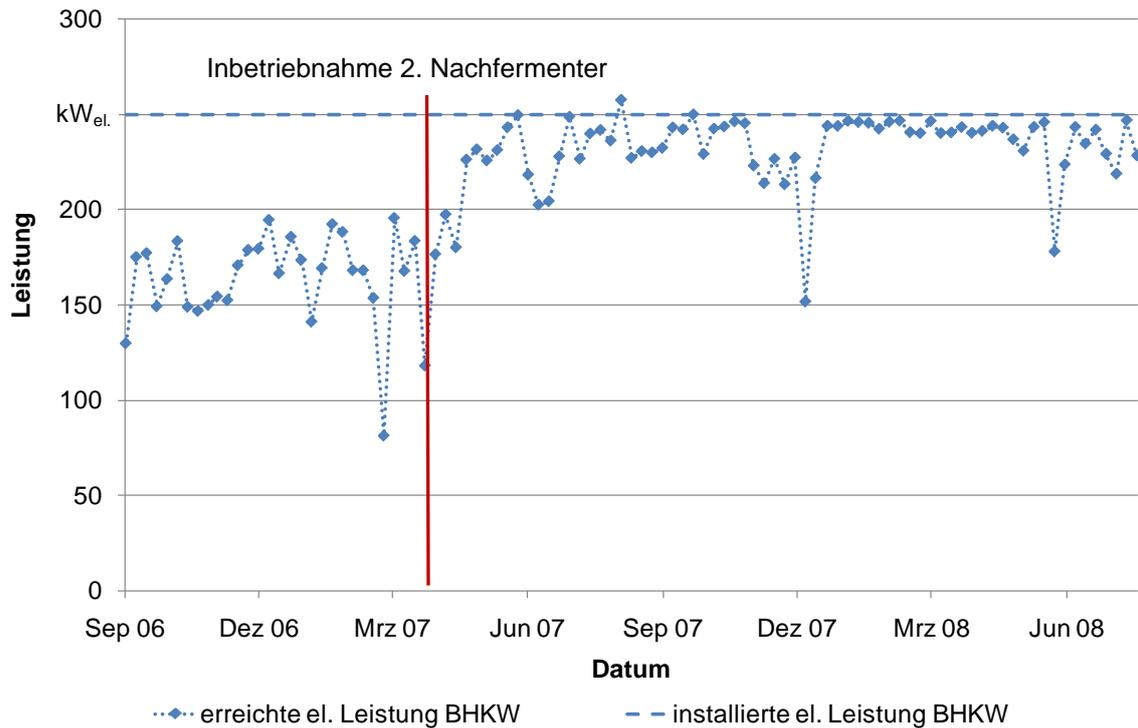


Abb. 35: Anlage H – installierte und erreichte elektrische Leistung

Der Bau eines zusätzlichen Nachfermenters war bei Anlage H gleichbedeutend mit einer Steigerung des Gesamtgärtraums um etwa das 2,6-fache, wodurch sich einige verfahrenstechnische Kenngrößen der Pilotanlage H veränderten (vgl. Tab. 6). Zum Erreichen des Volllastbetriebes wurde nach Inbetriebnahme des zweiten Nachfermenters die Substratzugabe gesteigert. Demensprechend wurde die Fermenter-Raumbelastung deutlich erhöht sowie die theoretische Verweilzeit des Substrates im Fermenter verkürzt.

Tab. 6: Anlage H – verfahrenstechnische Kennzahlen der zwei Ausbaustufen

	H		H*
Gesamt-Gärraum [m ³]	672	↗	1778
Zugabe Frischmasse [t/d]	10,9	↗	14,7
Zugabe org. Trockenmasse [t/d]	2,54	↗	3,54
Raumbelastung Fermenter [kg oTM*(m ³ * d) ⁻¹]	9,2	↗	12,8
Raumbelastung Gesamtgärraum [kg oTM*(m ³ * d) ⁻¹]	3,8	↘	2,0
Theo. Verweilzeit Fermenter (ohne Rezirkulat) [d]	25	↘	19
Theo. Verweilzeit Gesamtgärraum [d]	62	↗	121
Spezifische elektrische Leistung [kW * m ⁻³]	0,37	↘	0,14
Leistungsausnutzung [% der inst. el. Leistung]	65,9	↗	89,5

Aufgrund des erheblich gesteigerten Gesamt-Gärtraumes stellt sich die Entwicklung der Kennzahlen in Bezug auf den Gesamt-Gärraum gerade umgekehrt dar: hier kam es trotz

Erhöhung der täglichen Substratzugabe zu einer Verringerung der Gesamt-Raumbelastung sowie einer Erhöhung der theoretischen Verweilzeit im Gesamt-Gärraum (vgl. Tab. 6).

Über die Verwertung der Wärme liegen für Anlage H die Daten nicht vollständig vor. So wurden im November 2007 keine Informationen zur externen Wärmeverwertung übermittelt. Anlage H konnte zu Beginn der Untersuchungen nur bedingt Wärme absetzen, da die mögliche Versorgung einer nahe liegenden Wohnbebauung noch nicht realisiert war. Während der Projektlaufzeit wurde mit der Trocknung von Holz- und Gesträuchhackschnitzeln begonnen. Zunächst wurde die Trocknung je nach Verfügbarkeit des Materials betrieben, zum Ende der Datenerhebung konnte die durchschnittliche Verwertung der Wärme deutlich auf knapp 40 % gesteigert werden (vgl. Abb. 36). Daten zum Heizwärmebedarf der Fermenter wurden ab Dezember 2007 übermittelt. Im Mittel wurde zum Beheizen der Fermenter knapp 23 % der produzierten Wärme aufgewendet.

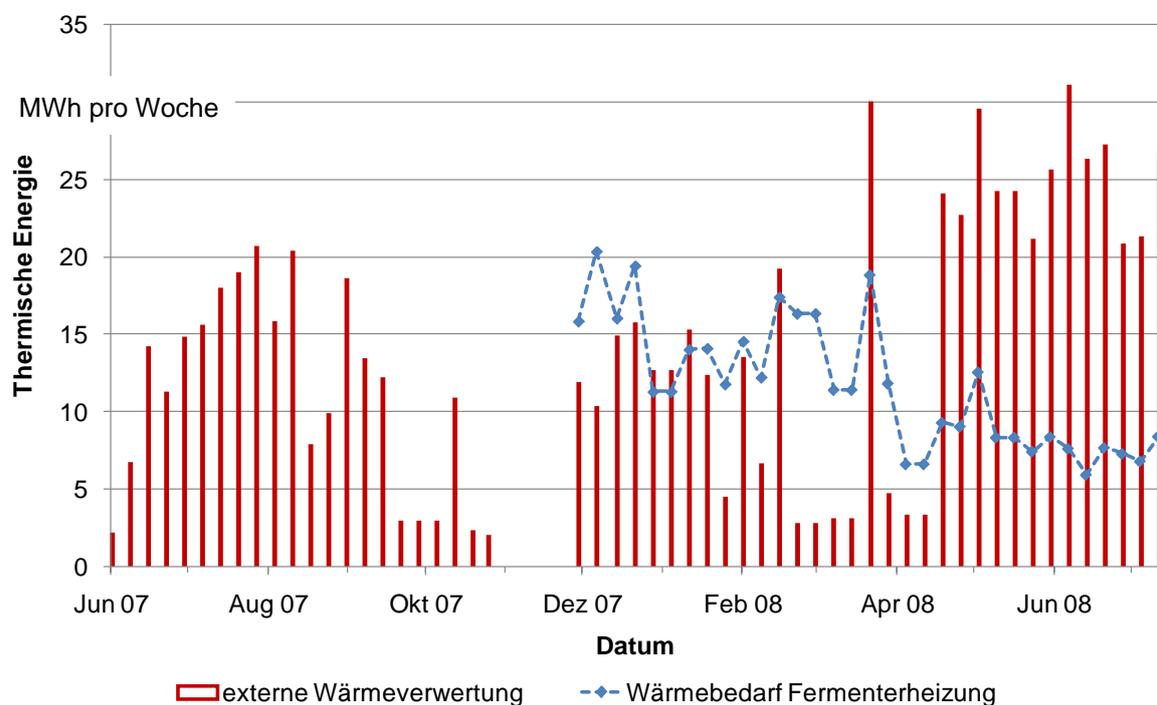


Abb. 36: Anlage H - Wärmeeigenbedarf und externe Wärmeverwertung

Bei Anlage H wurden vergleichsweise hohe Fettsäurekonzentrationen gemessen. Da der Fermenter mit 276 m^3 ein geringes Nutzvolumen besitzt, wurde er durchweg mit sehr hohen Raumbelastungen betrieben (vgl. Tab. 6). Von Beginn der Probenahme bis zum Zeitpunkt der Anlagenerweiterung im April 2007 übertraf die Konzentration an Propionsäure die Essigsäurekonzentration (vgl. Abb. 37).

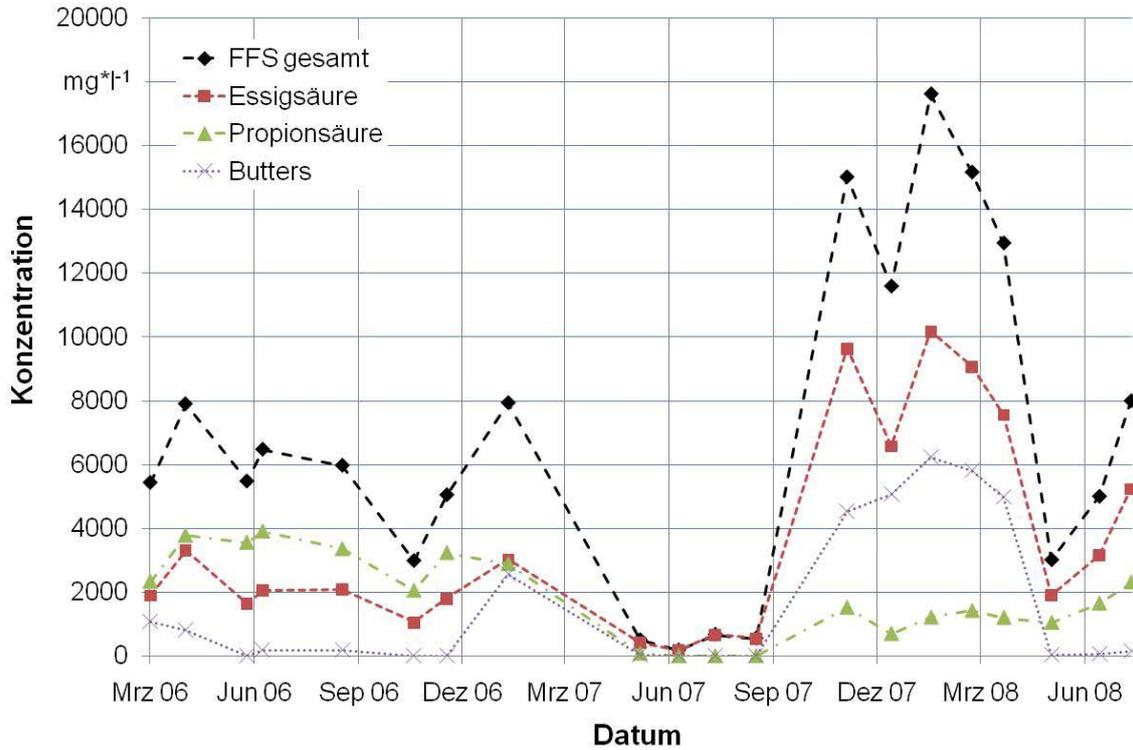


Abb. 37: Anlage H – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter

Ebenso wiesen die Fermenterproben erhebliche Konzentrationen an längerkettigen Fettsäuren auf (vgl. Abb. 38), die die Richtwerte für Rührkesselreaktoren deutlich übertreffen (vgl. Tab. 2, S. 23).

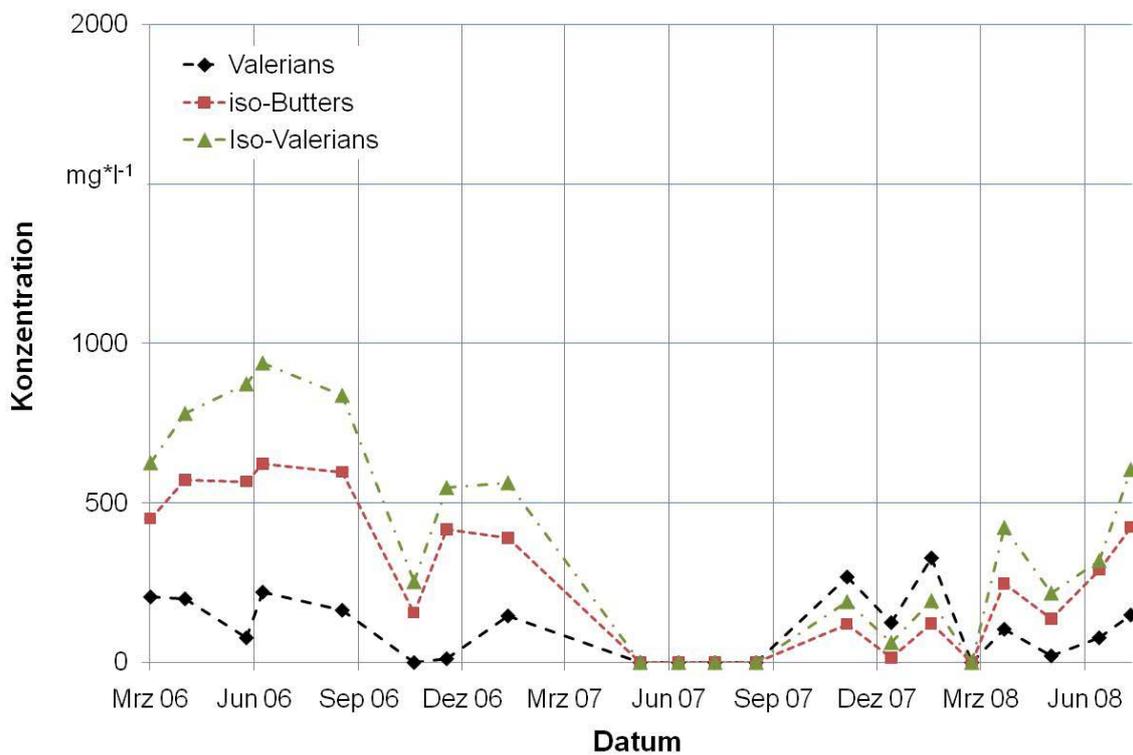


Abb. 38: Anlage H – Verlauf der Konzentration von längerkettigen FFS im Fermenter

Hier zeigt sich, dass sich diese Richtwerte bei Anlagenkonzeptionen mit liegenden Fermenter und Haspelrührwerken keine Anwendung finden dürfen. Bei Anlage H stellten sich über die gesamte Projektlaufzeit keine wesentlichen Hemmungen des Abbauprozesses ein.

Einen bemerkenswerten Verlauf nehmen die FFS-Konzentrationen im Nachfermenter 2. Hier waren über lange Zeit Gesamtsäurekonzentrationen von weniger als $2.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ zu verzeichnen. Von Mai bis August 2007 kam es jedoch zu einem rapiden Anstieg der Fettsäurekonzentration, in erster Linie von Essigsäure (vgl. Abb. 39). In diesem Zeitraum wurde versuchsweise eine Umstellung der Fütterungsstrategie vorgenommen. Bei reduzierter Substratzugabe in den Fermenter wurden bis zu 500 kg/d Getreide in den Nachfermenter eingetragen. Außerdem hatte diese Maßnahme einen erheblichen Rückgang der Fettsäurekonzentration im Fermenter zur Folge (vgl. Abb. 37). Ziel der Maßnahme war es, die Abbauaktivität in Nachfermenter 2 zu erhöhen. Aufgrund der erheblichen Versäuerung in Nachfermenter 2 wurden die Einsatzstoffe nach kurzer Zeit wieder ausschließlich in den Fermenter eingebracht. In der Folge stellte sich eine rasche Senkung der Fettsäurekonzentration auf etwa $1000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ein.

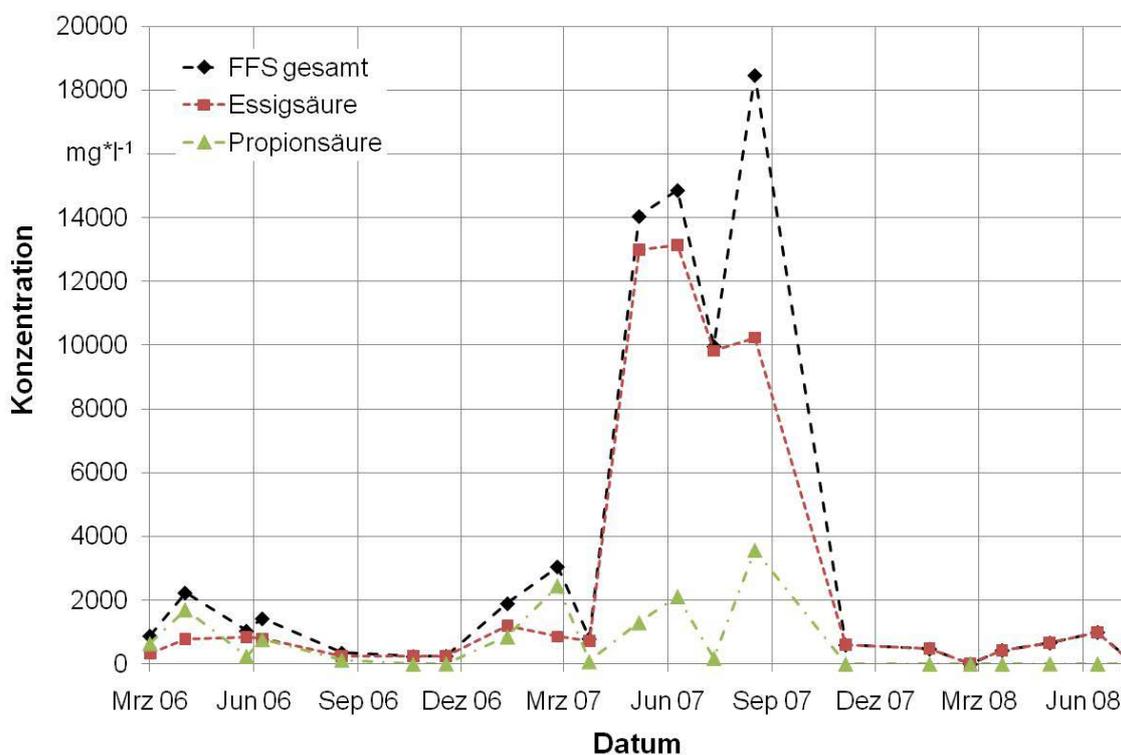


Abb. 39: Anlage H – Verlauf der Konzentration von FFS in Nachfermenter 2

Bei Anlage H kam es während des Untersuchungszeitraumes bereits zu starkem Verschleiß am Behälter der Eintragstechnik. Hier musste durch das Aufschiessen von Blechen ein vollständiges Durchscheuern des Behälters verhindert werden.

5.1.9 Anlage I

Bei Anlage I handelt es sich um ein zweiphasiges Konzept mit vorgeschalteter Hydrolysestufe. Die Anlage stellt mit $5,8 \text{ m}^3/\text{kW}_{\text{el}}$ das geringste spezifische Gärvolumen zur Verfügung. Als weitere Besonderheit dieses Konzepts werden hier hohe Anteile an Körnern vergoren, teils in angemaischter Form, teils in geschroteter Form. Nach einer akzeptablen elektrischen Auslastung zu Projektbeginn kam es auf der Anlage wiederholt zu biologischen Instabilitäten. Mitte des Jahres 2007 wurde vom Betreiber eine Charge

Getreide eingesetzt, die gegen Schaderreger mit chemischen Zusätzen behandelt worden war. Hierin liegt wohl die Ursache des erheblichen Leistungseinbruchs zur Jahresmitte 2007. In der Folge wurde die kontaminierte Charge nur noch zu geringen Anteilen zugemischt.

Im Herbst 2007 zwangen die hohen Preise für Getreide den Betreiber dazu, die Substratzugabe zu reduzieren, da zu den Konditionen nicht kostendeckend gewirtschaftet werden konnte. In dieser Phase wurde angestrebt, das Getreide im Substratmix vermehrt durch Silagen zu substituieren. Auf diese Weise sollte unter den gegebenen Rahmenbedingungen eher ein wirtschaftliches Betreiben der Anlage möglich sein. Da dieses Anlagenkonzept bezüglich der Ausstattung an Rühr- und Pumpentechnik auf die Vergärung von Körnern ausgelegt ist, stellte sich der Einsatz hoher Anteile an Silagen als problematisch dar. Im Juni 2008 resultierte der vermehrte Silageeinsatz in einer starken Entmischung des Gärmediums, die zur Bildung einer mächtigen Schwimmdecke im Fermenter führte. In der Folge musste der Fermenter entleert und neu in Betrieb genommen werden.

Um künftig eine Vergärung von Silagen in dieser Anlage zu ermöglichen, wurden Umbaumaßnahmen an den Röhreinrichtungen vorgenommen. So besteht nun die Möglichkeit, Fermenterinhalt im unteren Bereich des Fermenters abzupumpen und über eine Düse erneut auf die Oberfläche des Fermenterinhalt zu verteilen. Auf diese Weise ist es möglich, die Bildung einer Schwimmdecke durch aufschwimmende Substratbestandteile zu unterbinden. Im weiteren Betriebsverlauf hat sich die hier eingesetzte Art der Rezirkulation gut bewährt, da im weiteren Betriebsverlauf keine erneute Schwimmschichtbildung beobachtet wurde. Zum Ende des Untersuchungszeitraums konnte die elektrische Auslastung wieder langsam gesteigert werden und erreichte bis zum März 2009 wieder Werte um 75 %.

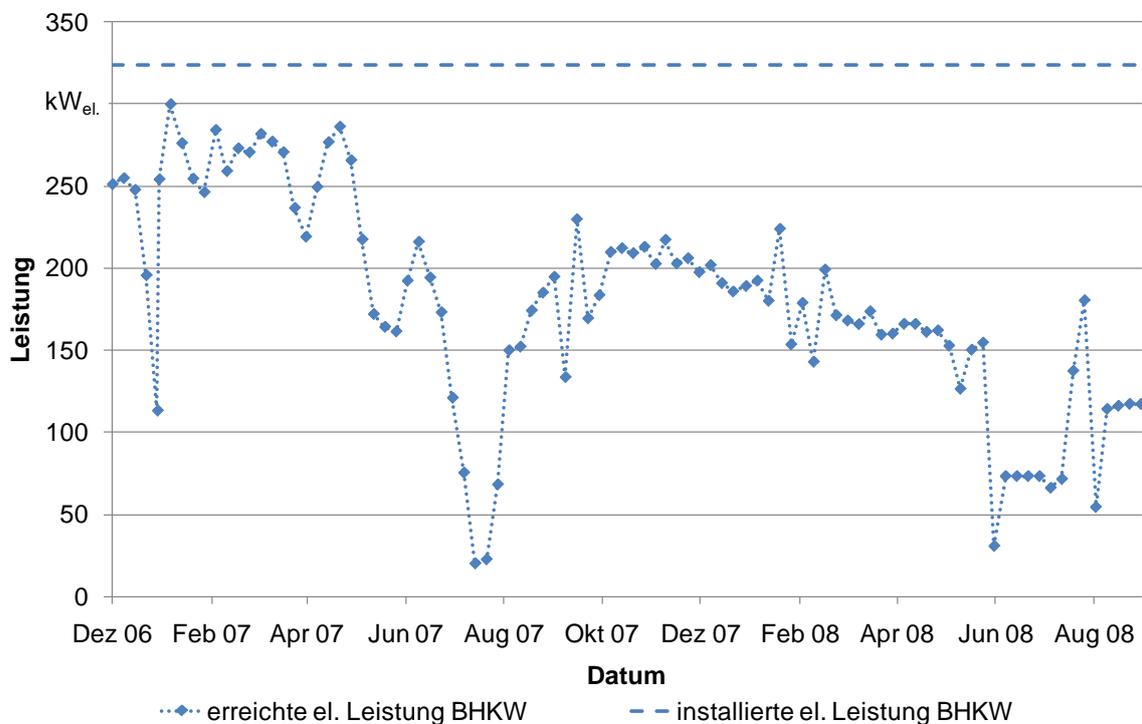


Abb. 40: Elektrische Leistungsausnutzung bei Pilotanlage I

Anlage I versorgt über ein Nahwärmenetz den landwirtschaftlichen Betrieb des Anlagenbetreibers sowie mehrere Wohnhäuser der Ortschaft mit Wärme. Die ausschließliche

Wärmenutzung zu Heizzwecken zeigt der hierfür charakteristische Verlauf der Wärme-
 nutzung über die Projektlaufzeit. Während in der kalten Jahreszeit die Wärmeverwertung
 zufrieden stellend ist, kann in den Monaten mit geringem Heizwärmebedarf kaum Wärme
 abgesetzt werden. Die geringe Anlagenauslastung bedingt einen dementsprechend gerin-
 geren Anfall an Wärme. Überdies wurde auf Anlage I kein Abgaswärmetauscher einge-
 setzt, was den Nutzwärmeanteil ebenfalls reduzierte. Dies trug dazu bei, dass eine durch-
 schnittliche externe Wärmeverwertung von 60 % erreicht wurde.

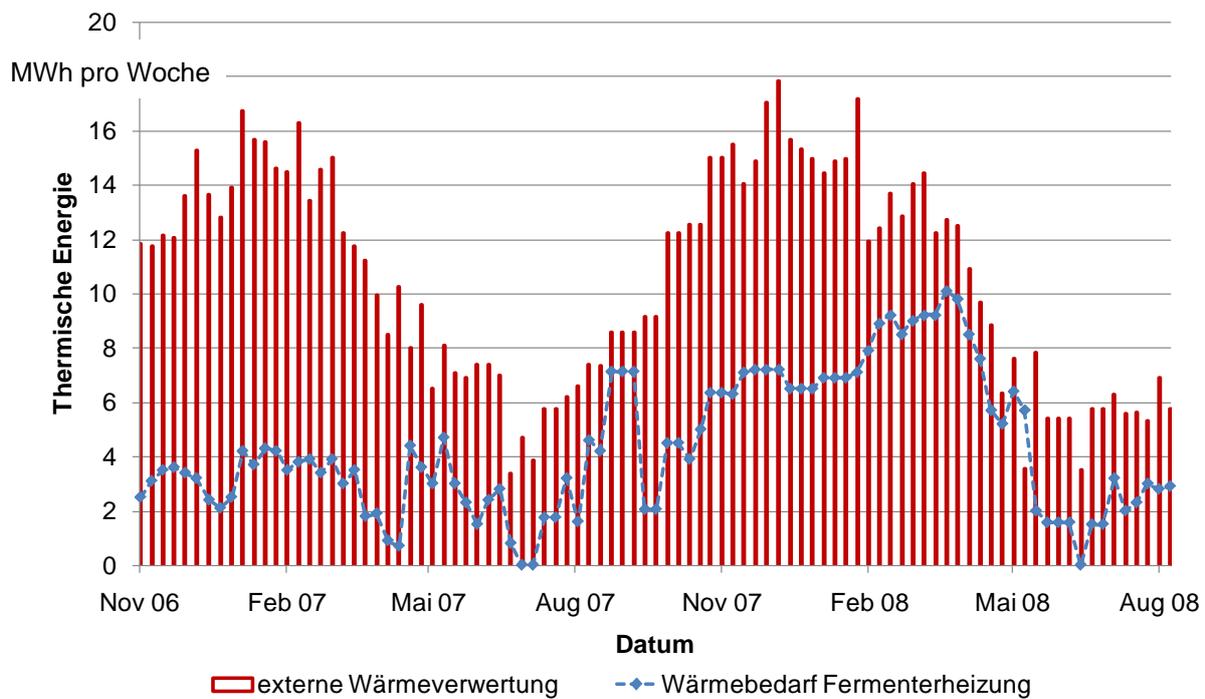


Abb. 41: Anlage I - Heizwärme und externe Wärmeverwertung

Abb. 42 zeigt die Konzentration flüchtiger Säuren im Fermenter über den Untersuchungs-
 zeitraum. Hier schlägt sich die Hemmung des Abbauprozesses durch den Einsatz der kon-
 taminierten Getreidecharge ab Juli 2007 ganz erheblich nieder. Zwar kommt es zu keinem
 starken Anstieg der Propionsäure-Konzentration, jedoch erreicht die Gesamtkonzentration
 an FFS mit über $12.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ einen deutlich überhöhten Wert. Nach der Zurücknahme
 der Getreidezugabe konnten recht schnell wieder moderate Konzentrationen erreicht wer-
 den.

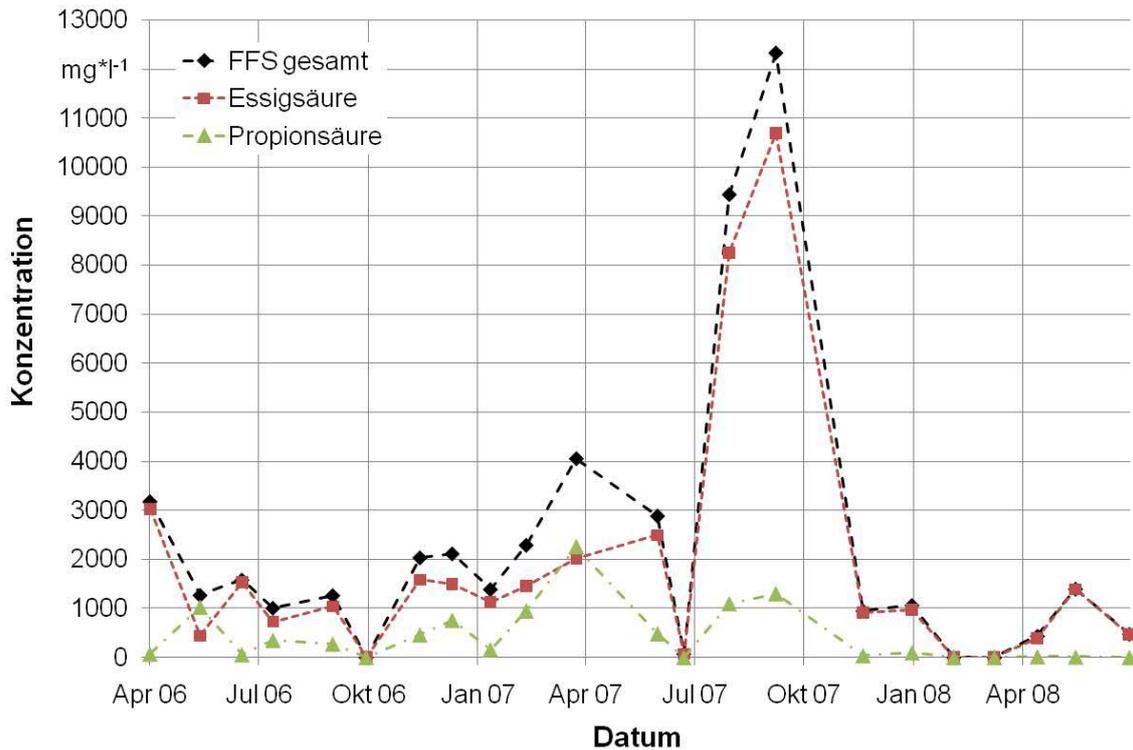


Abb. 42: Anlage I – Verlauf der Konzentration von FFS im Fermenter

5.1.10 Anlage J

Anlage J besitzt zwei in Reihe geschaltete Fermenter, wobei die Möglichkeit besteht, über einen zusätzlichen Feststoffeintrag auch Substrat in Fermenter 2 einzubringen. Anlage J wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum sehr konstant betrieben (vgl. Abb. 43). Dabei wurde mit einer elektrischen Arbeitsausnutzung von 89 % ein zufriedenstellender Wert erzielt.

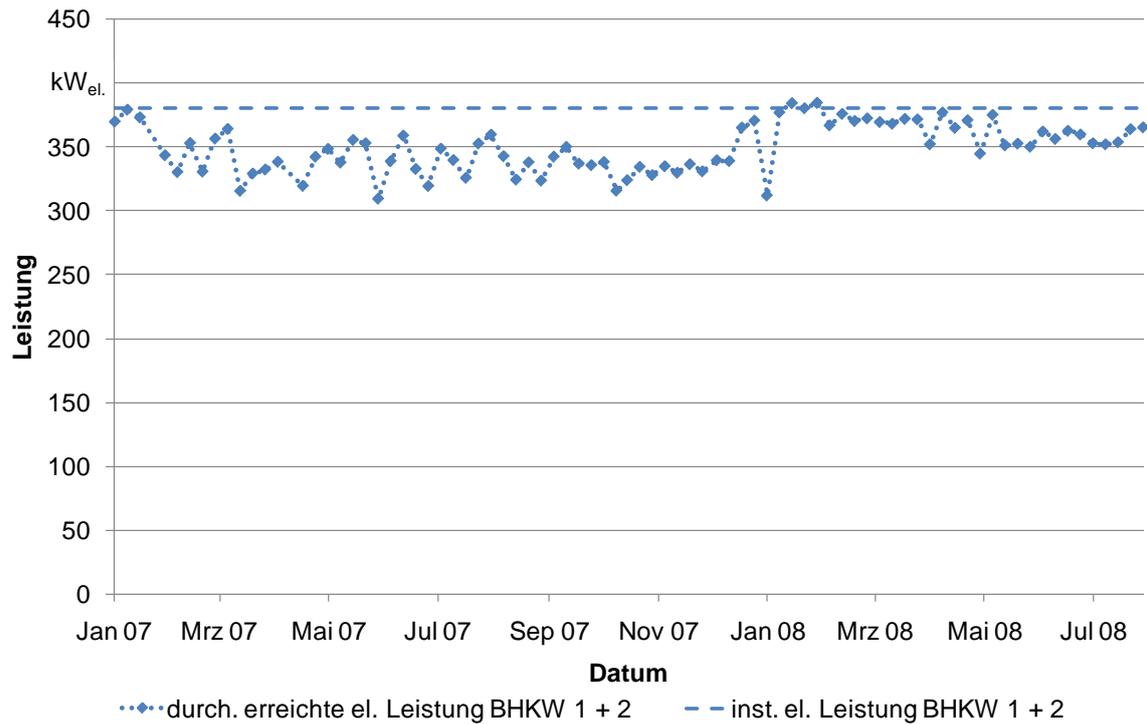


Abb. 43: Anlage J – installierte und erreichte elektrische Leistung

Die anfallende Wärme wird bei Anlage J zur Beheizung von Stallungen des landwirtschaftlichen Betriebes verwendet. Weiterhin werden das Wohnhaus der Betreiberfamilie sowie weitere Wohnhäuser der Ortschaft beheizt. Saisonal besteht die Möglichkeit, Wärme zur Trocknung von Getreide einzusetzen. Dementsprechend verbleiben in der warmen Jahreszeit noch deutliche Reserven bei der Wärmeverwertung (vgl. Abb. 44).

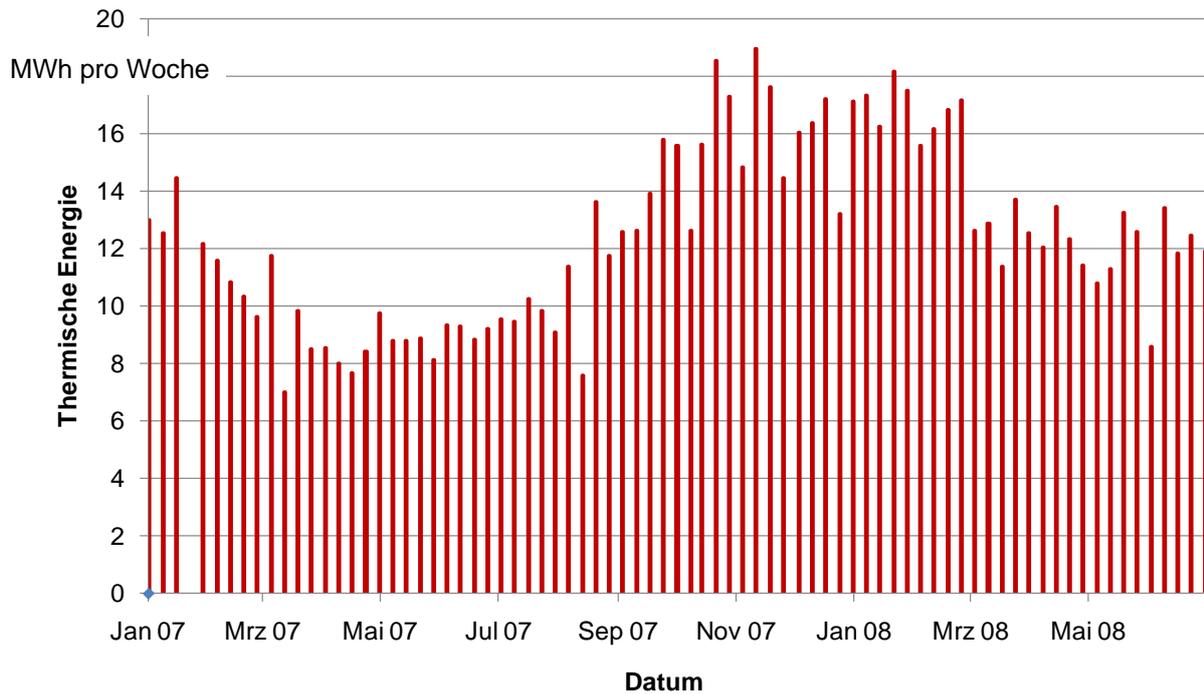


Abb. 44: Anlage J – externe Wärmeverwertung

Während Fermenter 1 Gesamtkonzentrationen an FFS von maximal $3000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ aufwies (vgl. Abb. 45), lagen in Fermenter 2 zu Projektbeginn sehr hohe Fettsäurekonzentrationen vor (vgl. Abb. 46). Dort war bei gleichzeitig geringer Konzentration von Essigsäure eine äußerst kritische Konzentration an Propionsäure vorhanden. Wie der Verlauf der Anlagenauslastung zeigt, wirkte sich die überhöhte Konzentration kaum hemmend auf die Gesamtmethanproduktion aus. Die sehr hohen Fettsäuregehalte im Nachfermenter weisen darauf hin, dass ein erheblicher Anteil des Substratabbaus im Nachfermenter ablief (vgl. Abb. 47). Um der Entwicklung entgegen zu wirken, wurde die Substratzugabe in Fermenter 2 reduziert. Es ist davon auszugehen, dass die hohen Säurewerte durch eine überhöhte Belastung des Gärtraumes in diesem Fermenter verursacht wurden, da hier neben dem Überlauf aus Fermenter 1 auch die direkt in Fermenter 2 eingebrachte organische Substanz vergoren wird.

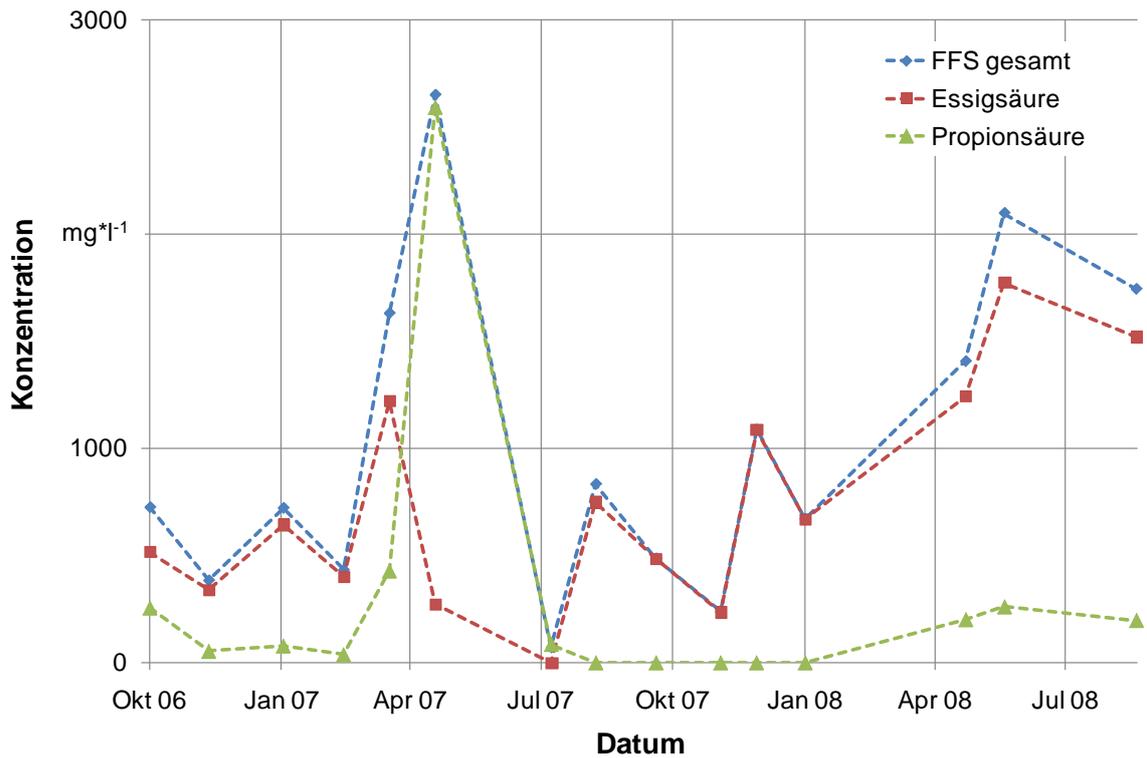


Abb. 45: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS in Fermenter 1

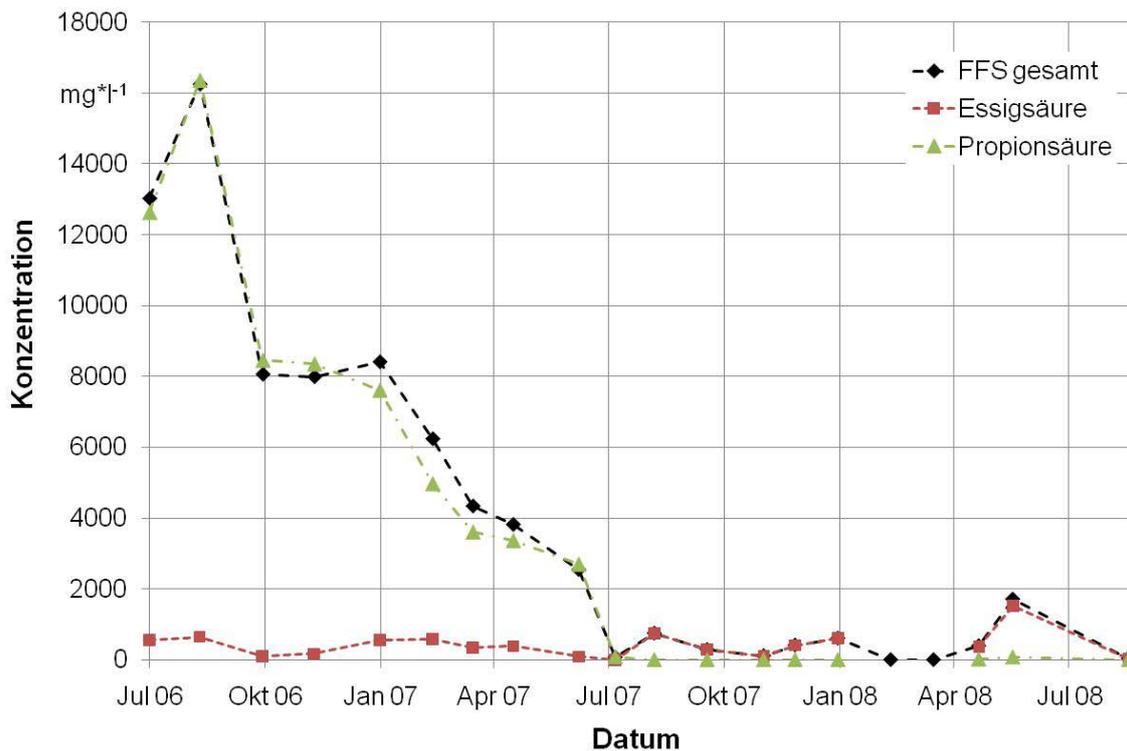


Abb. 46: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS in Fermenter 2

Im weiteren Verlauf konnte die Konzentration an Propionsäure stetig gesenkt werden. Bis zum Ende der Untersuchungen wurde keine weitere Anreicherung von Propionsäure in Fermenter 2 registriert.

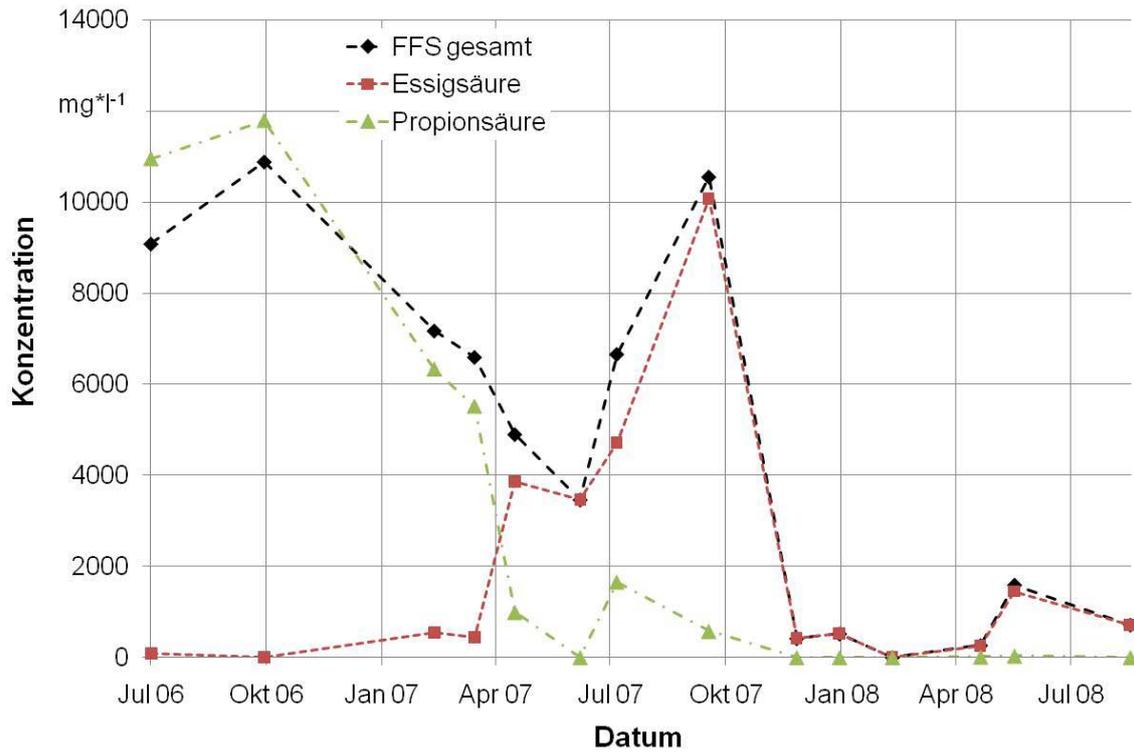


Abb. 47: Anlage J – Verlauf der Konzentration an FFS im Nachfermenter

5.2 Ermittlung des Restgaspotentials

Die Ermittlung des Restgaspotentials wurde für die Pilotanlagen in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführt. Dabei wiesen die Potentiale eine große Bandbreite auf – sowohl beim Vergleich der Biogasanlagen untereinander als auch in der Betrachtung von Einzelanlagen in den aufeinanderfolgenden Jahren.

In den Gärversuchen des Jahres 2007 wurden bei einem Temperaturniveau von ca. 20°C Biogaserträge zwischen 1,7 und 11 Liter je Kilogramm Gärrest erzielt. Bei der Vergärung bei 38°C wurden Biogaserträge in einem Bereich von 5,2 Litern je Kilogramm bis knapp 15 Litern je Kilogramm gemessen (vgl. Abb. 48). Demnach gelangen auf den Praxisanlagen zum Teil erhebliche Mengen an noch vergärbare organischer Substanz in das Gärrestlager. Dabei wurde erwartungsgemäß bei allen untersuchten Anlagen mit der warmen Versuchsreihe eine höhere Biogasausbeute erzielt als bei der Vergärung auf niedrigem Temperaturniveau.

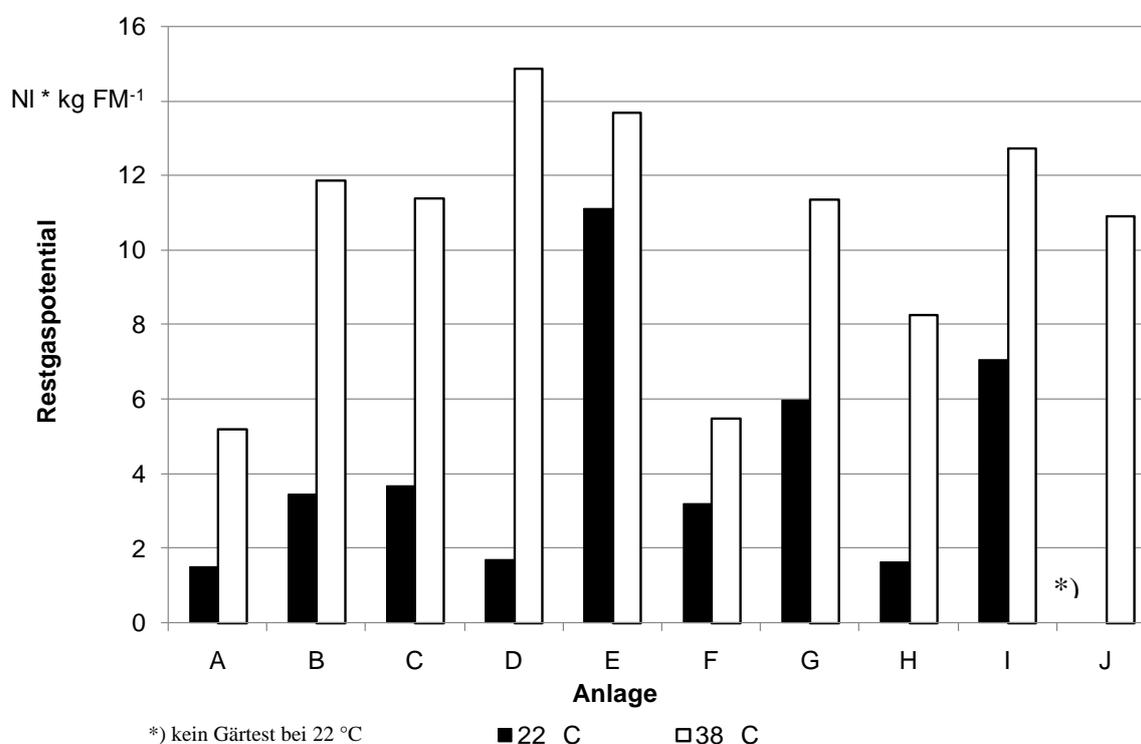


Abb. 48: Restgaspotential der Pilot-Biogasanlagen im Jahr 2007 bei 22 °C bzw. 38 °C

Im Jahr 2008 wurden die Anlagen erneut beprobt und unter den gleichen Rahmenbedingungen vergoren. Dabei konnte zum Zeitpunkt des Versuchsstarts nicht auf allen Pilot-Biogasanlagen Gärrest entnommen werden. Bei den Anlagen, bei denen eine Entnahme möglich war, fand die Beprobung ebenso wie in 2007 am Überlauf der letzten Vergärungsstufe statt.

In der Versuchsreihe des Jahres 2008 lagen die Restgasmengen im Durchschnitt unter denen des Jahres 2007. Die Erträge erstrecken sich dabei von 0,9 bis 3,4 Liter je Kilogramm Gärrest bei Vergärung bei 22° C. Analog zum Vorjahr wiesen die mesophil betriebenen

Versuchsreihen mit Werten zwischen 3,4 und 12,9 Litern je Kilogramm Gärrest deutlich höhere Erträge auf (vgl. Abb. 49).

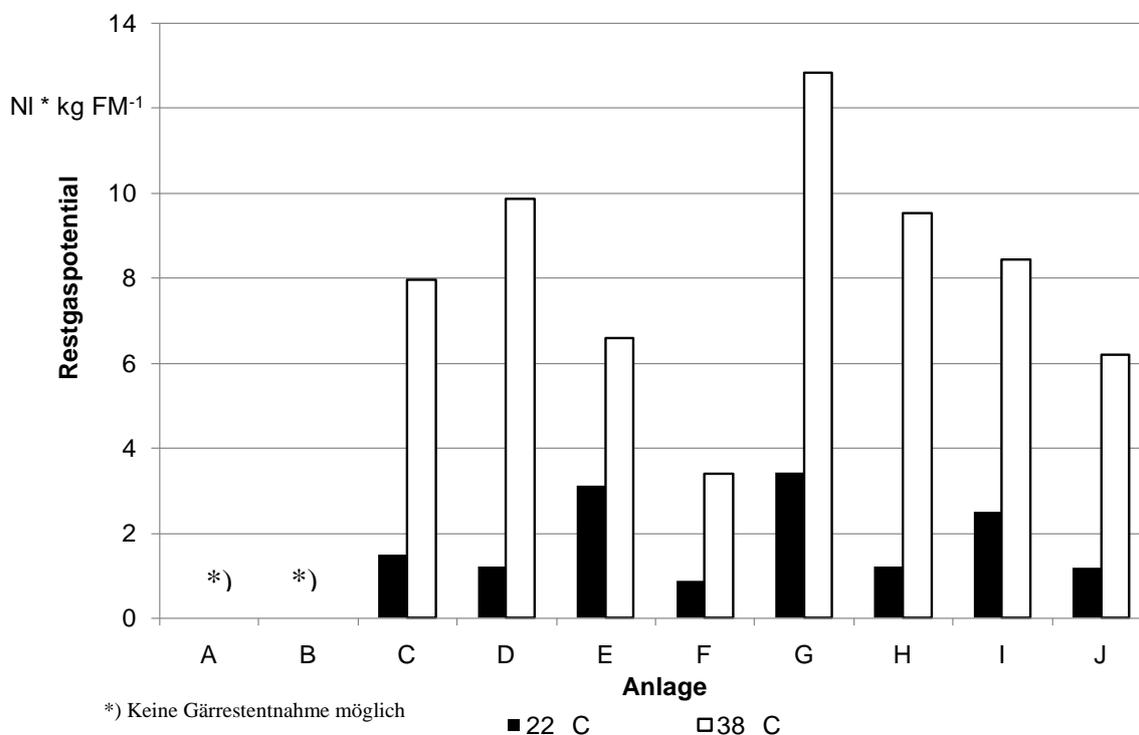
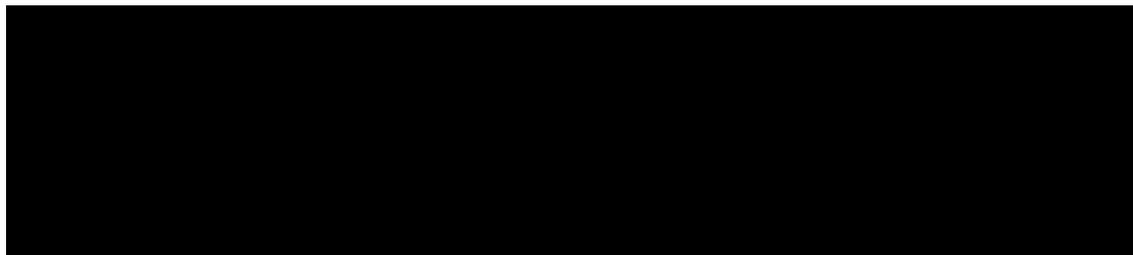


Abb. 49: Restgaspotential der Pilot-Biogasanlagen im Jahr 2008 bei 22 °C bzw. 38 °C

Tab. 7 zeigt die Abweichung der Erträge des Jahres 2008 von denen des Jahres 2007. Bei einer Fermentationstemperatur von 38 °C konnte für sechs von acht Anlagen im zweiten Jahr eine Reduzierung des Restgaspotentials ermittelt werden. Für die Anlagen G und H kam es hingegen zu einer Steigerung des Potentials im Jahr 2008. Der Vergleich der Versuchsreihen bei niedrigem Temperaturniveau zeigt, dass bei allen Anlagen im Jahre 2008 geringere Biogaserträge erzielt wurden. Da allerdings bei den Untersuchungen im Jahr 2007 die Temperatur im Versuchs-Container nicht ununterbrochen auf einem Niveau von 22 °C gehalten werden konnte (vgl. Kap. 4.4, S. 27.), ist ein unmittelbarer Vergleich der Potentiale nicht ohne Berücksichtigung der Temperaturabweichung möglich.

Tab. 7: Vergleich der Restgaspotentiale der Jahre 2007 und 2008 [$NI * (kg FM)^{-1}$]

Die folgenden Auswertungen beziehen sich ausschließlich auf die Untersuchungen des Jahres 2008. Betrachtet man das Restgaspotential als Anteil an der durchschnittlich auf der jeweiligen Anlage erzielten Biogasausbeute, so zeigen die Ergebnisse der Gärtests mit den Proben von acht Pilotanlagen eine erhebliche Bandbreite. Bei einer Gärtemperatur von 38°C entsprachen die gemessenen Restgaspotentiale 1,3 bis 6,1 % der Biogasausbeute (vgl. Tab. 8). Erwartungsgemäß wurden in den Gärtests bei 20°C deutlich geringere Anteile an der anlagenspezifischen Biogasausbeute von 0,3 bis 1,3 % der Biogasausbeute aus dem eingesetzten Substrat erzielt. Dies entspricht einem Anteil von 12 bis 47 % der Ausbeuten in den „warmen“ Gärtests (im Mittel 24 %). Tendenziell war bei den 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 scheint die methanogenen Organismen zu beeinträchtigen.

Die folgenden vergleichenden Auswertungen beschränken sich auf die Versuchsreihe der „kalten“ Restgaspotentialtests bei einer Temperatur von 22°C.

Tab. 8: Restgaspotentialuntersuchung 2008 – Biogasausbeuten und Anteil an der gemessenen Gesamtausbeute bei unterschiedlicher Gärtemperatur

Anlage	C	D	E	F	G	H	I	J
T = 20°C								
$NI*(kg\ oTM)^{-1}$	4,0	2,9	7,1	1,9	12,5	3,6	9,0	2,4
Anteil an gemessener Gesamtausbeute [%]	0,5	0,4	1,0	0,4	1,6	0,5	1,4	0,3
T = 38°C								
$NI*(kg\ oTM)^{-1}$	21,4	23,6	15,0	7,5	47,0	28,0	30,6	12,7
Anteil an gemessener Gesamtausbeute [%]	2,6	3,6	2,0	1,4	6,1	3,7	4,6	1,3
Verhältnis 20°C/38°C [%]	18,6	12,2	47,5	25,5	26,7	12,7	29,5	18,8

Die Abhängigkeit des Restgaspotentials von der Gesamt-Verweilzeit im Fermentersystem ist bei Betrachtung der vorliegenden Daten nicht eindeutig ersichtlich (vgl. Abb. 50). Jedoch zeigt sich, dass die zwei thermophil betriebenen Konzepte unterdurchschnittliche Restgaspotentiale aufweisen.

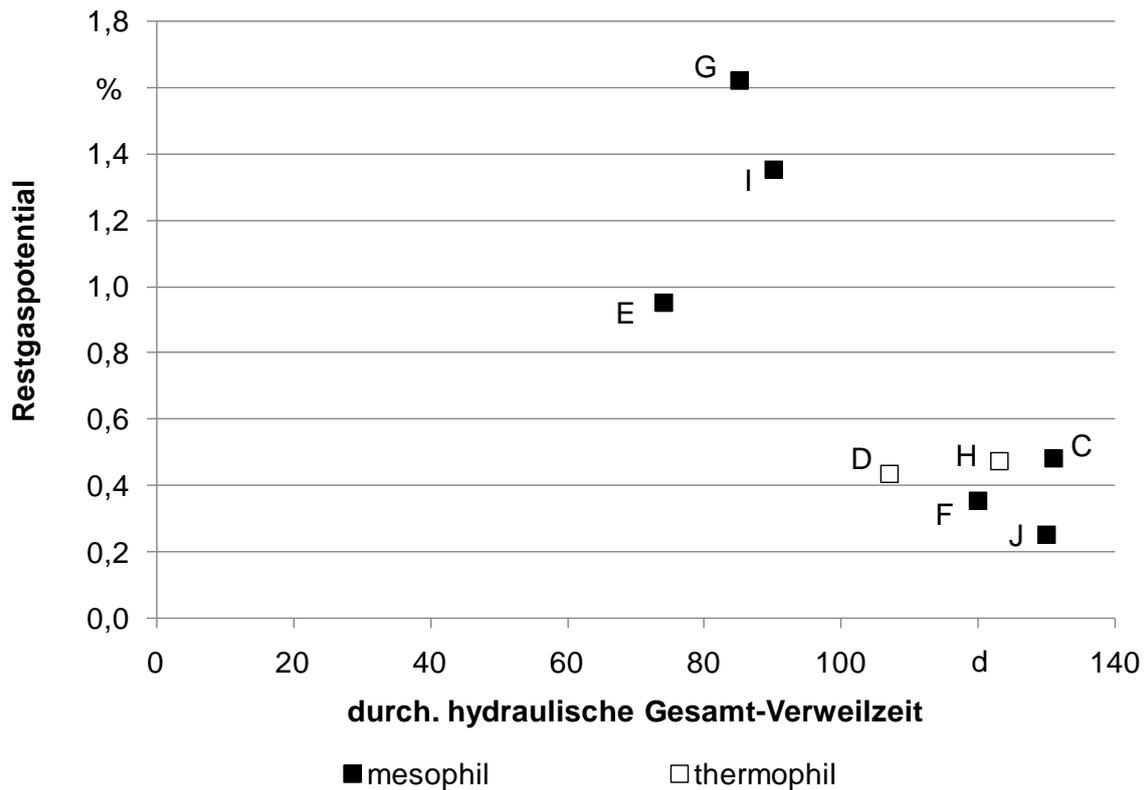


Abb. 50: Abhängigkeit des Restgaspotentials (22°C) von der hydraulischen Verweilzeit

Werden dieselben Messwerte bei Unterscheidung der Anzahl von Prozessstufen betrachtet, so liegen die Proben von dreistufigen Anlagenkonzepten mit sehr ähnlichen Verweilzeiten um 130 Tage allesamt auf niedrigem Niveau (vgl. Abb. 51). Die Werte für die Gesamtverweilzeit und das Restgaspotential der zweistufigen Anlagen weisen hingegen eine sehr große Bandbreite auf. Im Mittel lag für die zweistufigen BGA das Restgaspotential bei 0,9 %, gegenüber 0,4 % für die dreistufigen Anlagen. Unabhängig von der Anzahl der Prozessstufen ist zu erkennen, dass bei einer Gesamtverweilzeit von 100 Tagen oder mehr das Restgaspotential deutlich unter 1,0 % lag.

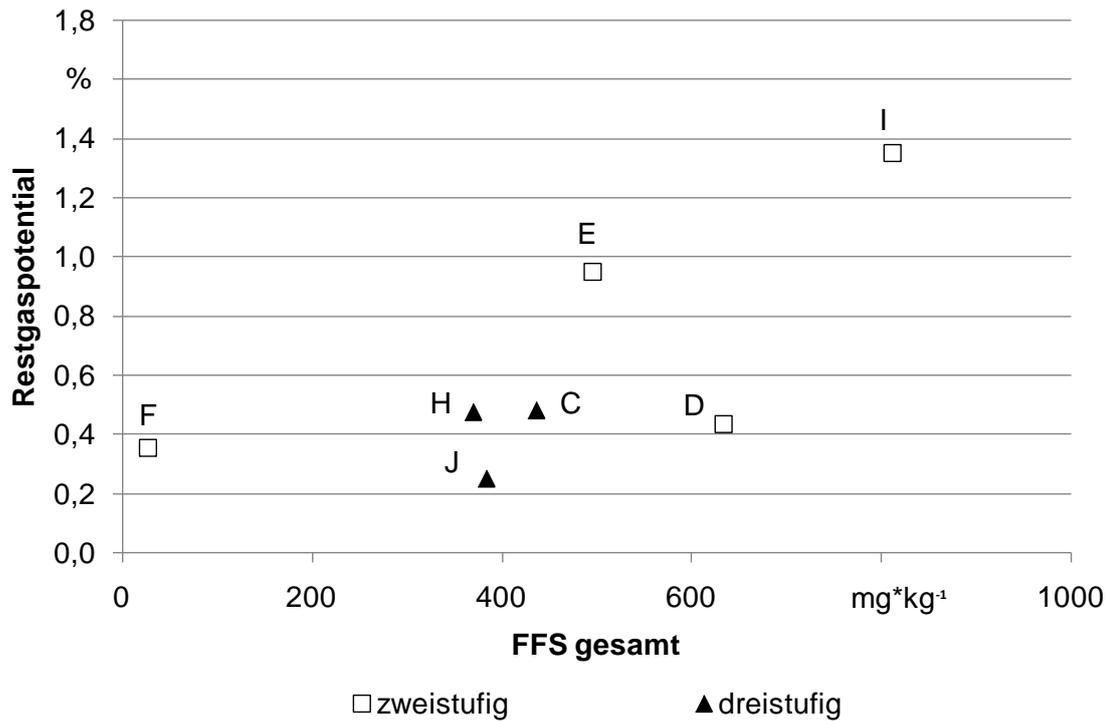


Abb. 51: Abhängigkeit des Restgaspotentials von der hydraulischen Verweilzeit und der Anzahl der Gärstufen

Als Indikator für die Aktivität des Abbaus und damit die potentielle Restgasbildung kann der Gehalt an flüchtigen Fettsäuren in der Probe des Gärgemisches betrachtet werden. Abb. 52 zeigt diesen Zusammenhang bei Unterscheidung des auf der Praxisanlage gefahrenen Temperaturniveaus auf. Für die Proben ist eine positive Korrelation des Restgaspotentials mit dem FFS-Gehalt erkennbar. Eine Ausnahme stellt lediglich Anlage G dar, bei deren Probe keine flüchtigen Fettsäuren nachgewiesen werden konnten. Dieselben Datensätze – jedoch mit Unterscheidung nach Anzahl der Prozessstufen – zeigt Abb. 52. Bei dieser Betrachtung liegen die Wertepaare für die dreistufigen Anlagen jeweils relativ dicht beieinander. Die höchsten FFS-Gehalte wurden in der Probe aus Anlage I gefunden, einem Anlagentyp mit Vorversäuerung.

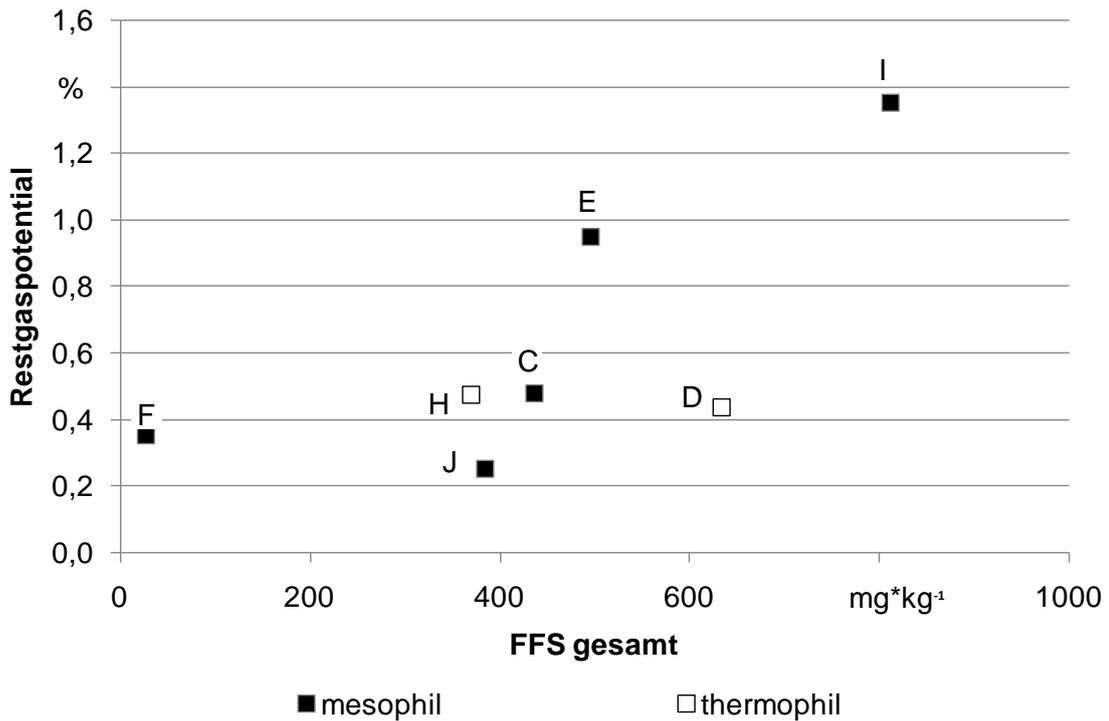


Abb. 52: Restgaspotential in Abhängigkeit vom FFS-Gehalt in der letzten Gärstufe -1

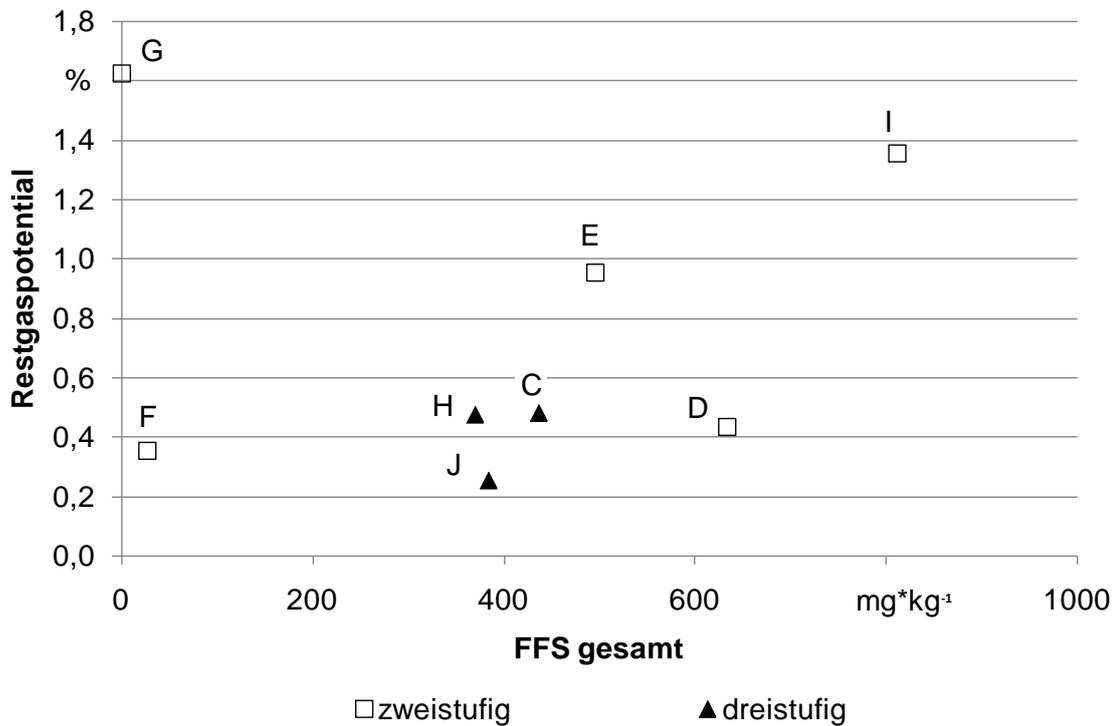


Abb. 53: Restgaspotential in Abhängigkeit vom FFS-Gehalt in der letzten Gärstufe -2

Die Ergebnisse von Gärtests zur Bestimmung des Restgaspotentials zeigen eine große Variabilität, die sich aus der Kombination unterschiedlicher Anlagenkonzepte mit vielfältigen Mischungen der Einsatzstoffe ergibt. Es kann festgehalten werden, dass bei einer Verweilzeit von unter 100 Tagen auch in mehrstufigen Anlagen mit einem erhöhten Rest-

gaspotential von $> 1\%$ gerechnet werden muss. Das Niveau des Restgaspotentials kann mit Einschränkungen grob anhand des FFS-Gehaltes in der Gärrestprobe beurteilt werden: Für ein Restgaspotential von $< 1\%$ sollte die Gesamt-FFS-Konzentration unter $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ liegen. Allerdings ist die bei offener Lagerung mögliche Ausgasung im Gärrestlager einer Biogasanlage und damit die potentielle Methanemission mit einem Restgaspotentialtest nicht exakt zu quantifizieren, da die Reaktionsbedingungen in der Praxis mit einem einfachen Batch-Ansatz im Labormaßstab nicht nachgebildet werden können.

5.3 Substratkonditionierung auf Pilotanlage B

5.3.1 Bildanalytische Vermessung

Die bildanalytische Vermessung von Partikeln wurde zur Prüfung des Effektes des Nasszerkleinerers angewandt (vgl. Kap.4.3.3). Die Anteile dreier Partikelfractionen einer Probe zeigt Abb. 54. Es wurden dabei die gleichen Größenklassen unterschieden wie auch bei den Messungen mit Siebkolonnen, um einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen. Die in Abb. 54 dargestellten Resultate basieren auf Vermessungen von jeweils 500 Partikeln vor und nach dem Durchlaufen der Schneidpumpe.

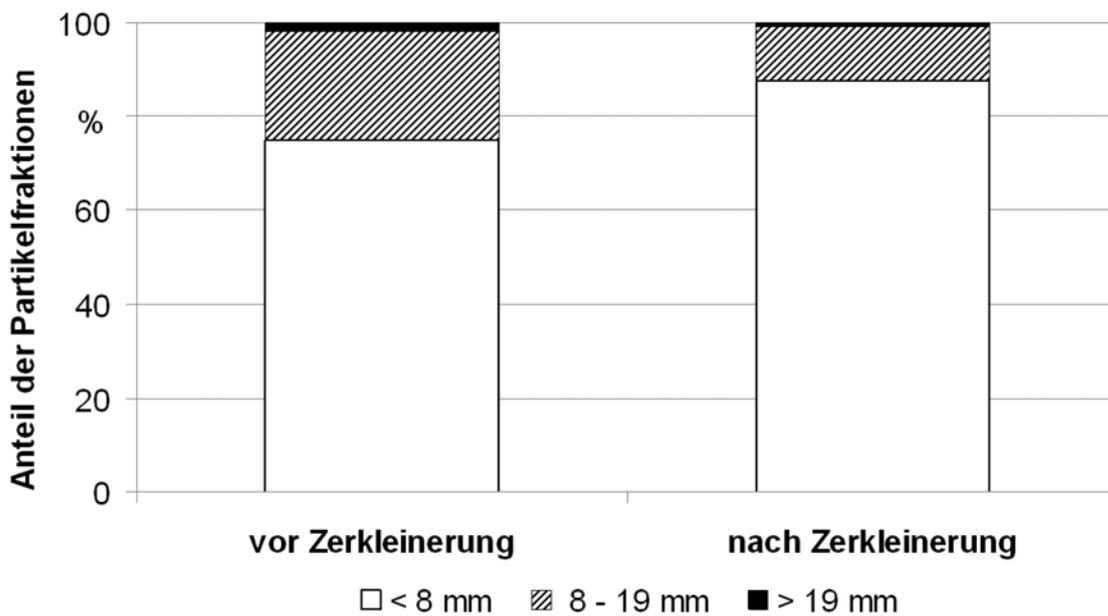


Abb. 54: Anteil der Partikelfractionen bei bildanalytischer Vermessung

Die durchschnittliche Partikellänge betrug vor der Zerkleinerung 6,5 mm, in der nach der Zerkleinerung entnommenen Fermenterprobe wurde ein Wert von 4,9 mm ermittelt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Verkürzung um 25 %. Betrachtet man die Messung eingeteilt nach Größenklassen, so zeigt sich, dass der Anteil der mittleren und der groben Fraktion durch die Schneidpumpe reduziert werden konnte.

Da die bildanalytische Vermessung von Partikelfractionen eine sehr zeitaufwändige Methode darstellt, wurde die Vermessung von Proben weiterer Probenahmeterminen ausschließlich mit Siebkolonnen durchgeführt.

5.3.2 Bestimmung von Partikelfractionen mit Hilfe von Siebkolonnen

Die Ermittlung der Partikelfractionen mit Hilfe von Siebkolonnen stellte sich im Versuchsverlauf im Vergleich zur bildanalytischen Vermessung als wesentlich praxistauglicher dar. Die Gewichtsanteile der Partikelfractionen vor und nach dem Durchfließen des Nasszerkleinerers zeigt Abb. 55.

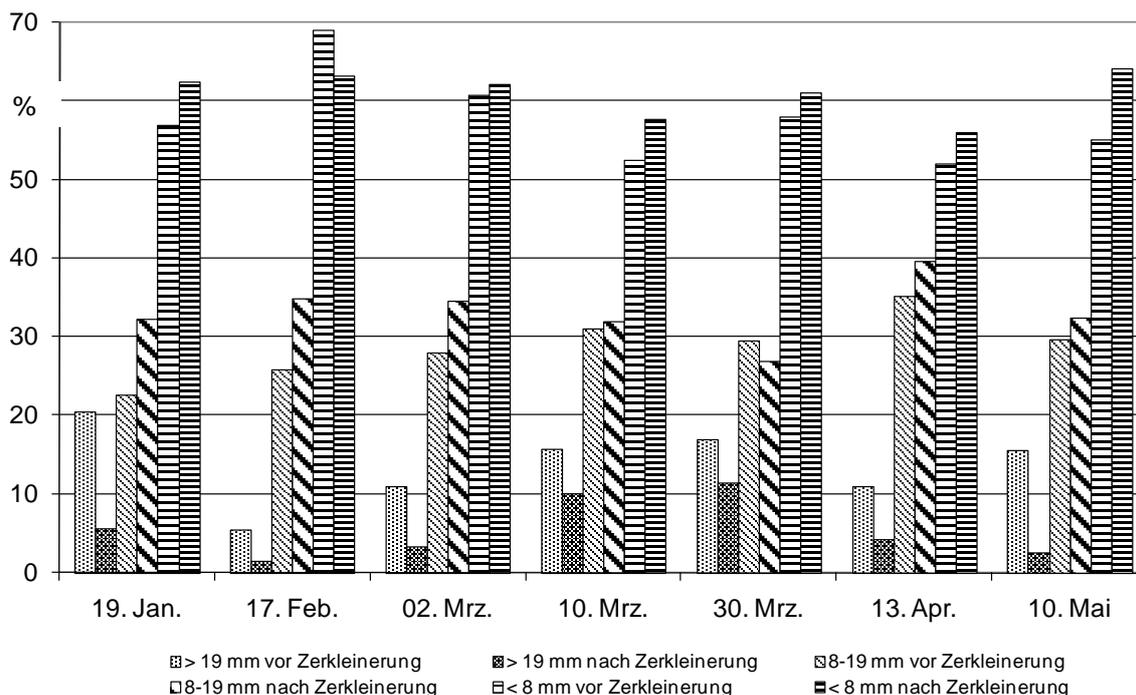


Abb. 55: Längenverteilung je Partikelfraktion vor und nach der Zerkleinerung im zeitlichen Verlauf

Erwartungsgemäß konnte festgestellt werden, dass der Anteil der Grobfraction (> 19 mm) der Anteil durch die Zerkleinerung abnimmt und zugleich der Anteil der mittleren Fraktion (8 – 19 mm) zunimmt. Für die Feinfraktion (< 8 mm) ist mit Ausnahme des Probenahmetermins am 17. Februar eine leichte Zunahme des Anteils nach dem Zerkleinerungsaggregat zu verzeichnen. Bei Betrachtung der Probenahmetermine im zeitlichen Verlauf ist keine Zunahme des Anteils der Feinfraktion zu erkennen. Ihr Anteil schwankt zwischen 56 und 64 %.

Sowohl mit Hilfe der bildanalytischen Vermessung als auch durch die Fraktionierung mit Siebkolonnen konnte ein Zerkleinerungseffekt nachgewiesen werden. Das Umpumpen von Fermenterinhalt war im weiteren Untersuchungszeitraum deutlich weniger störanfällig.

5.3.3 Einfluss der Konditionierung auf die Gasausbeute

Neben der Auswirkung auf die Anteile verschiedener Partikelfractionen wurde der Einfluss der Substratkonditionierung auf die Gasausbeute untersucht. Hierbei wurde in drei Versuchsreihen der Effekt des Nasszerkleinerers geprüft, eine weitere Versuchsreihe galt der Untersuchung der Einflussnahme durch das Verfahren zur elektrokinetischen Desintegration.

Abb. 56 zeigt den Verlauf der täglichen Methanproduktion der ersten Versuchsreihe (Probenahme am 18.1.2007). Nach zunächst identischem Verlauf wies die nach dem Nasszerkleinerer entnommene Probe bis etwa zur Mitte der Versuchslaufzeit höhere Methanproduktionsraten auf. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Gärversuches hingegen wurden bei der vor der Zerkleinerung entnommenen Probe höhere Raten gemessen

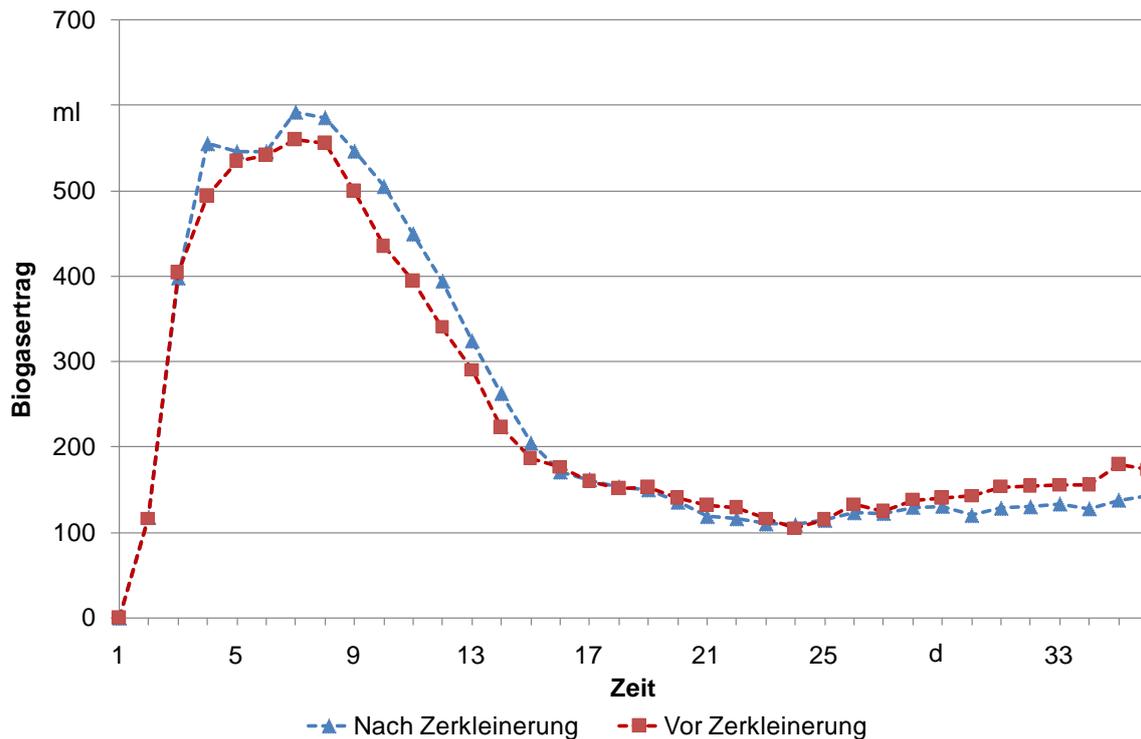


Abb. 56: Verlauf der Biogasproduktion (Probenahme am 18.01.2007)

Hier liegt die Erklärung nahe, dass die durch die Behandlung reduzierte durchschnittliche Partikellänge einen schnelleren bakteriellen Aufschluss des Materials ermöglichte. Die Gesamtmethanproduktion lag bei der zerkleinerten Probe am Versuchsende um 14 % höher als bei der vor dem Zerkleinerer entnommenen Probe.

Die Ergebnisse der weiteren Gärtests konnten die Zusammenhänge nicht bestätigen. Während der Methanertrag der dritten Versuchsreihe (Probenahme am 11.05.2007) mit 10 % ebenfalls gesteigert werden konnte, wies bei der zweiten Versuchsreihe die vor der Zerkleinerung entnommene Probe eine höhere Methanausbeute auf (vgl. Tab. 9).

Für die letzte Versuchsreihe wurden Proben vor und nach der Hochspannungselektrode entnommen. Nach 35 Tagen Gärzeit konnte in der Probe, die die elektrokinetische Desintegrationseinheit durchlaufen hatte, im Vergleich zur nicht behandelten Probe kein signifikant höherer Gasertrag ermittelt werden. Der durch die Behandlung mit Hochspannung erzielte Mehrertrag konnte statistisch nicht abgesichert werden. Um die Eignung dieses Verfahrens für die landwirtschaftliche Biogasproduktion zu belegen, bedarf es weiterer Untersuchungen.

Tab. 9: Ergebnisse der Gärversuche bei Probenahme vor bzw. nach der Konditionierung

Datum	Probe	Biogasmenge		Methanmenge		Methan
		[l/kg oTM]	rel. [%]	[l/kg oTM]	rel. [%]	[Vol.-%]
18.01.2007	vor Zerkleinerung	134	100	77	100	57
	nach Zerkleinerung	153	114	86	114	56
02.03.2007	vor Zerkleinerung	306	100	190	100	62
	nach Zerkleinerung	279	91	165	87	59
11.05.2007	vor Zerkleinerung	255	100	160	100	63
	nach Zerkleinerung	274	107	175	110	64
26.06.2007	vor Desintegration	159	100	94	100	59
	nach Desintegration	165	104	98	103	59

Für exakte Aussagen ist es sicherlich von Nöten, das Verfahren zur elektrokinetischen Desintegration zunächst unter standardisierten Bedingungen im Technikum- oder Labormaßstab zu prüfen. Auf Großanlagen können ermittelte Effekte nicht eindeutig einer bestimmten Maßnahme zugeordnet werden, da es z.B. unmöglich ist, über einen Zeitraum von mehreren Monaten die der Auswertung zugrunde liegenden Einsatzstoffe in exakt gleich bleibender Qualität vorzuhalten. Vergleicht man die absoluten Biogas- bzw. Methanerträge der verschiedenen Versuchsreihen, so zeigen sich erhebliche Schwankungen in Abhängigkeit vom Probenahmedatum.

5.3.4 Entwicklung des Betriebsverlaufes

Die Entwicklung des Anlagenbetriebes stellte sich in den Monaten nach Inbetriebnahme des Nasszerkleinerers positiv dar. Die bessere Pumpfähigkeit des Materials ermöglichte es Verstopfungen an den Pumpleitungen zu reduzieren und den externen Wärmetauscher sicher zu betreiben. So konnte die Temperatur in den Gärbehältern innerhalb weniger Wochen deutlich gesteigert werden und erreichte bereits im März 2007 die jeweiligen Sollwerte (vgl. Abb. 57). In den weiteren Monaten konnte das Temperaturniveau relativ stabil gehalten werden.

Mit dem höheren Temperaturniveau wurde die Abbauaktivität in den Gärbehältern und dementsprechend die elektrische Auslastung der Anlage gesteigert. Abb. 58 zeigt den Verlauf der Anlagenleistung sowie die Entwicklung der täglich zugeführten Substratmenge. Neben den Maßnahmen zur Substratkonditionierung setzte der Betreiber ab Ende Mai zusätzlich ein Spurenelementpräparat ein. Da der Beginn aller Maßnahmen innerhalb weniger Monate vollzogen wurde, können Auswirkungen auf Leistungsdaten der Anlage nicht einer einzelnen Maßnahme zugeordnet werden. Dies gilt in diesem Fall in erster Linie für die Zugabe von Spurenelementen und

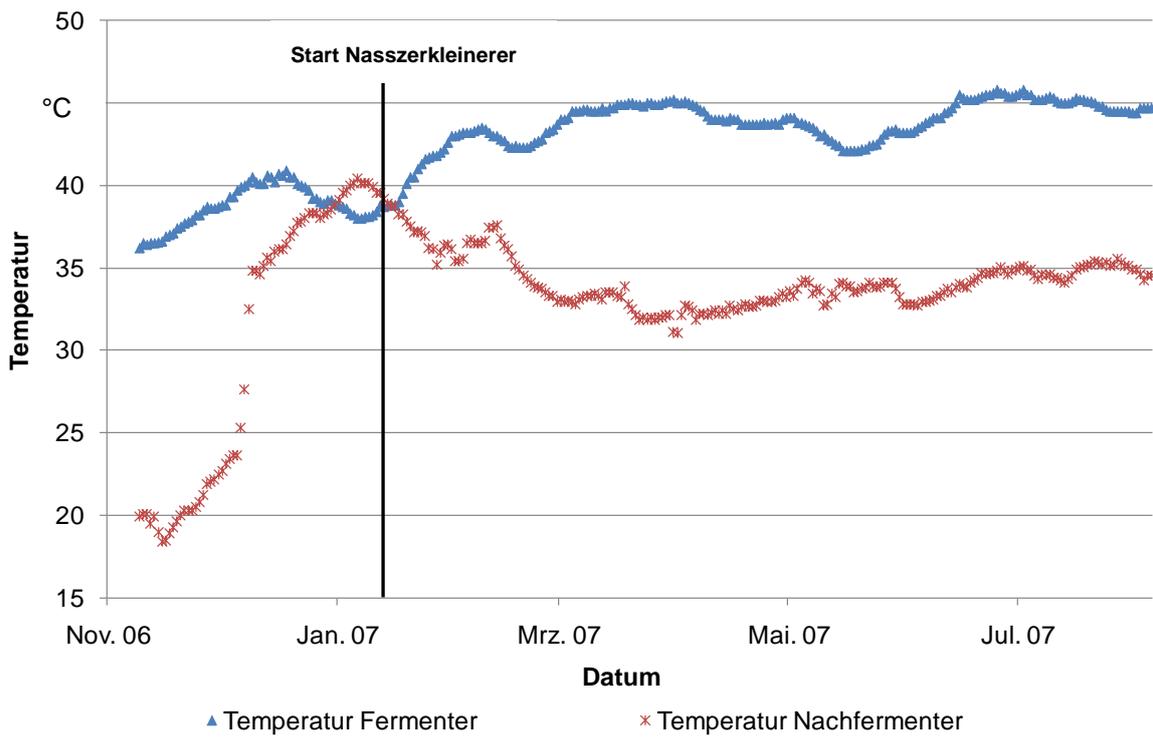


Abb. 57: Anlage B – Temperaturverlauf in Fermenter und Nachfermenter

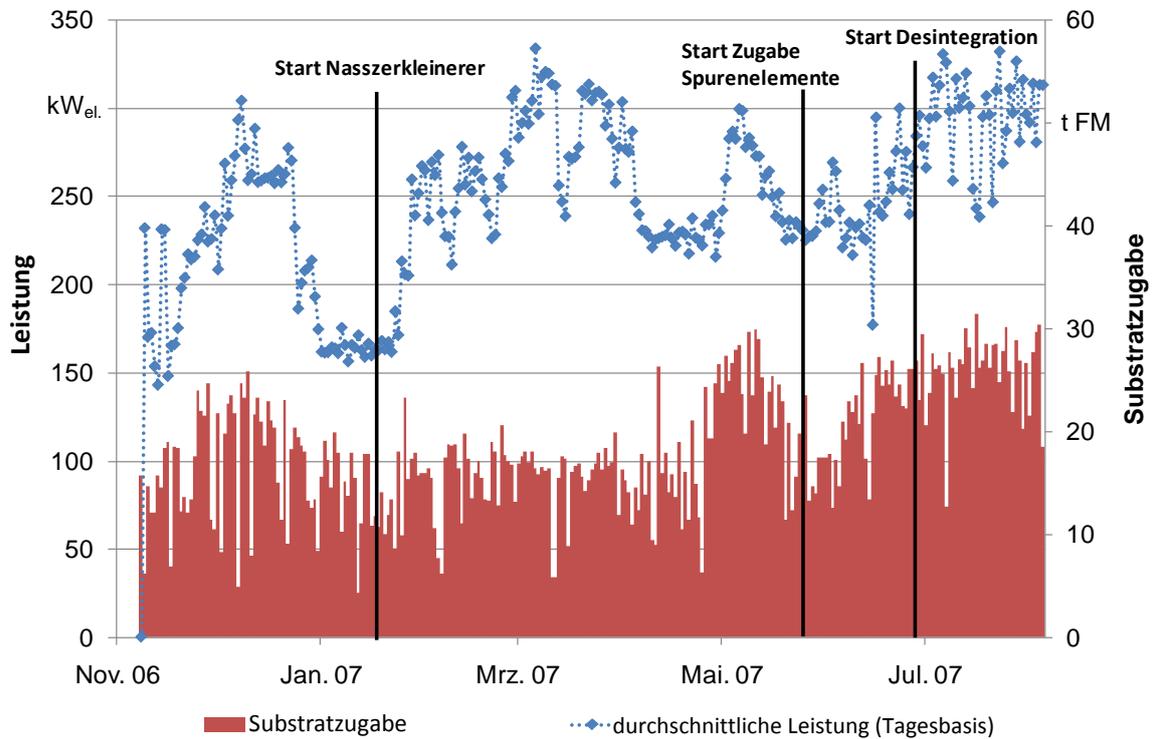


Abb. 58: Anlage B – Verlauf von Anlagenleistung und Substratzugabe bei unterschiedlichen Maßnahmen

die nur wenige Tage später stattfindende Inbetriebnahme des Verfahrens zur elektrokinetischen Desintegration. In jedem Fall kann fest gehalten werden, dass bei Anlage B das

Maßnahmenpaket zu einer erheblichen Verbesserung des Anlagenbetriebes führte. Dies gilt vor allem für den Stromeigenverbrauch der Pilotanlage. Abb. 59 zeigt den Anteil des Stromeigenverbrauches als Anteil an der Stromproduktion im zeitlichen Verlauf. Zu Beginn des Untersuchungszeitraums, die teils von kompletten Anlagenstillständen gezeichnet war, wies der Stromeigenverbrauch Werte auf, die einen mittelfristig wirtschaftlichen Betrieb der Anlage unmöglich gemacht hätten.

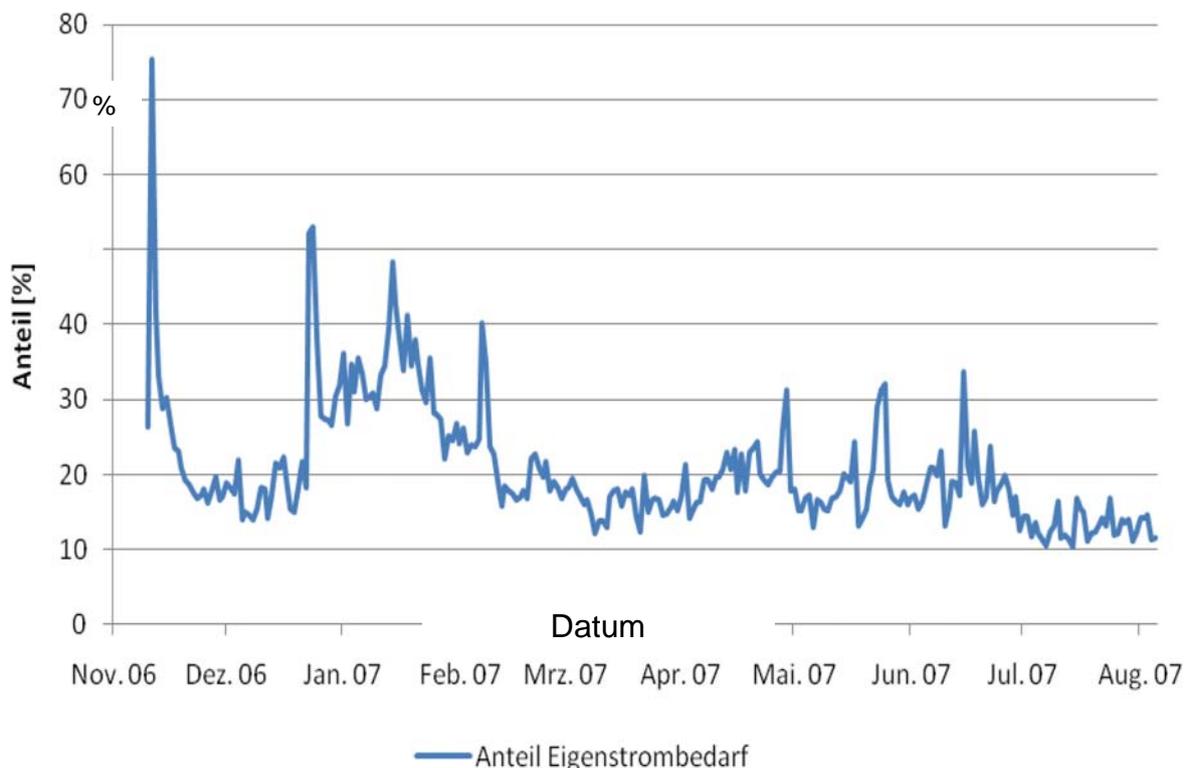


Abb. 59: Anlage B – Verlauf des Stromeigenverbrauches

Vor der Inbetriebnahme des Nasszerkleinerers betrug der Anteil zeitweise über 30 %. Wie der Verlauf zeigt, konnte dieser Wert – in erster Linie durch die Wirkung des Nasszerkleinerers – auf etwa 14 % gesenkt werden. Dieser im Vergleich zu anderen Konzepten immer noch sehr hohe Wert konnte im weiteren Betriebsverlauf nicht mehr wesentlich gesenkt werden.

5.4 Überwachung der Überdrucksicherungen

An den unter 4.5 erwähnten Anlagen wurden die Öffnungsereignisse der mit Datenloggern verbundenen Überdrucksicherungen erfasst. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Messtechnik auf den Biogasanlagen wurden zwischen 297 und 484 Tage ausgewertet. Dabei konnten erhebliche Unterschiede festgestellt werden. Auf zwei Anlagen wurde über den gesamten Erfassungszeitraum kein Auslösen der Überdrucksicherungen registriert. Für weitere zwei Anlagen konnten an bis zu sechs Tagen Überdruckereignisse erfasst werden. Dabei wurden über den Gesamtzeitraum bis ca. 150 Einzelimpulse aufgezeichnet. Beobachtungen in der Praxis zeigen, dass beim Ansprechen von Überdrucksicherungen – hier in erster Linie bei den Tassen-Überdrucksicherungen – das Ablassen des Gases stoßweise durch ständig wiederholtes Heben und Senken der Wassertasse geschieht, bis schließlich wieder das gewünschte Druckniveau erreicht ist. Für die eingesetzte Messtechnik bedeutet dies, dass das Ansprechen der Überdrucksicherung das Aufzeichnen einer großen Anzahl an Messimpulsen bewirken kann. Dieser Sachverhalt wird

bei näherer Betrachtung der Messungen bei Anlage B deutlich. Hier war eine im Vergleich zu den anderen Anlagen deutlich erhöhte Anzahl von Überdruckereignissen festzustellen. Dabei kam es an insgesamt 70 Tagen zum Auslösen der Überdrucksicherung (vgl. Tab. 10).

Tab. 10: Registrierte Überdruckereignisse an den untersuchten Praxisanlagen

Anlagen ID	B	E	E	G	G	H	I
Behälter	F	F	NG	F	NG	F	F
Zeitraum (d)	400	484	484	458	458	427	297
Tage mit Auslösung ÜDS	70	0	0	4	6	3	0
Auslöseimpulse gesamt	199.652	-	-	148	106	157	-
Maximum pro Tag	41.922	-	-	99	98	130	-

F: Fermenter, NG: Nachfermenter, ÜDS: Überdrucksicherung

Die durchschnittliche Anzahl an Einzelimpulsen lag bei über 2.800 pro Tag. Zunächst wurde vermutet, dass ein nur wenige Meter nach dem Fermenter in die Gasleitung eingebauter Gasmengenzähler den Druckaufbau im Fermenter bewirkte. Nach dem Ausbau des Zählers konnten jedoch weiterhin Überdruckereignisse festgestellt werden. Nach Aussagen des Anlagenbetreibers könnte dies durch Anlagerungen im Inneren der Gasleitungen verursacht worden sein. Dabei besteht einerseits die Möglichkeit von Schwefelanlagerungen. Weiterhin kommt ein Verschmutzen der Gasleitung mit Fermenterinhalt als mögliche Ursache in Frage. Bei zu hohem Fermenterfüllstand bzw. bei starken Rührbewegungen an der Oberfläche des Fermenterinhalt besteht die Möglichkeit, dass Material in die seitlich in die Fermenterwand installierte Gasleitung „schwappet“ und so den Druckanstieg im Fermenter verursacht. Im weiteren Anlagenbetrieb wurde die Gasleitung wiederholt mit Wasser gespült, um mögliche Verunreinigungen in der Leitung zu entfernen. Nach diesen Maßnahmen konnte – zumindest vorübergehend – das Biogas ohne Probleme abgeleitet werden.

Die Untersuchungen an den Pilot-Biogasanlagen lassen in dieser Form keine Aussage über die durch die Überdrucksicherungen entweichenden Gasmengen zu. Es stellt sich problematisch dar, anhand registrierter Überdruckereignisse die entwichene Menge an Biogas zu quantifizieren. Da die Untersuchungen an Praxisanlagen im sicherheitsrelevanten Ex-Bereich stattfinden, kann in diesem Fall keine Technik verwendet werden, die einen Druckabfall bedingt. In der Praxis kann es auch bei vergleichsweise ruhigem Betrieb wiederholt zu Überdruckereignissen kommen.

5.5 Einsatz von Gärhilfsstoffen

Eine über einen längeren Zeitraum konstante Vergärung erfordert neben einem möglichst stabilen Substrateintrag das Vorhandensein von verschiedenen Makro- und Mikronährstoffen in ausreichender Konzentration. Kommt Wirtschaftsdünger zum Einsatz, wird der Bedarf an Nährstoffen in der Regel gedeckt. Die Erfahrungen in der Praxis zeigen jedoch, dass es beim Verzicht auf Gülle und Mist im Laufe der Zeit zu einer Instabilität des Gärprozesses kommen kann, der auf den Mangel an Mikronährstoffen zurück zu führen ist.

Auf den untersuchten Anlagen kamen im Untersuchungszeitraum verschiedene Gärhilfsstoffe zum Einsatz. Dabei wurden die Betreiber aus verschiedenen Gründen zur Zugabe veranlasst. Tab. 11 gibt eine Übersicht über den Einsatz von Wirtschaftsdünger sowie die Verwendung von Gärhilfsstoffen zum Betrieb der Anlage. Bei Anlagen, die ganz bzw. weitestgehend auf den Einsatz von Wirtschaftsdünger verzichteten, wurden Spurenelement-Präparate in erster Linie zur Sicherung eines stabilen Abbauprozesses eingesetzt.

Tab. 11: Einsatz von Wirtschaftsdünger und Gärhilfsstoffen in den Anlagen

ID Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Einsatz von										
Wirtschaftsdünger	●	○	⊕	○	●	●	●	○	⊕	●
Spurenelementen	○	●	○	●	⊕	○	⊕	○	○	⊕
Enzympräparaten	○	○	○	⊕	⊕	○	○	○	○	○
Eisensalzen	○	○	○	●	●	○	⊕	⊕	●	○
sonstigen Gärhilfsstoffen	○	○	○	⊕	○	○	⊕	⊕	○	○

● kontinuierlicher Einsatz ⊕ zeitweiser Einsatz ○ kein Einsatz

Zusatzstoffe in Form von Eisensalzen wurden auf den Anlagen meist zur Reduzierung des Schwefelwasserstoff-Gehaltes verwendet. Dies stellt in der Praxis eine Alternative zur Entschwefelung durch Einblasen von Luft zur biologischen Entschwefelung dar.

Enzympräparate sollen die Abbaubarkeit von lignocellulosehaltigen Bestandteilen erhöhen. In Zeiten hoher Substratpreise versprechen sich Betreiber dadurch Einsparungen beim Substratverbrauch. Bei zwei der untersuchten Anlagen kamen zeitweise derartige Präparate zum Einsatz. Hier konnte allerdings kein eindeutiger Effekt auf die Biogasausbeute nachgewiesen werden. Generell ist festzuhalten, dass die Wirkung von Gärhilfsstoffen auf die Biogasausbeute bei Praxisanlagen schwer zu ermitteln ist. Bei Biogasanlagen im Großmaßstab ist es nicht möglich, den Anlagenbetrieb über einen längeren Zeitraum unter absolut konstanten Bedingungen sicher zu stellen.

In erster Linie haben hierbei Schwankungen in der Substratqualität Einfluss auf die theoretische Biogasausbeute. Nur bei Einsatz von Substraten mit gleich bleibendem Futterwert wäre bei exakter Mengenerfassung eine Abschätzung des Effektes von Gärhilfsstoffen auf die Biogasausbeute möglich. Da jedoch bei der Silagegewinnung in der Praxis stets Material unterschiedlicher Sorten, Standorte und Aufwuchsbedingungen eingelagert wird, können Schwankungen im Energiegehalt der Einsatzstoffe nicht verhindert werden. Abb. 60

zeigt die Gehalte an Rohfaser, Rohprotein und Rohfett von Maissilage über die Projektlaufzeit am Beispiel von Anlage G. Während es beim Rohfaseranteil tendenziell zu einer leichten Zunahme kam, war beim Gehalt an Rohprotein zum Ende des Untersuchungszeitraums hin eine Abnahme fest zu stellen. Bei Rohfett schwankten die Werte zwischen 1,5 und knapp 3 %. Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass auf den Anlagen meist ein breiter Substratmix zum Einsatz kommt und dementsprechend jedes Substrat gewissen Qualitätsschwankungen unterliegt, können konstante Rahmenbedingungen über einen längeren Zeitraum nicht realisiert werden. Für die Beurteilung der Wirkung von Gärhilfsstoffen müssten diese jedoch über mehrere durchschnittliche Verweilzeiten der betrachteten Anlage konstant sein.

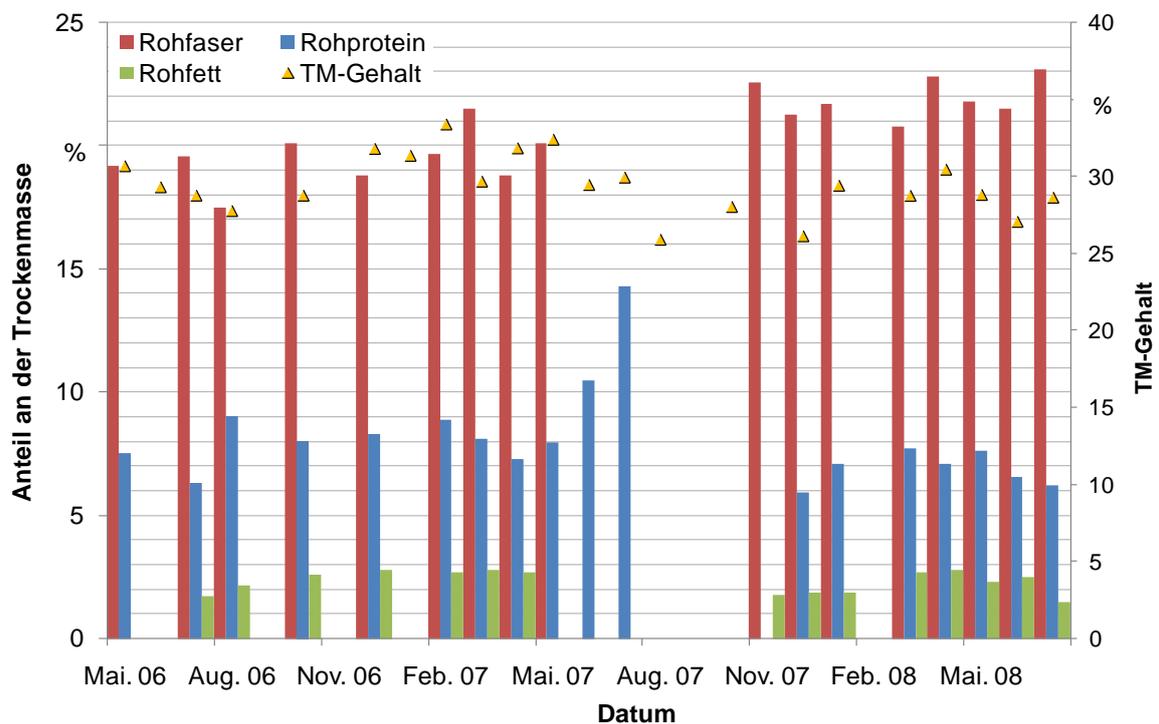


Abb. 60: Anlage G – Verlauf von Futterwert und TM-Gehalt bei Maissilage

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die untersuchten Teilbereiche der landwirtschaftlichen Biogasproduktion zeigen, dass teils noch erhebliche Potentiale zur Verbesserung des Anlagenbetriebs vorhanden sind. Entlang der Produktions- und Verwertungskette bieten sich für den Betreiber vielerlei Möglichkeiten der Einflussnahme.

Allem voran ist hier die Verwertung der produzierten Wärme zu nennen. Wie die Untersuchungen zeigten, bleiben bei einem Großteil der Biogasanlagen vor allem in der warmen Jahreszeit große Anteile der thermischen Energie ungenutzt. Hier sind in der Praxis für das Erreichen eines zufriedenstellenden Wärmeabsatzes oft noch große Anstrengungen zu leisten. Obwohl sich die Entwicklung eines geeigneten Wärmekonzeptes in vielen Fällen als schwierig herausstellt, stellt die Steigerung der Wärmeverwertung die einfachste Möglichkeit dar, die Gesamteffizienz einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zu steigern.

Augenblicklich stellt die produzierte Wärme bei Biogas meist noch kein knappes Gut dar. Werden künftig jedoch vermehrt Möglichkeiten zur Wärmenutzung erschlossen, wovon sicherlich auszugehen ist, kann sich diese Situation schnell ändern. Für diesen Fall kann sich die Senkung des Heizenergieverbrauchs der Biogasanlage für den Anlagenbetreiber durchaus positiv auswirken. Wie die Untersuchungen zeigen, gehen die Werte beim Eigenwärmebedarf weit auseinander. Positiv erweisen sich Konzepte, bei denen das Verhältnis von Oberfläche zu Nutzvolumen und damit die konvektiven Wärmeverluste gering sind.

Während im Bereich der Wärmeverwertung noch deutliche Reserven vorhanden sind, wurde in den meisten Fällen eine gute Ausnutzung der installierten elektrischen Leistung ermittelt. Es darf aber nicht vergessen werden, dass nur hohe Ausnutzungsgrade über die gesamte Projektlaufzeit die Rentabilität der Gesamtinvestition sicher stellen.

Sicherlich kann keine Anlage über eine solch lange Zeit ohne Rückschläge betrieben werden. Die Zuverlässigkeit technischer Komponenten kann sich hier entscheidend auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Bei den in diesem Projekt begleiteten Biogasanlagen handelte es sich um neuere Anlagenkonzepte, bei denen der Untersuchungszeitraum meist den ersten Betriebsjahren entsprach. Demzufolge sollte die technische Zuverlässigkeit der Anlagenkomponenten in den ersten Betriebsjahren noch kein Problem sein. Doch wie die Ergebnisse zeigen, stellten sich bei verschiedenen Anlagen bereits im Untersuchungszeitraum Defizite in der verbauten Technik heraus. Aufgrund hoher Durchsatzmengen führten vor allem Eintrags- und Fördertechnik sowie teils auch Rührwerke zu Störungen. Hier ist es für den Betreiber ratsam, die Dimensionierung bzw. die Leistung der Aggregate bereits in der Planungsphase der vorgesehenen Substratzusammensetzung anzupassen. Wie die Ergebnisse zeigen, stellen besonders langfaserige Substrate erhöhte Ansprüche an die Anlagentechnik.

Zur Beurteilung verschiedener Anlagenkonzeptionen sind Informationen über den Anlagenbetrieb über einen möglichst großen Zeitraum zu erheben. Aus diesem Grund wird die wissenschaftliche Begleitung bei einigen der untersuchten zehn Biogasanlagen fortgesetzt. Dies soll die Möglichkeit schaffen, Aussagen hinsichtlich der Eignung ganzer Konzepte oder einzelner Komponenten weiter zu präzisieren. Um die Bandbreite verfahrenstechnisch bewerteter Praxis-Biogasanlagen auszuweiten, werden am Institut für Landtechnik und Tierhaltung in einem neuen Monitoring-Programm überdies fünf weitere aktuelle Anlagenkonzepte über mehrere Jahre begleitet.

7 Veröffentlichungen

KLARL, J.: Verfahrenstechnische Optimierung einer Biogasanlage mit Vergärung hoher Anteile an Kleegrassilage. Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, 76 Seiten, 2007, Freising

LEHNER, A., M. EFFENBERGER UND A. GRONAUER: Effekte einer Substratkonditionierung bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 16. Symposium Bioenergie, 22./23. November, OTTI, Regensburg, ISBN 978-3-934681-62-0, S. 185-190, 2007, Kloster Banz, Bad Staffelstein

PIRLING, S. Untersuchungen zur potenziellen Methanausgasung aus den Gärresten landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Diplomarbeit, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 80 Seiten, 2008, Freising

MÄNDLE, F.: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Effizienz des C-Abbaus in Biogasanlagen, Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, Abteilung Triesdorf, Fakultät für Landwirtschaft, 78 Seiten, 2009, Triesdorf

Literaturverzeichnis

- ABWASSERVERBAND WIENER NEUSTADT-SÜD: Glossar, <http://www.awvwns.at/text/glossar.htm#Desintegration>, abgerufen am 10. 08. 2007
- KLARL, J.: Verfahrenstechnische Optimierung einer Biogasanlage mit Vergärung hoher Anteile an Kleegrassilage. Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft, Studiengang Landwirtschaft, 2007, Freising
- EFFENBERGER, M., M. LEBUHN und A. GRONAUER: Fermentermanagement – Stabiler Prozess bei NawaRo-Anlagen. Tagungsband zur 16. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V.: „Biogas im Wandel“, S. 99 – 105, 31.01.-02.02.07, Leipzig
- FNR (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, Institut für Energietechnik und Umwelt GmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V, 2006, Gülzow
- GRONAUER A. & F. KAISER: Evaluierung der Methanproduktivität nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen als Grundlage für ein EDV-gestütztes Expertensystem für Beratung und Praxis. Abschlussbericht, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, 2007, Freising-Weihenstephan
- KALTSCHMITT, M., & H. HARTMANN: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag, 2001, Berlin, Heidelberg, New York
- KOPFLOW, O., M. BARJENBRUCH und V. HEINZ: Vorbehandlung von Überschussschlamm durch Elektroporation, Chemie Ingenieur Technik, Nr. 3, S. 76, 2004
- PIRLING, S.: Untersuchungen zur potenziellen Methanausgasung aus den Gärresten landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Diplomarbeit, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 80 Seiten, 2008, Freising
- KTBL (Hrsg.): Schwachstellen an Biogasanlagen erkennen und verstehen, KTBL-Heft 84, 2009, Darmstadt
- WINTERBERG, R.: Technische und ökonomische Voraussetzungen eines rentablen Anlagenbetriebes, Ingenieure für Umwelttechnik und regenerative Energien GbR,

http://isa-st23.sachsen-anhalt.de/lhg/konaro/vortraege/gemveranst_010305/fg2_winterberg.pdf, abgerufen am 15.08.2007, 2005, Magdeburg

LECHNER, J.: Untersuchung der Effizienz durch die Vorbehandlung organischen Materials für die Beschickung von Biogasanlagen mittels eines Universalzerkleinerers; Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, 2005, Freising

ZIMMERMANN, U.: The Effect of High Intensity Electric Field Pulses on Eucaryotic Cell Membranes, CRC Press, 1996, Boca Raton

Anhang

Anhang 1: Formular zur Ermittlung verfahrenstechnischer Defizite durch bayerische Landtechnikberater

Allgemeine Angaben zur Anlage		
Anlagenbauer: Baujahr: Fermenter: Typ(en) + Inhalt: 1): 2): ...): BHKW: Motorentyp(en): 1): 2): ...): installierte el. Leistung (kW): 1): 2): ...): produzierte Strommenge pro Jahr (kWh/Jahr):		
Nennung / Beschreibung des / der betreffenden Aggregate(s) in folgenden Bereichen	auftretende Defizite, Probleme und Störungen	Vorschlag zur Behebung der zuvor aufgeführten Defizite
Substratlagerung und -management		
Einbringungstechnik pumpfähiger und fester Substrate		
Fermenter		
Pumpensystem(e)		
Heizsystem(e)		
Rühr- bzw. Durchmischungssys-		
Endlager / Nachgärer		
Gasspeicher		
Gasmengenerfassung*		
Gasqualitätserfassung*		
BHKW*		
Anlagensteuerung		
Gärrestausbringung		
sonstiges		
Kommentar allgemein		

° liegender oder stehender Fermenter, Baumaterial, * bitte Hersteller (Firma) angeben.