



**Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
Prof.-Dürrwaechter-Platz 2, 85586 Poing-Grub**

Abschlussbericht zum Vorhaben

Einrichtung und Erprobung des Intervallbetriebs der Biogasanlage an der Versuchsstation Grub (N/14/13)



Projektbericht



Projektförderung: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten

Förderkennzeichen: N14/13

Projektlaufzeit: 01.09.2014 – 31.12.2017

Projektleiter: Dr. Fabian Lichti

Projektbearbeiter: Tappen Simon (seit 01.08.2016)
Schober Josef (bis 31.07.2016)

Berichtsdatum: 28.02.2018

1	Einleitung.....	9
1.1	Hintergrundinformationen.....	9
1.2	Zielstellung.....	9
2	Projektkoordination: Aufbau und Organisation	11
2.1	Aufbau der Liegenschaft Grub.....	11
2.1.1	Energiekonzept Liegenschaft Grub.....	11
2.1.2	Überblick der bereitgestellten Substrate zur Energieproduktion	12
2.1.3	Flexibilisierung: Zuckerrübe als Flexsubstrat.....	13
2.2	Aufbau der Biogasanlage und installierte Messtechnik	18
2.2.1	Technische Übersicht der Hof-Forschungsbiogasanlage	18
2.2.2	Substrateinsatz und Gasproduktion.....	19
2.2.3	Einsatz der BHKW-Technik zur Energieproduktion	20
2.3	Beteiligung und Verantwortung.....	24
3	Projektkoordination: Methodisches Vorgehen	25
3.1	Zeitlicher Ablauf des Projekts.....	25
3.2	Planung der Stromproduktion im Intervallbetrieb	25
3.2.1	Energieplanung und Einbindung des Spitzenlast-BHKW	25
3.3	Steuerung und Automatisierung der Anlage	29
3.4	Erhebung und Auswertung der Messwerte	30
4	Ergebnisse.....	31
4.1	Bewertung eingesetzter Substrate	31
4.2	Die „Biologische Flexibilisierung“	32
4.2.1	Fermenterbiologie	33
4.2.2	Einsatz von Rührwerken in Abhängigkeit von der Trockensubstanz	34
4.2.3	Schaumproblematik im Fermenter	38
4.2.4	Gasproduktion	40
4.2.5	Gasspeicher	42
4.2.6	Zuckerrübenmus und -schnittel als Flex-Substrat: Bewertung und Ausführung.....	43
4.3	Die technische Flexibilisierung.....	46
4.3.1	BHKW-Eigenschaften und –Anforderungen	46
4.3.2	Darstellung des elektrischen Wirkungsgrades	47

4.3.3	Störungen im Betrieb	50
4.4	Auswertung einer dezentralen Stromversorgung im Intervallbetrieb	52
4.4.1	Auswertung verschiedener Fahrweisen.....	52
4.4.2	Steigerung der Stromproduktion in den einzelnen Kalenderwochen.....	55
4.4.3	Netzbezogene Stromeinspeisung durch Überproduktion.....	56
4.4.4	Gasverfügbarkeit und –überproduktion	57
4.5	Thermische Energie	59
4.6	Kennzahlen im Grundlast- und Intervallbetrieb.....	65
4.6.1	Substrateinsatz und –eigenschaften.....	65
4.6.2	Kennzahlen Zuckerrübe – Verarbeitung und Lagereigenschaften.....	66
4.6.3	Gesamtproduktion und Eigenverbrauch.....	69
4.6.4	Der Anteil des Eigenverbrauchs an der Stromerzeugung der Versuchs- Biogasanlage in Grub	70
5	Zusammenfassung einer umgesetzten flexiblen, dezentralen Stromerzeugung	74
5.1	Biologische Flexibilisierung	74
5.2	Aufbereitung und Einsatz von Zuckerrüben	74
5.3	Technische Flexibilisierung	75
5.4	Das Konzept „Intervallbetrieb in Grub“	75
6	Ausblick: Flex-Biogas 4.0 – Neue alternative Zukunftsmodelle für die Biogasbranche	77
6.1	Ausbau der Wärmenutzung der Versuchs-Biogasanlage in Grub.....	77
6.2	Automatisierung des Biogasprozesses	78
6.3	Weitere Projekte.....	80
7	Literatur.....	81
8	Anhang	82

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1: Photovoltaikanlage in Grub.....	10
Abbildung 2: Skizze zur Auskleidung des Güllebehälters (Quelle: CENOTEC)	14
Abbildung 3: Prozessablauf von der Zuckerrübenernte bis hin zum Schnitzeln ganzer Zuckerrüben bzw. Pumpen des Zuckerrübenbreis in den Fermenter	14
Abbildung 4: Zuckerrübeneinlagerung mit Hilfe eines Kompostschredders	15
Abbildung 5: Zuckerrübenschaufel "Alligator" der Fa. Schmihing.....	16
Abbildung 6: Befestigung der Zuckerrübenpumpe am Kran	17
Abbildung 7: Gebrochenes Kardangelenk der Zuckerrübenpumpe	17
Abbildung 8: Entwurf des Exzonenplans zur Zeiten der Planung der Biogasanlage in Grub (Quelle Novatech)	18
Abbildung 9: Das Grundlast-BHKW ausgestattet mit einem Gas-Otto-Motor mit 75 kW elektrisch installierter Leistung	21
Abbildung 10: Spitzenlast-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 203 kW	22
Abbildung 11: Plan zur Einbindung des Spitzenlast-BHKW's nach Hersteller (Quelle Novatech)	23
Abbildung 12: Beteiligte Gruppen sowie Verantwortliche der Biogasanlage Grub	24
Abbildung 13: Wochenverlauf des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub dargestellt als Mittel-, Minimal- und Maximalwerte	26
Abbildung 14: Auszug der erstellten Formatvorlage (Wochenprognose) zur Berechnung der benötigten Substrate und Gasverbräuche.....	28
Abbildung 15: Auszug der erstellten Formatvorlage (Wochenprognose) zur Berechnung der Motoreinstellung im Intervallbetrieb	28
Abbildung 16: Automatische Steuerung der Zuckerrübenpumpe in Zeitintervallen	29
Abbildung 17: Automatische Steuerung des Feststoffdosierers in Zeitintervallen und Gewichtssteuerung der Feststoffe	29
Abbildung 18: Zeitsteuerung und Lasteneinstellung beider BHKW-Motoren im Wochenzyklus	30
Abbildung 19: Gegenüberstellung des Substrateinsatzes nach Masse (links) und Energiegehalt (rechts) im gesamten Intervallbetrieb (*Sonstiges enthält Reststoffe wie CCM, Zuckerrübenschnitzel, Zuckerhirse, weiteren Mist und Rapsölfilterkuchen)	31
Abbildung 20: Parameter gezogener Proben aus dem Gärgemisch zur Bewertung der Fermenterbiologie während des Intervallbetriebs	33
Abbildung 21: Tagesverbräuche einzelner Rührwerke im Fermenter im Zusammenhang mit ermitteltem Trockensubstanzgehalt im Gärgemisch	35
Abbildung 22: Darstellung Leistungsaufnahmen und Laufzeiten des Stab- und Tauchrührwerks im Fermenter während des Grundlast- (GLB) und Intervallbetriebs (IB) (Wiederholung eines gewählten Tages)	36
Abbildung 23: Erkennbare Schaumschicht im Fermenter	38

Abbildung 24: Aufbau und Einsatz einer automatisierten Rapsölpumpe zur kontrollierten Bekämpfung der Schaumbildung	40
Abbildung 25: Tagesabläufe der Fütterung und Gasproduktionsrate ausgewählter Wochentage (Montag, Donnerstag, Freitag und Sonntag)	41
Abbildung 26: Tagesablauf (Dienstag) der Fütterung sowie Einfluss der Zuckerrübenpumpe auf die Gasproduktionsrate	42
Abbildung 27: Schematische Darstellung des Gärrestlagers und Gasspeichers	43
Abbildung 28: Einfluss der Zuckerrübenfütterung auf die Gasproduktion	44
Abbildung 29: Halbestündige Gaserträge (gelbe Balken) sowie Beschickungsraten von Zuckerrübenschnitzel (rot) und Maissilage (grün)	45
Abbildung 30: Ergebnisse des el. Wirkungsgrades und Emissionen unter verschiedener Last einer Messung (24.05.2015, 16.254 Bh) des 75 kW Gas-Otto-Motors	47
Abbildung 31: Ergebnisse des el. Wirkungsgrades und Emissionen unter verschiedener Last einer Messung (16.10.17, 5.677 Bh) des 203 kW Gas-Otto-Motors	47
Abbildung 32: Gemessener elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Lasteneinstellung	48
Abbildung 33: %-Anteile angefallener Störungen auf der Biogasanlage während des Lastregelbetriebs (23.11.16-22.11.17)	50
Abbildung 34: Anzahl angefallener Störungen auf der Biogasanlage während des Lastregelbetriebs (23.11.16-22.11.17)	50
Abbildung 35: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 50, 2016)	53
Abbildung 36: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 12, 2017)	53
Abbildung 37: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 26, 2017)	54
Abbildung 38: In Wochen gestaffelte Stromverbräuche und –produktionen sowie Darstellung der Bemessungsleistung der Biogasanlage und Deckungsgrad (des Stromverbrauchs Grub) durch die Energieerzeuger	55
Abbildung 39: Anteil der Überproduktion im Verhältnis zur Stromproduktion in der Liegenschaft Grub	57
Abbildung 40: Abgefackeltes Biogas auf der Biogasanlage während des Intervallbetriebs	58
Abbildung 41: Ablagerungen/Verschmutzung am Magnetventil vor der Gasfackel	59
Abbildung 42: Prozentuale Verteilung der genutzten Wärme (Fermenter, Nahwärme) und der ungenutzten Wärme (Notkühler)	61

Abbildung 43: Verlauf des wöchentlichen Wärmebedarfs des Fermenter sowie Fernwärme.....	62
Abbildung 44: Die auf der Meteorologie-Station in Grub (LfL) Vorort gemessenen sowie errechneten Monatsmittel der Umgebungstemperatur.....	63
Abbildung 45: Wöchentliche Wärmeverbräuche sowie Gesamtproduktion der Biogas-anlage	64
Abbildung 46: Mittelwerte aller Wochentage inklusive Minima und Maxima (als Fehlerindikatoren dargestellt) der verfügbaren Wärme seit der optimierten Fahrweise (Kalenderwoche 22 – 47, Halbjahresmessung)	65
Abbildung 47: Biogasausbeute verschiedener entnommener Proben aus der Lagerung von Zuckerrübenmus (Ergebnisse aus Tabelle 15).....	69
Abbildung 48: Jahreswerte für Strom und Wärmeproduktion sowie Eigenbedarf während des Grundlast- und Intervallbetriebs.....	70
Abbildung 49: Zusammensetzung der der %-Anteile (Leistung) der Nebenaggregate der Biogasanlage während des Grundlastbetriebs 2015.....	71
Abbildung 50: Zusammensetzung der %-Anteile (Leistung) der Nebenaggregate der Biogasanlage während des Intervall-Betriebs 2017	72
Abbildung 51: Theoretische Abhandlung möglicher Einstellungsintervalle beider BHKW-Aggregate in Abhängigkeit des Stromverbrauchs der Liegenschaft in 10 kW-Schritten.....	78
Abbildung 52: Prozentuale Verteilung des Leistungsbereichs der Stromnachfrage zwischen August 2015 und Juli 2016 zur Bewertung ferngesteuerten Lasteneinstellungen der BHKW-Aggregate.....	79
Abbildung 53: Beispiel 1 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen Produktion und Eigenverbräuche von BHKW 1 (Grundlast-Betrieb).....	82
Abbildung 55: Beispiel 2 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen allen Eigenverbräuchen (Strom) der Biogasanlage im Grundlast-Betrieb	82
Abbildung 56: Beispiel 3 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen den eingesetzten Substraten und produzierter Gasmenge auf der Biogasanlage im Grundlast-Betrieb	83

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Prognostizierter Substratbedarf für den Last-Regelbetrieb zu Projektbeginn	12
Tabelle 2: Zeitschiene der Biogasanlage Grub im Grundlast- und Intervallbetrieb.....	25
Tabelle 3: Motoreneinstellung und jährlicher Energiebedarf der Liegenschaft Grub, angegeben in elektrischer Leistung	27
Tabelle 4: Trockensubstanz-Bestimmung von Gülle im Zeitraum 2017	32
Tabelle 5: Einmalige Trockensubstanz-Bestimmung von Filterkuchen aus Rapsöl.....	32
Tabelle 6: Parameter gezogener Fermenterproben in Zahlen zur Bewertung der Biologie inklusive organischer Trockensubstanz und Ammoniumstickstoff.....	34
Tabelle 7: Beschreibung der Rührwerkseinsätze zweier ausgewählter Arbeitstage	35
Tabelle 8: Günstige Spurenelementkonzentrationen verschiedener Literaturquellen (FNR, 2013)	37
Tabelle 9: Ermittelte Konzentrationen der Spurenelemente aus dem Gärgemisch der Fermenterprobe (GLB = Grundlastbetrieb, IB = Intervallbetrieb).....	37
Tabelle 10: Ermittelte Parameter aller getätigten Lasteneinstellungen beider BHKW-Motoren von dem 27.09.17 bis 25.10.17	49
Tabelle 11: Gegenüberstellung der Volllast mit 60 % Teillast des Spitzenlast-BHKW zur Erschließung eines thermischen Leistungsprofils.....	60
Tabelle 12: Jährlicher Substrateinsatz während des Grundlast- und Intervallbetriebs in Grub.....	66
Tabelle 13: Qualitätsbestimmung der Zuckerrüben aus der Zuckerrübenernte und -wäsche 2016	67
Tabelle 14: Qualitätsbestimmung der Zuckerrüben aus der Zuckerrübenernte und -wäsche 2017	67
Tabelle 15: Eigenschaften von Zuckerrübenmus während der Lagerdauer	68

1 Einleitung

1.1 Hintergrundinformationen

Der flexiblen Bereitstellung von Energie aus dezentralen Quellen kommt im Rahmen der Umsetzung der Energiewende langfristig eine zunehmende Bedeutung zu. Biogas als speicherbarer regenerativer Energieträger kann die fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie Windkraft und Photovoltaik ausgleichen und somit einen erheblichen Anteil zur Netzstabilität beitragen. Mit der Einführung der Direktvermarktung und der damit verbundenen Flexibilitätsprämie wurden bereits im EEG 2012 Anreize für den Überbau von Biogasanlagen (höhere Leistung, größere Speicherkapazität) geschaffen.

Nachdem mittlerweile viele Anlagenbetreiber mit der Direktvermarktung ihres Stroms und der Bereitstellung von Regenergie vertraut sind, sollen die Anlagen in Zukunft auf eine bedarfsgerechte Stromerzeugung umgerüstet werden. Da es bisher kaum praktische Erfahrungen zur flexiblen Stromerzeugung gibt, sollen im Rahmen dieses Forschungsprojekts sowohl technische wie auch biologische Fragen geklärt werden.

1.2 Zielstellung

Durch die Inbetriebnahme der Hof-Forschungsbiogasanlage im Juni 2014 mit einer zunächst installierten elektrischen Leistung von 75 kW auf dem Versuchsbetrieb in Grub wurde die Grundlage geschaffen, an der Bayerischen Landesanstalt eine eigene Biogasanlage für Demonstrations- und Forschungszwecke zu betreiben. Diese Biogasanlage wurde gegenüber der gängigen Praxis mit einer umfangreichen messtechnischen Ausstattung versehen, um ein intensives wissenschaftliches Arbeiten zu ermöglichen. Durch die Integration eines ausreichend dimensionierten Tragluftspeichers (ca. 1.292 m³) mit exakter Gasfüllstandmessung und der großzügigen Auslegung der gasführenden Leitungen wurde die Möglichkeit einer bedarfsgerechten Stromerzeugung in Grub bereits vorgesehen.

Ziel soll die Nachempfindung einer durch dörflichen Charakter geprägten Energiewirtschaft mit einem möglichst hohen Anteil an eigenproduzierter elektrischer und thermischer Energie sein. Durch den ausschließlich innerbetrieblich schwankenden Strombedarf der Liegenschaft Grub bietet sich die Möglichkeit, durch Kombination aus grundlastfähigen und spitzenlastregelbaren Energieträgern, ein autarkes Netz zur Energieversorgung aufzubauen. In Kombination mit einem intelligenten Lastmanagement soll Biogas als speicherbarer Energieträger die fluktuierende Photovoltaik (derzeit sind 55 kW_p installiert) ausgleichen und somit einen Großteil der Residuallast in Grub liefern.



Abbildung 1: Photovoltaikanlage in Grub

Da es bisher kaum praktische Erfahrungen zur flexiblen Stromerzeugung durch Biogas gibt, sollen im Rahmen dieses Forschungsprojektes Aussagen zu den Auswirkungen des Intervallbetriebs auf folgende Verfahrensbereiche getroffen werden:

- **Technische Flexibilisierung:** Start-/Stopp-Verhalten, el. Wirkungsgrad/Verbrauch, Emissionen, Wartungsbedarf, Verfügbarkeit, Störungen der Anlage
- **Biologische Flexibilisierung:** Dynamische Prozessfütterung und Gasproduktion durch Variation der Fütterung (z. B. (dis-)kontinuierliche Fütterung, Stoßbelastung)
- **Prozesswärmebedarf und –bereitstellung:** Prozesstemperatur und Prozessstabilität, Wärmepufferung, wärmeorientierte Prozessführung
- **Erhöhung der Bemessungsleistung bzw. Leistungssteigerung** der Biogasanlage: Intensivierung des Intervallbetriebs zum Testen der möglichen Kapazitäten der bedarfsgerechten, flexiblen Stromerzeugung

Durch die Erhöhung der Auslastung der Anlage erfolgt auch eine höhere Deckungsquote des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub. Daraus resultiert das Ziel, einen möglichst hohen Deckungsgrad zu erreichen und dementsprechend den Eigenstromverbrauch der Liegenschaft soweit wie möglich zu reduzieren.

2 Projektkoordination: Aufbau und Organisation

Das Institut für Landtechnik und Tierhaltung ist eines der neun Institute der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Die wissenschaftliche Betreuung der Hof-Forschungsbiogasanlage in Grub wird durch die Arbeitsgruppe Wirtschaftsdüngermanagement und Biogastechnologie (ILT 2a) übernommen.

2.1 Aufbau der Liegenschaft Grub

Die Liegenschaft Grub, welche auch zu einem großen Teil aus dem landwirtschaftlichem Betrieb besteht, umfasst einige größere Energieverbraucher darunter bspw. mehrere Viehställe, einen Melkroboter, ein Schlachthaus sowie eine Kühlung. Hinzu kommen weitere Verbraucher wie Bürogebäude, eine Lehrschau, eine Kantine, ein Internat sowie ein Labor. Insgesamt wurde ein Durchschnittswert des Gesamtverbrauchs (abzüglich Photovoltaik) von ca. 174 kW elektrischer Leistung ermittelt, welcher an Arbeitstagen enorm schwankt (siehe auch Punkt 3.2.1). Der schwankende Energiebedarf der Liegenschaft Grub spiegelt im Wesentlichen eine dörfliche Struktur wider und stellt daher hohe Anforderungen an eine bedarfsgerechte Stromversorgung, die im Folgenden vorgestellt wird.

2.1.1 Energiekonzept Liegenschaft Grub

Die Firma COPLAN AG aus München hat bereits im Mai 2012 ein Energiekonzept über die Wärmebereitstellung in Grub erstellt. Dieses Energiekonzept beschäftigt sich hauptsächlich mit der Bestandsaufnahme der vorhandenen Wärmeerzeuger und des Wärmeverbrauchs, der Ermittlung der vorhandenen Inputmenge und der Lastschwerpunkte sowie der Fördermöglichkeiten. Ziel war es, ein Energiekonzept zur künftigen Wärmeversorgung vor dem Hintergrund des gewünschten Einsatzes regenerativer Energie in Form einer Hackschnitzelheizung sowie einer Biogasanlage zu erstellen.

Die Biogasanlage wurde von Anfang an für den flexiblen Strombetrieb gebaut. Mitte 2014 ging die Biogasanlage mit einem 75 kW Gas-Otto-Motor in Betrieb, welcher bis Ende 2016 einen Teil des Grundbedarfs der Liegenschaft Grub deckte. Um den schwankenden Strombedarf weitestgehend decken zu können, wurde durch dieses Projekt die Biogasanlage um einen 203 kW großen Gas-Otto-Motor erweitert, welcher für die bedarfsorientierte Stromproduktion, dem Intervallbetrieb, zuständig ist. Zusätzlich dazu ist eine Photovoltaik Anlage mit bis zu 55 kW_p auf den Dächern der Milchviehställe installiert.

Um das Spitzenlast-BHKW hinsichtlich seiner installierten elektrischen Leistung richtig auszulegen, wurden zudem die Stromverbräuche und Lastgangskurven der letzten drei Jahre ausgewertet und analysiert. Die Daten hierfür wurden vom Bayernwerk in viertelstündigen Messungen erhoben und zur Verfügung gestellt. Um die Jahre 2013 bis 2015 miteinander vergleichen zu können, mussten für die letzten beiden Jahre die Eigenstromnutzung aus Photovoltaik und Biogas mitberücksichtigt werden. Der aktuelle Strombezug kann einem Online Kundenportal entnommen werden. Mit Hilfe dieses Kundenportals kann der aktuelle Strombezug bis zum Vortag ausgewertet und der Fahrplan des Spitzenlast-BHKW's überprüft und angepasst werden.

Um zukünftige Lastspitzen zu vermeiden, wurden zudem noch die Energieverbräuche der einzelnen Gebäude für das Jahr 2015 erhoben und die Ergebnisse aus den Messungen zum Stromverbrauch herangezogen. Somit sollen die Lastspitzen lokalisiert und durch intelligentes Lastmanagement vermieden werden.

2.1.2 Überblick der bereitgestellten Substrate zur Energieproduktion

Die Liegenschaft Grub umfasst 55 Kälber, 60 Jungrinder, 130 Milchkühe, 140 Mastbullen, 1750 Schweine, 200 Mutterschafe sowie 170 Lämmer (LfL, 2017). Im Allgemeinen reichen ca. 165 Milchkühe (bei 8000 l Milchleistung/a) aus, um eine 75 kW Gülle-Biogasanlage (80 % Gülle/20 % Mais) zu versorgen (FNR, 2017). In Grub kam die Gülle hauptsächlich aus dem Milchviehbestand. Dieser lag in Grub im Jahr 2017 bei 125 GVE. Ein kleiner Anteil der genutzten Gülle kam zusätzlich aus dem Mastbullenstall bei rund 93 GVE (0,5 bis 1,5 Jahre). Aus diesen Stallungen wurde auch der Mist mit eingesetzt, um die Biogasanlage mit Energie zu versorgen. Da es sich um eine Gülle/Mist-basierte Biogasanlage handelt, wird ein Erhalt des Substratmixes von 80 % Gülle und Mist angestrebt. Während die Gülle über die Pumpsysteme und der Vorgrube in den Fermenter gepumpt wird, wird der Mist über die Schnecke eines Feststoffdosierers mit eingeführt.

Tabelle 1: Prognostizierter Substratbedarf für den Last-Regelbetrieb zu Projektbeginn

Substrat	Menge t/a oder m³/a
Mastrinder-/Milchviehgülle	3.600 m³/a
Rindermist	650 t/a
Zuckerrübenbrei	400 t/a
Maissilage	1.900 t/a
CCM Maiskornsilage	292 t/a

Rein rechnerisch ergibt sich eine durchschnittliche Verweilzeit im Fermenter von 57 Tagen und eine Raumbelastung von rund 3,3 kg oTS m⁻³ Fermentervolumen und Tag. Um die geforderten sechs Monate Lagerdauer einhalten zu können, wird eine Endlagerkapazität von knapp 2.900 m³ benötigt. Im Folgenden werden die in der Biogasanlage eingesetzten Substrate aufgelistet und kurz beschrieben.

- **Silomais:** In Grub wird der Silomais sowohl für die Fütterung in der Tierhaltung als auch für die Biogasanlage eingesetzt. Ist ein Teil des Futters hinsichtlich der Futterqualität ungenügend, so wird dieser vorwiegend für den Einsatz in der Biogasanlage herangezogen. Hauptsächlich wurde jedoch Maissilage guter Qualität eingesetzt und unter den energiereichen Substraten am meisten verwendet.
- **Grassilage:** In der Biogasanlage wird mitunter Grassilage eingesetzt. Es fallen jährlich nur geringe Mengen an, da nur Futterreste, welche für die Fütterung nicht mehr eingesetzt werden können, für die Biogasanlage verwendet werden.
- **Weitere Substrate:** Neben den Hauptsubstraten werden mitunter andere Substrate eingesetzt, welche nur temporär im geringen Maße eingesetzt werden. Diese Substrate werden im Folgenden aufgelistet:
 - **CCM:** Während des Projekts wurde CCM (Corn-Cob-Mix) in geringen Mengen mit verwendet. Es handelt sich dabei um Futtermittelreste, welche nicht mehr für die Fütterung verwendet wurden.
 - **Rapsölfilterkuchen:** Durch einen benachbarten Betrieb wurde an die LfL eine kleine Menge an Filterkuchen aus der Rapsölproduktion (ca. zwölf Tonnen) geliefert, da kein sonstiger Abnehmer gefunden wurde. Dieser Reststoff eignete sich auch zum „eindämmen“ der Schaumbildung.

- Futterreste (Zuckerhirse): Auf der Liegenschaft werden bei der Fütterung verschiedene Futtermittel verwendet. Anfallende, nicht genutzte Reste werden auch in der Biogasanlage eingesetzt.
- Zuckerrübe: Im Zuge der Flexibilisierung wird jährlich Zuckerrübe als energiereiches Substrat eingesetzt. Diese wird als Schnitzel oder als Brei bereitgestellt. Hierfür werden fünf bis sechs Hektar an Zuckerrüben angepflanzt, geerntet, gewaschen/entsteint und aufbereitet. Es wird erwartet, dass v.a. der Zuckerrübenbrei aufgrund seiner großen Oberfläche und dem hohen Zuckergehalt von den Mikroorganismen schnell abgebaut wird und folglich eine relativ schnelle Gasproduktion mit sich führt („Flex-Substrat“).

2.1.3 Flexibilisierung: Zuckerrübe als Flexsubstrat

Im Gegensatz zur Biogasanlage in Grub verfügen viele Bestandsanlagen nicht über einen ausreichend dimensionierten Gasspeicher, um wirklich bedarfsgerecht Strom erzeugen zu können. Unter diesem Gesichtspunkt soll geprüft werden, inwieweit durch gezielte Zufuhr von schnell verfügbaren Substraten die Gasproduktion an die Stromerzeugung angepasst werden kann. Aufgrund ihres hohen Zuckergehaltes und der sehr hohen Hektarerträge scheint die Zuckerrübe besonders geeignet, um den Silomais als Standardsubstrat zu ersetzen. Aus diesem Grund wurden seit 2015 wieder rund sechs Hektar Rüben angebaut.

Die Lagerung der Zuckerrübe soll sowohl als ganze Rüben wie auch als Zuckerrübenbrei erfolgen. Die Konservierung als Brei erfolgt in einem der zehn bestehenden Güllebehälter. Aufgrund des niedrigen pH-Wertes musste der Behälter mit einer innenliegenden Folie ausgekleidet und vor Korrosion geschützt werden. Die Beschickung soll direkt über eine Exzentrerschneckenpumpe in den Fermenter erfolgen. Die hierfür benötigten Substratleitungen wurden bei den Erdarbeiten bereits doppelwandig verlegt.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme im Grundlastbetrieb sowie der Umsetzung des Intervallbetriebs ist geplant, durch die Zugabe von schnell verfügbarem Zuckerrübenbrei einen weiteren Beitrag zur flexiblen Stromproduktion zu leisten. Dabei sollen Auswirkungen auf den Gärprozess durch substratbedingte Stoßbelastungen, Abbaugeschwindigkeit sowie die dynamische Prozessfütterung näher betrachtet werden.

Neben den gärobiologischen Untersuchungen sollen aber auch die verschiedenen Reinigungs- und Zerkleinerungstechniken auf Praxistauglichkeit verglichen und der aerobe Stoffabbau an der Oberfläche ermittelt werden.

Für die Auskleidung des Güllebehälters wurden Anfang 2015 mehrere Folienhersteller eingeladen, um ihre Materialien und Verfahrenskonzepte vor Ort zu präsentieren. Nach Prüfung der verschiedenen Angebote hat man sich letztendlich für das Konzept der Firma CENOTEC entschieden. Hierbei handelt es sich um einen mehrschichtigen Aufbau mit Leckerkennungsmatte und einer speziell beschichteten Membran. Diese wird bereits im Werk bahnenweise miteinander verschweißt und im Ganzen vor Ort eingebaut. Die Befestigung erfolgt über eine Klemmschiene an der Behälterkrone. Zusätzlich wurde der Behälter mit einer innenliegenden Leckageerkennung und einer Füllstandsüberwachung ausgestattet. Somit kann der Behälter in Zukunft auch zur Lagerung von Gärresten genutzt werden. Die Auskleidung des Behälters erfolgte im August 2015.

stellung am Zuckerrübensvollernter verkleinert, was wiederum zur Folge hatte, dass eine Vielzahl von Steinen im Erntegut landete. Die Rüben wurden zunächst am Feldrand auf Miete gelagert.

Der Transport vom Feld zur Anlage erfolgte mit mehreren Traktorgespanssen, wobei die Erntemenge über die Fuhrwerkswaage genau erfasst wurde. Dort wurden die Zuckerrüben in einem leeren Fahrsilo zwischengelagert. Die Aufbereitung und Einlagerung der Zuckerrüben erfolgte über einen Kompostschredder. Die Befüllung des Schredders erfolgte mit zwei Radladern. Eine zusätzliche Reinigung und Entsteinen der Zuckerrüben wurde nicht durchgeführt.

2015 wurden von den sechs Hektar rund 356 Tonnen Rüben geerntet. In 2016 und 2017 waren die Erträge höher. So vielen 2016 bis zu rund 500 Tonnen Zuckerrüben an, während 2017 bis zu 481 Tonnen anfielen. Ende 2016 und '17 wurde der Musbehälter um ca. 450 Tonnen aufgefüllt. Die restlichen Zuckerrüben wurden zwischengelagert und als Zuckerrübenschnitzel frisch bzw. direkt in den Feststoffdosierer eingebracht.



Abbildung 4: Zuckerrübeneinlagerung mit Hilfe eines Kompostschredders

Die Beschickung des Feststoffdosierers mit den Ganzrüben erfolgte durch eine Schnitzler/Zuckerrübenschaufel. Die Schaufel mit einem Fassungsvermögen von 1,2 t wurde von der Firma Schmihing zur Verfügung gestellt und musste lediglich an die Aufnahme des Radladers angepasst werden. Ende des Jahres 2015 wurde mit der ersten Fütterung der Zuckerrübe begonnen. Aufgrund des hohen Steinanteils kam es aber immer wieder zu Störungen bei der Zerkleinerung. Um einen Steineintrag in den Feststoffdosierer zu vermeiden, wurden die Rüben zunächst auf der Siloplatte geschnitzelt, entsteint und anschließend in den Vertikalmischer dosiert. In den Folgejahren wurden die Rüben zusätzlich mit einer speziellen Wäsche entsteint. Trotz des Entsteinens kam es jedoch immer wieder zu restlichen Steinbesätzen, welche z.T. händisch aus dem Schnitzler entfernt werden musste. Bis dato konnte noch kein Verfahren im süddeutschen Raum identifiziert werden, welche

zuverlässig den hohen Steinanteil der Zuckerrüben in der Münchner Schotterebene abtrennt.



Abbildung 5: Zuckerrübenschaukel "Alligator" der Fa. Schmieling

Der neben den direkt eingefütterten, geschnitzelten Rüben eingelagerte Zuckerrübenbrei wird mit einer Eintauchpumpe der Firma Wangen Pumpen AG direkt in den Fermenter gepumpt. Bei der KL50 T 101 handelt es sich um eine modifizierte Exzentrerschneckenpumpe, wobei der Zulauf mit vorgeschaltetem Homogenisierer im Zuckerrübenbrei eingetaucht ist. Je nach Feststoffanteil und Pumplänge kann eine Fördermenge von bis zu $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden.

Da die Pumpe an die Füllstandshöhe des Substrats angepasst werden muss, wurde für die Befestigung ein Säulenschwenkkran gewählt. Dieser ist mit einem Handkettenzug und einem Haspelfahrwerk versehen, so dass die Pumpe leicht umgesetzt und für Wartungsarbeiten herausgenommen werden kann. Eine Stabilisierung der Pumpe und des flexiblen Substratschlauches erfolgt über eine am Behälterrand befestigte frei bewegliche U-Schiene. Die Entnahme und Befüllung des Zuckerrübenbreis für Forschungszwecke kann über eine Schnellkupplung am Übergang zur Substratleitung im Boden erfolgen.



Abbildung 6: Befestigung der Zuckerrübenpumpe am Kran

Anfang April wurde mit der Fütterung des Zuckerrübenbreis begonnen. Durch das Eintauchen der Pumpe in den Zuckerrübenbrei wurde eine starke Schichtung des Substrats sichtbar. Während an der Oberfläche eine verkrustete sehr dickflüssige und breiförmige Schicht zu finden ist, tritt nach ca. 30 cm eine dünnflüssige stark zuckerhaltige Flüssigkeit in den Vordergrund. Nachdem gleich beim ersten Pumpversuch das Kardangelenk der Pumpe durch einen festsitzenden Stein zwischen Rotor und Stator gebrochen ist, wird das Substrat nun unterhalb der festen Phase entnommen.



Abbildung 7: Gebrochenes Kardangelenk der Zuckerrübenpumpe

Es wurde ein geringer Restbesatz an Steinen über den Schredder in den Behälter gemust. Trotzdem traten seit dem Einsatz der Zuckerrübenwäsche ab 2016 bei der Pumpe nur kleinere Reparaturen auf. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Steine in den Fermenter gelangen, wo Sie dann am Grund absinken. Zwar sollten durch die Zuckerrübenwäsche

die meisten Steine entfernt werden, jedoch können nicht alle Steine abgereinigt werden. Der abzutrennende Steinbesatz ist hierbei größtenteils standortabhängig.

2.2 Aufbau der Biogasanlage und installierte Messtechnik

Im Folgenden werden die Einzelkomponenten der Biogasanlage vorgestellt und im Detail beschrieben.

2.2.1 Technische Übersicht der Hof-Forschungsbiogasanlage

Anfangs lief die Biogasanlage in Form einer Hofbiogasanlage mit einem 75 kW Gas-Otto-Motor im Grundlastbetrieb. Im Folgenden werden die Gebäude und Aggregate der Biogasanlage während des Grundlastbetriebs aufgezählt:

- Feststoffdosierer: 16 m³ Fassungsvermögen (anfangs 8 m³) und vertikaler Schnecke
- Vorgrube: 113 m³
- Fermenter: 1.206 m³
- Zwischengebäude: Pumpe, Probenentnahmestelle
- Gärrestlager: 2.714 m³
- Gasspeicher als ¼ Kugel: ca. 1.292 m³
- Zwei Betonbehälter mit PP Schutzvlies ausgekleidet: jeweils ca. 450 m³
 - o Lagerung Zuckerrübenmus
 - o offenes Gärrestlager
- Verrohrungen und Kondensatschacht (passive Kühlung)
- BHKW-Gebäude mit 75 kW Gas-Otto-Motor und Steuerungsraum/Büro
- Fernwärmeleitung für drei Bürogebäude

Aus Abbildung 8 kann die Lage und Größe einzelner Komponenten der Biogasanlage entnommen werden:

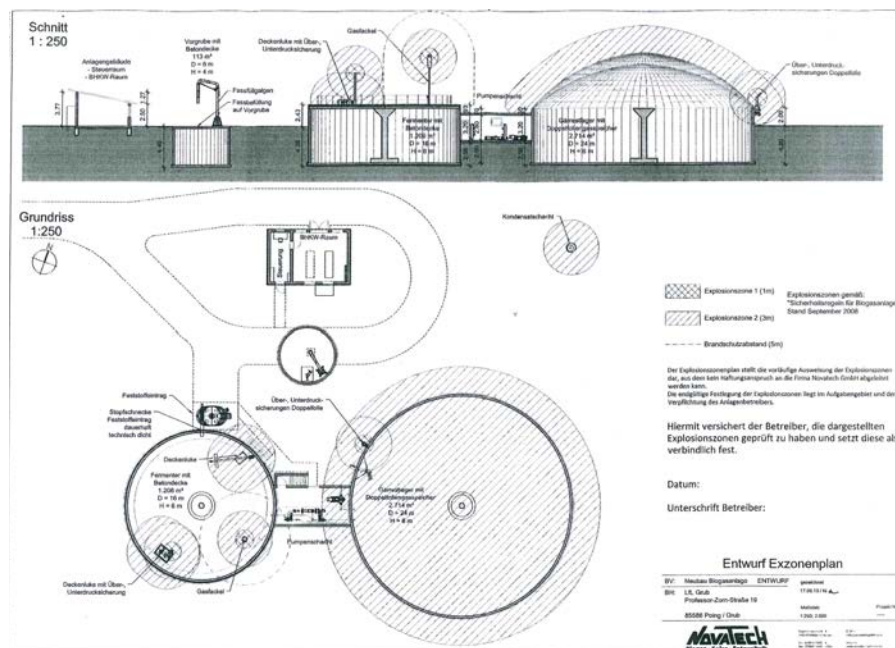
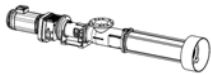


Abbildung 8: Entwurf des Exzonenplans zur Zeiten der Planung der Biogasanlage in Grub (Quelle Novatech)

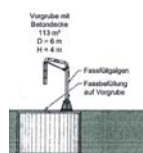
Im Laufe des Jahres 2016 wurde die Anlage auf den Intervallbetrieb umgestellt und dafür folgende Änderungen oder Erweiterungen an der Biogasanlage vorgenommen:

- Spitzenlast-BHKW: 203 kW Gas-Otto-Motor
- Aktives Kühlungssystem
- Aktivkohlefilter
- Neuinstallation eines Feststoffdosierers mit 16 m³ Fassungsvermögen

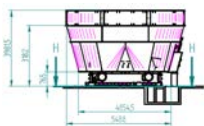
2.2.2 Substrateinsatz und Gasproduktion



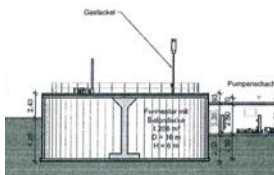
Die Zuckerrübe stellt eines der Hauptsubstrate zur Energiebereitstellung im Intervallbetrieb dar. Durch das Waschen und Zerkleinern/Musen der Zuckerrüben, werden diese in Form eines Breis in einem ausgekleideten Güllebehälter gelagert und dann über eine Pumpe direkt in die Biogasanlage gepumpt. Ein kleiner Anteil der geernteten Zuckerrüben werden in einem Silo zwischengelagert und anschließend über eine Zuckerrübenschaukel in den Feststoffdosierer eingeschnitzelt (siehe dazu auch Kapitel 2.1.3). Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der guten Automatisierbarkeit des pumpfähigen Breis.



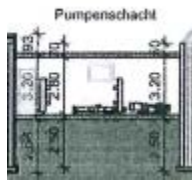
Die Versorgung der Biogasanlage durch Rindergülle erfolgt über die Vorgrube. Über ein Versorgungsnetzwerk bestehend aus zwei Exzentrerschneckenpumpen wird die Gülle von den Ställen in die Vorgrube gepumpt. Vor der Beschickung der Anlage muss die Vorgrube ausreichend mit Gülle befüllt sein, damit die zentrale Exzentrerschneckenpumpe den Fermenter mit Gülle versorgen kann. Über der Vorgrube befindet sich der Galgen, der zur Befüllung der Güllefässer zur Ausbringung der Gärreste verwendet wird.



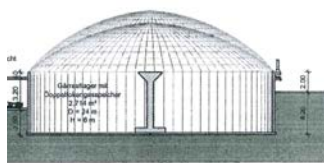
Der Feststoffdosierer ist das zentrale Element zur Fütterung der Biogasanlage. Während des Grundlastbetriebs (75 kW installierte el. Leistung) wurde ein Feststoffdosierer mit zwei Schneidwerken (Vertikalmischern) sowie mit 8 m³ Fassungsvermögen eingesetzt. Durch die Erweiterung im Intervallbetrieb wurde dieser durch einen größeren Feststoffdosierer ersetzt, welcher mit zwei Vertikalmischern und insgesamt 16 m³ Fassungsvermögen ausgestattet ist. Nach dem Vermischen der Substrate fördert anschließend eine Förderschnecke die Substratmischung in den Fermenter.



Mit einem Fassungsvermögen von 1.257 m³ produziert der Fermenter während des Intervallbetriebs zwischen 2.000 und 3.000 m³ Biogas täglich. Ein Stabrührwerk sorgt hierbei für die Reduzierung der Deckschicht und der Durchmischung des oberen Teils des Gärgemisches (Durchmischungsintervalle 30 min./1 Std.), während ein Tauchrührwerk für die Gesamtdurchmischung des Gärgemisches zuständig ist (Durchmischungsintervall alle 3 Std.). Drei Temperaturfühler messen den Fermenterinhalt an drei verschiedenen Höhen. Sobald der gemittelte Temperaturwert sinkt, wird die thermische Energie des BHKW genutzt, um den Fermenter erneut mit Warmwasser zu beheizen. Hierbei liegt der Sollwert bei ca. 40 °C, um ein geeignetes Produktionsklima für die mesophilen Bakterien/Mikroorganismen zu gewährleisten (mesophiler Bereich bei 30 – 45 °C).



Das sich zwischen Fermenter und Gärrestlager befindende Pumpgebäude umfasst zwei Exzentrerschneckenpumpen. Eine Pumpe wird für die Befüllung der Güllefässer aus dem Gärrestlager eingesetzt, während die andere zum Befüllen des Fermenters durch Gülle sowie dem Pumpvorgängen zwischen Fermenter und Gärrestlager zuständig ist. Zudem wird das Zwischengebäude zur Entnahme von Gärgemischproben verwendet, welche an das Labor gesendet werden. 2017 wurde zusätzlich eine Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) in das Pumpsystem (parallel) eingebaut, um die Eigenschaften von Gülle und des Gärgemischs zu bestimmen. Die NIR-Spektroskopie kann Tendenzen der Parameter unmittelbar darstellen und fungiert als Warnsystem, während die Laborproben für die langfristige Abbildung und Entwicklung des Gärgemischs genutzt werden.



Dem Gärrestlager wird eine doppelte Funktion zugewiesen. Zum einen dient es zur geschlossenen und gasdichten Lagerung der Gärreste, zum anderen als Fundament für den Gasspeicher. Das Gärrestlager selbst ist unbeheizt, der Inhalt kann jedoch im Sommer eine Temperatur von über 30 °C erreichen. Das führt zu einer Aktivierung der Bakterienstämme, welche dann neben dem Fermenter zusätzlich (im geringeren Maße) Biogas produzieren. Für die Durchmischung der Gärreste sorgt ein Tauchrührwerk, welches seltener und unregelmäßiger als die Rührwerke im Fermenter eingesetzt wird. Der Gasspeicher besteht aus einer gasdichten Speicherfolie sowie einem Tragluftdach (PVC-Folie), welches zum Schutz durch ein Gasgebläse aufrechtgehalten. Der Gasspeicher erstreckt sich in Form einer $\frac{1}{4}$ Kugel und umfasst ca. 1.292 m³ Fassungsvermögen.

2.2.3 Einsatz der BHKW-Technik zur Energieproduktion

Um eine möglichst lange Lebensdauer für BHKW-Motoren zu garantieren, ist eine entsprechende Gasaufbereitung notwendig.



¹Während des Grundlastbetriebs wurde ausschließlich eine passive Kühlung genutzt. Zwischen dem Gärrestlager und dem Gasverdichter vor dem BHKW-Motor verläuft eine unterirdische Verrohrung, welche die kühle Umgebungstemperatur des Bodens nutzt, um das Gas zu kühlen. Dies führt zu einer Kondensierung der Feuchte im Biogas, welches im Kondensatschacht aufgefangen wird. Die Aufrüstung eines 203 kW Gas-Otto-Motors im Intervallbetrieb führt zu einer erhöhten Gasnachfrage und folglich zu einer geringeren Verweilzeit in den unterirdischen Rohren. Deswegen wurde eine aktive Kühlung hinzugezogen, welche das Gas durch ein gegenlaufendes Medium auf Taupunkttemperatur runterkühlt. Das Kühlmedium wird anschließend in einem eigenen Kreislauf wieder entspannt und dem Kühlprozess zurückgeführt.

Neben der aktiven Kühlung wurde auch ein Aktivkohlefilter verbaut. Die Aktivkohle dient der Entschwefelung und wirkt der Bildung des motorschädlichen Schwefelwasserstoffs (H₂S) entgegen. Wichtig ist, dass zwischen der aktiven Kühlung und dem Aktivkohlefilter das Gas wieder aufgewärmt wird (Senkung der rel. Gasfeuchte), um eine lange Standzeit der Aktivkohle zu gewährleisten. Dies erfolgt durch die Wärmenutzung der BHKW-Aggregate.

Im Grundlastbetrieb reichte eine passive Entschwefelung aus, um die Bildung von H₂S unter den gewünschten Grenzwert zu reduzieren. Dies geschieht durch die Einspeisung

¹ Abbildung aus <https://www.aprovis.com/de/gasaufbereitung/> von APROVIS Energy Systems GmbH

von geringen Mengen an Luft (bzw. Sauerstoffs) in den Fermenter und Gärrestlager ($O_2 < 0,7\%$), welche die aeroben Bakterien zur Schwefelreduktion aktivieren. Durch die erhöhte Gasnachfrage im Intervallbetrieb wurde die Verweilzeit des Gases im gasdichten System erheblich reduziert, wodurch die passive Entschwefelung alleine nicht mehr ausreichte und daher zusätzlich eine aktive Entschwefelung in den Gasstrom mit verbaut wurde.



Die Versuchs-Biogasanlage in Grub hat nun im Intervallbetrieb die Möglichkeit, durch insgesamt zwei Gas-Otto-Motoren mit einer elektrischen Leistung von jeweils 75 und 203 kW Strom zu produzieren. Diese werden zur dezentralen, bedarfsgerechten Stromproduktion eingesetzt, wobei die Nebenaggregate der Biogasanlage (Eigenverbrauch) an die netzbezogene Residuallast bzw. der Stromnachfrage der Liegenschaft gekoppelt ist. Daher wird in dem Projekt die Bruttoproduktion von insgesamt 278 kW elektrischer Leistung als Stromoutput definiert. Im Folgenden werden die einzelnen BHKW-Aggregate näher erläutert.

Das Grundlast-BHKW wurde zusammen mit der Biogasanlage in Betrieb genommen. Bis zur Umstellung der Energieproduktion auf den Intervallbetrieb wurde der Gas-Otto-Motor mit einer elektrischen Leistung von 75 kW im kontinuierlichen Modus unter Volllast betrieben. In seltenen Fällen wurde der Motor auf Teillast gefahren, wenn beispielsweise zu wenig Gas zur Verfügung stand. Insgesamt wies das BHKW während des Grundlastbetriebs hohe Verfügbarkeiten um bis zu 98 % auf. Durch das Hinzuziehen des Spitzenlast-BHKW spielt das Grundlast-BHKW mittlerweile eine eher untergeordnete Rolle.



Abbildung 9: Das Grundlast-BHKW ausgestattet mit einem Gas-Otto-Motor mit 75 kW elektrisch installierter Leistung

Um bedarfsgerecht Strom erzeugen zu können, ist der Einbau eines zusätzlichen Spitzenlast-BHKW's erforderlich. Hierbei fiel die Entscheidung auf einen moderaten Überbau

durch die Einbindung eines BHKW's mit einer elektrischen Leistung von 203 kW. Diese Leistungsklasse hat sich über Jahre hinweg in der Praxis bewährt und kann für die Liegenschaft Grub sowohl Spitzen- als auch Grundlast liefern.

Aufgrund der bisherigen Rahmenbedingungen sind die Blockheizkraftwerke für den Dauerbetrieb im Volllastbereich ausgelegt. Die Erkenntnisse aus der Erprobung unter Praxisbedingungen sollen Aussagen zu den Auswirkungen des Intervallbetriebs auf folgende technische Bereiche liefern:

- Start-/Stopp-Verhalten
- Verhalten des Wirkungsgrads im Voll-/Teillastbereich
- Emissionsverhalten im Voll-/Teillastbereich
- Verhalten Motorenkomponenten bzw. Nebenaggregate
- Wartungsbedarf
- Verfügbarkeit und Störungen

Um die Eigenschaften der BHKW-Motoren zu bestimmen, wurden zusätzlich Messungen des elektrischen Wirkungsgrades sowie der Emissionskonzentrationen Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxide (CO) sowie Kohlenwasserstoffe (THC, Methanschlupf) für einzelne Lasteneinstellungen getätigt.

Um den gestiegenen Anforderungen des Intervallbetriebs zu entsprechen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Bauamt in Rosenheim ein Leistungsverzeichnis erstellt. Hierin wurden spezielle Anforderungen an den Last-Regelbetrieb wie Motorvorwärmung und Gasaufbereitung genau festgelegt. Die Vergabe erfolgte durch eine öffentliche Ausschreibung, welche zuvor vom Staatlichen Bauamt Rosenheim veröffentlicht wurde.

Nach Submission der beiden eingegangenen Angebote hat die Firma Novatech den Zuschlag erhalten. Das installierte Gasmotor-BHKW hat eine installierte elektrische Leistung von 203 kW und laut Herstellerangaben einen elektrischen Wirkungsgrad von 39,1 %. Im Gegensatz zur Maschine mit 75 kW, welche aus einem MAN-Motor besteht, wird das Spitzenlast-BHKW von einem Motor der Marke Tedom angetrieben.



Abbildung 10: Spitzenlast-BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 203 kW

Neben dem neuen Motor wurden zusätzlich die benötigten Notkühler, Gemischkühler und Abgasschalldämpfer verbaut. Dafür mussten neue Fundamente errichtet werden. Näheres zur Einbindung des Spitzenlast-BHKW's kann nachfolgender Graphik entnommen werden.

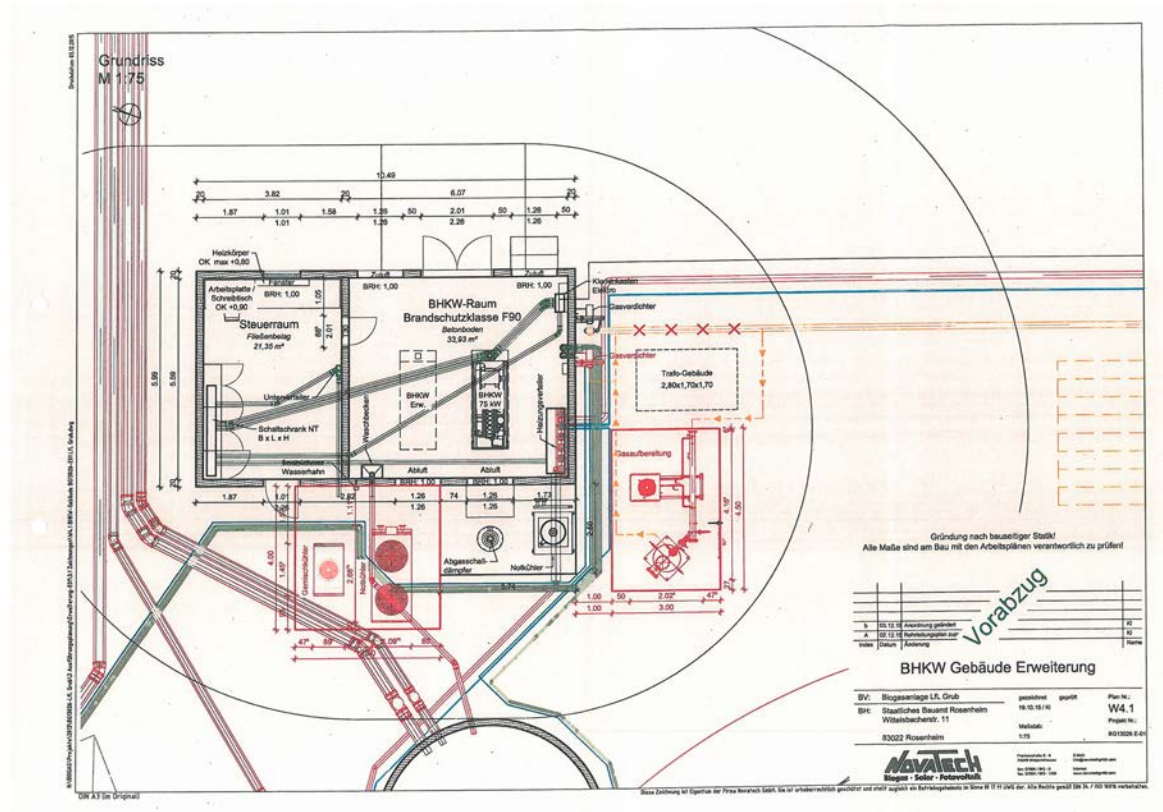


Abbildung 11: Plan zur Einbindung des Spitzenlast-BHKW's nach Hersteller (Quelle Novatech)

Laut Herstellangaben kommt es bei niedrigen Lastprofilen $< 30\%$ vermehrt zur Kondensatsammlung im Ölsystem, wodurch sich die Ölalterung beschleunigt. Um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten und Brennraumablagerungen zu vermeiden, muss die Zündanlagensteuerung dem Lastprofil entsprechend angepasst werden. Es wurde mit dem Hersteller vereinbart, Einstellungen bis minimal 60% Nennlast einzustellen und jede Einstellung in Vier-Stunden-Blöcken durchzufahren. Damit soll der Verschleiß möglichst gering gehalten werden. Je nach prognostizierter Last kann eine Leistung zwischen 122 kW und 203 kW gewählt werden. Laut Herstellerangaben muss zudem mit einer geringeren Ölstandzeit gerechnet werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass die flexible Fahrweise sich auf die Lebensdauer Zündkerzen auswirken wird.

Um die Anlage möglichst flexibel fahren zu können, ist eine Modifizierung der BHKW-Steuerung erforderlich. Bisher wurde das Grundlast-BHKW ausschließlich im Volllastbetrieb gefahren. Bei zu geringem Gasspeicherfüllstand wurde die Leistung des BHKW's stufenweise reduziert und bei zu geringem Gasdruck abgeschaltet. Da das kleine BHKW in Zukunft auch nur bei Volllast betrieben werden. Die elektrische Einbindung des Spitzenlast-BHKW's erfolgt zunächst auf der Niederspannungsseite. Um in das 20-kV -Netz der Liegenschaft Grub einspeisen zu können, musste zusätzlich eine neue Trafostation am

BHKW-Gebäude erstellt werden. Da der geplante Standort den Verlauf der vorhandenen Wärmeleitung kreuzt, musste die Trasse auf einem kurzen Stück verlegt werden. In diesem Bereich wurde die Wärmeleitung so dimensioniert, dass bei einem späteren Ausbau des Netzes die komplette Wärme abtransportiert werden kann.

2.3 Beteiligung und Verantwortung

Die Biogasanlage in Grub wird durch drei verschiedene Institutionen verwaltet und betrieben. Die einzelnen Gruppierungen und ihre Aufgaben werden in Abbildung 12 beschrieben und aufgelistet:

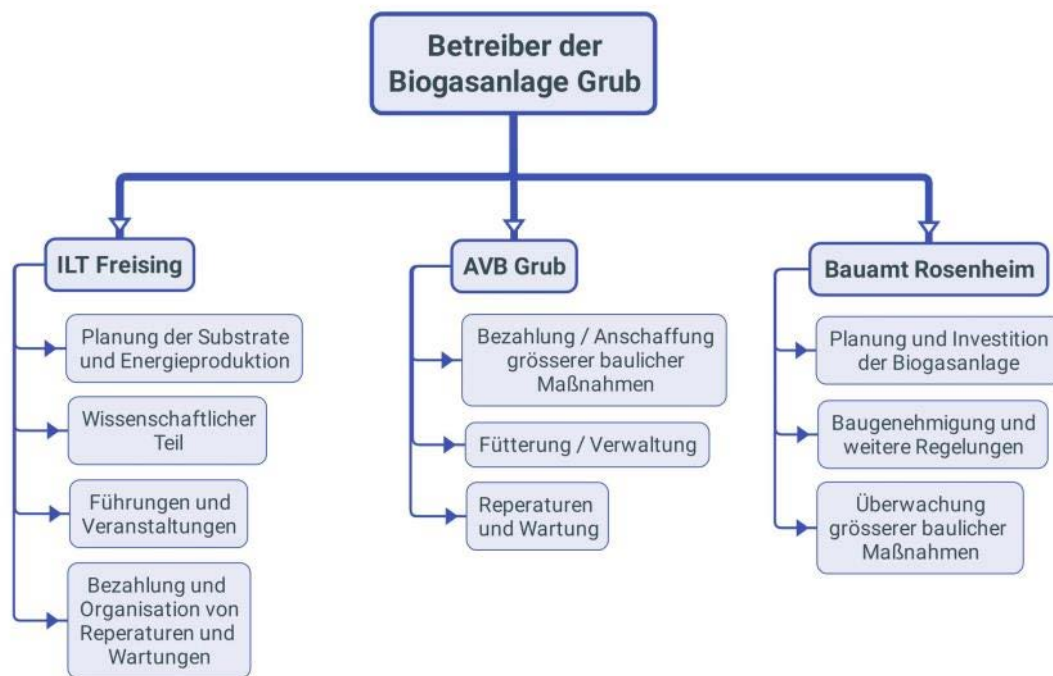


Abbildung 12: Beteiligte Gruppen sowie Verantwortliche der Biogasanlage Grub

Während das Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT) für die wissenschaftliche Betreuung, Öffentlichkeitsarbeit sowie die Planung der Fahrweise zuständig ist, ist die Abteilung für Versuchsbetriebe (AVB) in Grub für die Verwaltung, Instandhaltung und Fütterung der Anlage zuständig. Das Bauamt Rosenheim war hauptsächlich für die Errichtung und Investition der Biogasanlage sowie für die Regelungen und Baugenehmigungen zuständig. Während des Intervallbetriebs assistierte das ILT zur Überwachung von Servicemaßnahmen sowie der Überprüfung und Planung zur Instandhaltung der Anlage.

3 Projektkoordination: Methodisches Vorgehen

Die Biogasanlage wurde am 09.07.2014 in Betrieb genommen. Der 75 kW leistungsstarke Gas-Otto-Motor diente dabei zur Versorgung der Grundlast des Strombedarfs in Grub. Das Konzept wurde anschließend durch die Inbetriebnahme des 203 kW leistungsstarken Gas-Otto-Motors, dem Spitzenlast-BHKW, Ende November 2016 abgelöst.

3.1 Zeitlicher Ablauf des Projekts

Ab Projektbeginn bis hin zur Inbetriebnahme des zweiten Motors wurde an der Umsetzung und Planung der bedarfsorientierten Stromerzeugung gearbeitet. Zusätzlich wurden die Daten im Grundlastbetrieb ausgewertet. Nachdem der Intervallbetrieb ein Jahr unter praktischen Gegebenheiten erprobt wurde, lassen sich Jahreskennzahlen mit denen aus dem Grundlastbetrieb (2015 und 2016) vergleichen. Die verschiedenen Zeitabläufe werden in folgender Grafik nochmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2: Zeitschiene der Biogasanlage Grub im Grundlast- und Intervallbetrieb

Jahre	2014		2015				2016				2017			
Quartale	Q 3	Q 4	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4
Grundlastbetrieb														
Inbetriebnahme 75 kW Gas-Otto-Motor														
Projekt "Intervallbetrieb"														
Vorbereitung Umstellung auf Intervallbetrieb														
Intervallbetrieb: Inbetriebnahme 203 kW Gas-Otto-Motor														
Messung/Bewertung														

3.2 Planung der Stromproduktion im Intervallbetrieb

Um die Stromproduktion zu erhöhen, wurden Energiepläne erstellt. Diese wurden anschließend ausgewertet und weiter optimiert. Hierbei wurde ein Tool in Excel entwickelt, um die Motorfahrweisen, die benötigte Gasmenge und die entsprechend benötigte Substratmenge zu erschließen. Durch die kurzen Planschritte und sich wiederholenden Verbrauchsmuster wurden die Fahrweisen wöchentlich erstellt, ausgewertet und optimiert. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Wochenplanung in Excel vorgestellt.

3.2.1 Energieplanung und Einbindung des Spitzenlast-BHKW

Damit ein geeigneter Fahrplan für die Motoren erstellt werden konnte, wurde zuerst die Nachfrage des vergangenen Jahres analysiert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich der Verbrauch bzw. die Stromnachfrage der Liegenschaft Grub nicht nennenswert verändert hat, da die Hauptabnehmer im Folgejahr weiter bestanden. Die Hauptstromabnehmer

sind u.a. das Schlachthaus, der Melkroboter und die Kühlung, wohingegen die kleineren Abnehmer Bürogebäude und öffentliche Gebäude wie Kantine, Lehrschau und Internat darstellten. Um sich ein „Bild“ von der wöchentlichen Stromentwicklung zu machen, wurde ein Diagramm erstellt (siehe Abbildung 13). Hierbei wurde die Stromnachfrage der Liegenschaft Grub in Wochenverläufen von Montag bis Sonntag des vorangegangenen Jahres (August 2015 bis Juli 2016) ermittelt und übereinandergelegt. Aus den gesammelten Daten wurden drei Wochenverläufe jeweils als Mittelwert, Minimum und Maximum dargestellt.

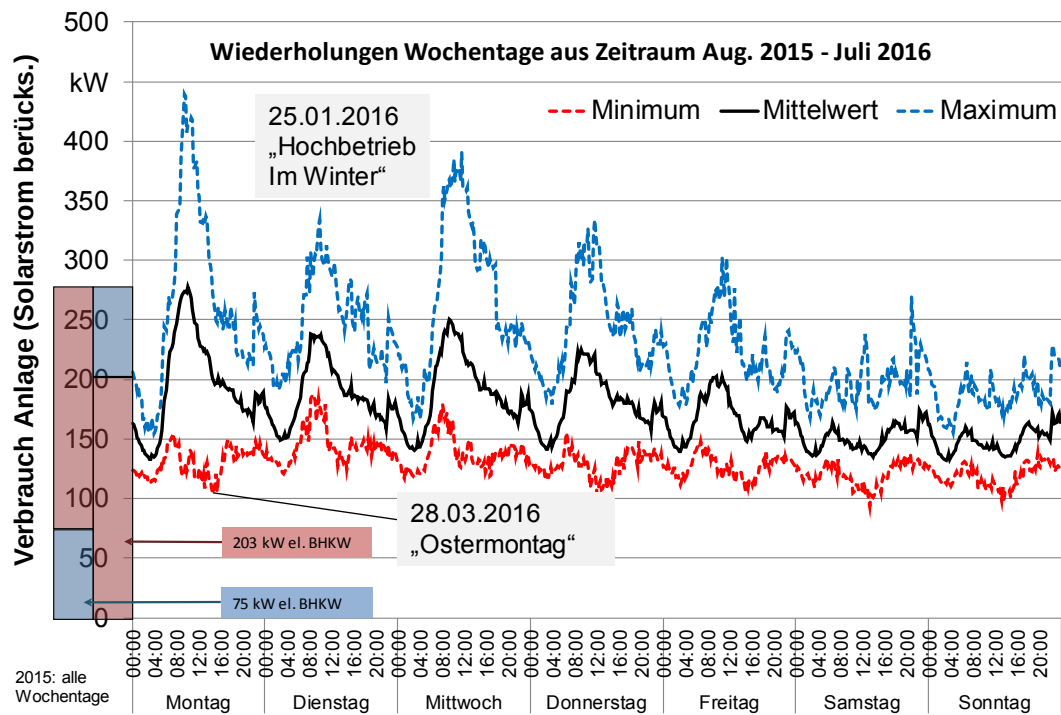


Abbildung 13: Wochenverlauf des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub dargestellt als Mittel-, Minimal- und Maximalwerte

Betrachtet man nun die Abbildung, so fällt auf, dass die Spitzenverläufe des Mittelwerts während der Woche relativ ähnlich sind. Die Höhe des Verlaufs am Montag ist dabei noch am höchsten und nimmt Richtung Ende der Werkwoche ab. Am Wochenende sind keine Spitzen mehr bemerkbar, da keine Versuche am Wochenende gefahren werden. Das bedeutet, dass der Fokus auf die variable Motoreinstellung während der Woche gelegt werden muss. In Tabelle 3 werden die möglichen Motoreinstellungen der jährlichen Energienachfrage (Minimum/Mittelwert/Maximum) gegenübergestellt und verglichen.

Tabelle 3: Motoreneinstellung und jährlicher Energiebedarf der Liegenschaft Grub, angegeben in elektrischer Leistung

Parameter	Energiebereitstellung Biogasanlage (Brutto) [kW _{el}]		Energiebedarf Grub [kW _{el}]
	75 kW	203kW	
Minimum	75 (kontinuierlich)	122	93,56
Zwischenschritte/Mittelwert		142 -162 - 183	174,00
Maximum		203	439,56

Nimmt man den Jahresmittelwert von 174 kW_{el}, so kommt man auf einen Jahresbedarf von ca. 1.524.240 kWh. Es werden in diesem Projekt verschiedene Motoreinstellungen im Intervallbetrieb erprobt, um einen möglichst großen Anteil des Strombedarfs zu decken. Deswegen ist die Betrachtung der einzelnen Wochen wichtig, da sich der Bedarfs-Rhythmus wöchentlich wiederholt. Aus der Erfahrung der letzten Woche können optimierte Motoreneinstellungen für die nächste Prognose ermittelt werden.

Betrachtet man nun nochmal Abbildung 13, so lässt sich feststellen, dass die Minima hauptsächlich auf Feiertage zurückzuführen sind. Daraus lässt sich schließen, dass die Feiertage und damit das Arbeitsverhalten für den Strombedarf und die Wochenprognose ausschlaggebend sind und in jeder Wochenprognose berücksichtigt werden müssen.

Um eine wöchentliche Prognose tätigen zu können, wurde in der Vorbereitungszeit im Projekt eine Formatvorlage erstellt. Damit konnten wöchentlich Korrekturen und Optimierungsmaßnahmen getätigt werden. Für die Prognose wurde der Strombedarfsverlauf aus dem letzten Jahr und derselben Kalenderwoche genommen. Anschließend wurde auf Veränderungen bei den Arbeitsweisen geachtet, beispielsweise durch das Verschieben der Feiertage innerhalb der Wochentage (Vergleich zwischen 2016 und 2017).

Für die Wochenprognose wurde eine Formatvorlage für die Einstellung der Motoren sowie der täglichen Fütterung in Excel erstellt. Basierend auf dem Verlauf des Strombedarfs wurde die Motoreneinstellung eingegeben. Abbildung 15 zeigt die erstellte Formatvorlage, in der die Motoreneinstellung eingegeben wurde. Ein Berechnungsmodell zeigt an, ob und wie weit die Stromproduktion unter oder über dem Strombedarf lag. Dementsprechend wurden die Einstellung der Motoren angepasst sowie der dazu notwendige Substrateinsatz berechnet. Abbildung 14 zeigt die Formatvorlage für die täglich benötigten Substrate. Die Eingabe ist jeweils mit dem Biogasertragspotential für die jeweilige Frischmasse verbunden. Die resultierende tägliche Gasproduktion wird dann dem anfallenden Gasbedarf der Maschinen, welcher über die Effizienz (jede Last hat einen hinterlegten Verbrauchswert) ermittelt wurde, gegenübergestellt. Aus der Differenz der beiden Größen lässt sich dann nochmal die Motoreneinstellung oder die Substrateingabe anpassen. Da die Gärrestlagerkapazitäten nicht unbegrenzt sind, ist im selben Reiter ein kleiner Gärrestrechner hinterlegt, welcher basierend auf dem hinterlegten Abbaugrad und Gärrestkapazitäten die wöchentliche Füllmenge hochrechnet (Überschreitung der Kapazitäten „ja/nein“) und im Zweifelsfall die Substrateingabe angepasst werden kann.

Einsatz Substrate [t FM]		SO-MO	MO-DI	DI-MI	MI-DO	DO-FR	Wochenende und Montag Morgen	
	Fütterung	Morgens+ Nachm.	Morgens+ Nachm.	Morgens+ Nachm.	Morgens+ Nachm.	Freitag morgen	Freitag abend	
Maissilage	Ø							
Maiskornsilage	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Maissilage	5,5	5,7	5,3	4,7	4,8	4,4	8,2	
Maissilage wachtreif. kö.reich		0						
Maissilage teigreif. kö.reich								
Maissilage teigreif. körn.arm								
Maissilage teigreif. mitt. Kö.								
Gras								
Grassil.anw. 2.f.S.Risp.spreiz		0	0	0	0	0	0	
Getreide								
Gerste Körner zweizeilig								
Hafer Körner								
Weizen Körner								
Rindermist frisch	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
Schafmist								Max.
Menge Vertikalmischer	16t	8,2	7,8	7,2	7,3	6,9	10,7	16,0
Fütterungsintervall		9	9	9	9	9	18	
Fütterung je Intervall		0,91	0,87	0,80	0,81	0,77	0,59	
Gülle								
Mastrindergülle	9,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	24	
Milchviehgülle								
Zuckerrübe								
Zuckerrübe frisch	4,5	4	4	4	4	4	7	
Zuckerrübenvollschnittel		0	0	0	0	0	0	
Raumbelastung Br		2,982237406	2,862439192	2,682741871	2,712691424	2,59289321	1,444323078	
Biogasertrag [m³]		2233,891	2152,359	2030,061	2050,444	1968,912	3706,296	
Benötigtes Gas [m³]		2207,74	2155,30	1987,62	2055,86	1954,66	3706,92	
Differenz +- [m³]		26,15	-2,937904666	42,43801188	-5,41190156	14,25	-0,62	
							Differenz gesamt	73,87

Abbildung 14: Auszug der erstellten Formatvorlage (Wochenprognose) zur Berechnung der benötigten Substrate und Gasverbräuche

Lasteneinstellungen	75	203	182,7	162,4	142,1	121,8	Prüfung 203 kW	gef. Leistung kW	Restwert kW	Restwert kWh		Überproduktion kWh	Überproduktion kWh
Eingabe Uhrzeit Stunde	MO 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	229,3	57	14	0	0
	MO 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	1016	254	64	0	0
	MI 8-12	0	1	0	0	0	RICHTIG	203	783,4	196	49	7,34	1,835
	MO 12-16	0	0	1	0	0	RICHTIG	182,7	293,7	73	18	0	0
	MO 16-20	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	622,5	156	39	0	0
	MO 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	642,9	161	40	0	0
	DI 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	247,7	62	15	0	0
	DI 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	741,7	185	46	0	0
	DI 8-12	0	0	1	0	0	RICHTIG	182,7	822,9	206	51	0	0
	DI 12-16	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	236,6	59	15	27,35	6,8375
	DI 16-20	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	322	80	20	5,07	1,2675
	DI 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	296,9	74	19	3,17	0,7925
	MI 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	286,9	72	18	0	0
	MI 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	803,3	201	50	0	0
	MI 8-12	0	0	1	0	0	RICHTIG	182,7	586,9	147	37	0	0
	MI 12-16	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	721,3	180	45	0	0
	MI 16-20	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	693,7	173	43	0	0
	MI 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	752,1	188	47	0	0
	DO 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	393,3	98	25	0	0
	DO 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	479,3	120	30	0	0
	DO 8-12	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	917,7	229	57	0	0
	DO 12-16	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	503,7	126	31	0	0
	DO 16-20	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	608,9	152	38	0	0
	DO 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	330,9	83	21	0	0
	FR 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	357,7	89	22	0	0
	FR 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	488,9	122	31	2,37	0,5925
	FR 8-12	0	0	0	1	0	RICHTIG	162,4	718,9	180	45	0	0
	FR 12-16	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	388,5	97	24	0	0
	FR 16-20	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	839,3	210	52	0	0
	FR 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	594,1	149	37	0	0
	SA 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	314,9	79	20	0	0
	SA 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	637,7	159	40	0	0
	SA 8-12	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	480,9	120	30	0	0
	SA 12-16	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	499,3	125	31	0	0
	SA 16-20	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	736,5	184	46	0	0
	SA 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	573,7	143	36	0	0
	SO 0-4	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	318,1	80	20	0	0
	SO 4-8	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	422,5	106	26	0	0
	SO 8-12	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	468,9	117	29	0	0
	SO 12-16	0	0	0	0	1	RICHTIG	142,1	216,1	54	14	1,17	0,2925
	SO 16-20	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	624,1	156	39	0	0
	SO 20-24	0	0	0	0	1	RICHTIG	121,8	512,1	128	32	0	0

Abbildung 15: Auszug der erstellten Formatvorlage (Wochenprognose) zur Berechnung der Motoreinstellung im Intervallbetrieb

3.3 Steuerung und Automatisierung der Anlage

Neben der Intensivierung der Stromproduktion ist auch die Optimierung der Steuerung sowie Automatisierung der Prozesse ein wichtiger Bestandteil des Projektes. Davon ist zum einen die Substratzufuhr betroffen, welche sowohl über Zeitintervallen als auch über die Menge koordiniert werden kann. Abbildung 16 zeigt die Steuerung des Feststoffdosierers. Das Zeitintervall wird während der Woche auf alle drei Stunden gestellt, wohingegen am Wochenende die Intervalle aufgrund des geringeren Strom-/Substratbedarfs auf vier Stundenzyklen geschaltet werden. Die Substratmenge wird nach Füllstand des Gaslagers sowie nach der Stromproduktion angepasst.

The screenshot displays two main control panels. The left panel, titled 'Einspeisepumpe', includes controls for 'Einspeisebetrieb' (Ein/Aus), 'Umpumpbetrieb' (Ein/Aus), 'Laufzeit' (27 h 3 min), 'Leistungsaufnahme' (0,0 kW), and 'Status Pumpe' with buttons for 'Automatik', 'Pumpe aus', 'Temperatur Motorwicklung OK', and various status indicators like 'FI Schuttschalter OK' and 'Pumpendruck OK'. The right panel, titled 'Betriebsart Einspeisen', features 'Arbeits- /Pausenzeitsteuerung' with 'Zeitvorgabe' (Arbeitszeit: 0 h 2 m, Pausenzeit: 2 h 58 m) and 'Aktuelle Zeit' (0 h 0 m 0 s, 0 h 18 m 55 s) displays, and a 'Zeitsteuerung' (Ein/Aus) button.

Abbildung 16: Automatische Steuerung der Zuckerrübenpumpe in Zeitintervallen

Die Gasproduktion wird durch das Zuckerrübenmus unterstützt, welche unabhängig von dem Feststoffdosierer gepumpt wird. In Abbildung 17 wird die Steuerung dieser Pumpe ersichtlich, welche auch in Zeitintervallen eingestellt wird. Die Menge wird über die Pumpzeit bestimmt. Die Pumpmenge beträgt bei einer Stunde 15 m^3 und in der Minute entsprechend $0,25 \text{ m}^3$. Je nach Beschaffenheit des Substrats kann der Wert leicht variieren.

The screenshot shows two control panels. The left panel, 'Steuerung Substratzufuhr', includes 'Zyklus- und Arbeitszeit' with 'Zeitvorgabe' (Zykluszeit: 3 h 0 m, max. Arbeitszeit: 20 m) and 'Aktuelle Zeit' (0 h 19 m 28 s, 0 m 0 s), and buttons for 'Zeitsteuerung', 'Gewichtssteuerung', 'Eintrag starten', and 'Eintrag stoppen'. The right panel, 'Gewichtssteuerung', includes 'Soll- und Istgewichtsmengen' with 'Aktuelles Füllgewicht Mischer' (7535 kg), 'Eintragsmenge je Zyklus' (1000 kg), 'max. Eintrag je Zyklus' (1050 kg), and 'Zu erreichendes Gewicht' (0 kg), along with a 'Gewichtsübernahme' button.

Abbildung 17: Automatische Steuerung des Feststoffdosierers in Zeitintervallen und Gewichtssteuerung der Feststoffe

Das zentrale Element der Automatisierung stellt die Wocheneinstellung der Motoren dar, welche in Abbildung 18 dargestellt wird. Hierbei lässt sich erkennen, dass die Motoren bis zu fünfmal am Tag eingestellt bzw. umgestellt werden können. Dabei wird das Spitzenlast-BHKW auf eine Teillast von bis ca. 122 kW (bis zu 120 kW möglich) elektrischer Leistung gedrosselt, während das Grundlast BHKW nur zu- (Volllast) oder abgeschalten

wird. Durch diese Steuerungseinheit lassen sich die Motoren für insgesamt eine Woche im Voraus automatisch regeln.

BHKW 1 - AVS 75kW								BHKW 2 - AVS 200kW							
Stufe	Freigabe Zeitstufe	Startzeit	BHKW Ein/Aus	Freigabe Zeitstufe	Startzeit	BHKW Ein/Aus	Leistung	Stufe	Freigabe Zeitstufe	Startzeit	BHKW Ein/Aus	Freigabe Zeitstufe	Startzeit	BHKW Ein/Aus	Leistung
Montag	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW	Dienstag	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	200 kW		Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	04 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW
	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	162 kW		Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	162 kW
	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW		Ein/Aus	21 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW
	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	21 : 00 Uhr	Ein/Aus	200 kW		Ein/Aus	22 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	23 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
Mittwoch	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW	Donnerstag	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	162 kW		Ein/Aus	09 : 10 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	04 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW
	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW		Ein/Aus	13 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	17 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	162 kW		Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW
	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW		Ein/Aus	22 : 01 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
Freitag	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW	Samstag	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	04 : 50 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	04 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW		Ein/Aus	09 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	04 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	10 : 50 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	162 kW		Ein/Aus	13 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	12 : 15 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW		Ein/Aus	17 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	13 : 52 Uhr	Ein/Aus	122 kW
	Ein/Aus	12 : 20 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW		Ein/Aus	22 : 19 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	120 kW
Sonntag	Aus	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein	00 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW	BHKW 1 - AVS 75kW							
	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	08 : 00 Uhr	Ein/Aus	122 kW	BHKW 2 - AVS 200kW							
	Ein/Aus	12 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	10 : 55 Uhr	Ein/Aus	180 kW								
	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	16 : 00 Uhr	Ein/Aus	142 kW								
	Ein/Aus	20 : 00 Uhr	Ein/Aus	Ein/Aus	20 : 30 Uhr	Ein/Aus	120 kW								

Abbildung 18: Zeitsteuerung und Lasteneinstellung beider BHKW-Motoren im Wochenzyklus

3.4 Erhebung und Auswertung der Messwerte

Die auf der Biogasanlage installierten Messsysteme laufen durchgängig und werden je nach Parameter in Minutenschritten aufgezeichnet. Auf dem Zentralcomputer werden die Log-Daten als CSV-Dateien aufgezeichnet und können dort abgerufen werden.

Durch die Fülle der Messdaten müssen monatlich die Daten vom Zentralcomputer auf das Behördenetz überspielt werden, da diese sich nach einem Zeitraum selbst überschreiben. Zur Aufbereitung der Daten und Erstellen von Ergebnissen werden Excel und SAS Enterprise verwendet. Im Zuge der Digitalisierung und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Information und Wissensmanagement (AIW) wurde SAS Visual Analytics in Form einer Demoversion erprobt (siehe dazu Abbildungen im Anhang, Kapitel 8). Mit diesem Online-Programm können schnell eine große Anzahl von nicht aufbereiteten Daten zur Erstellen von Diagrammen verwendet werden, um Abhängigkeiten, Aussagen und Zusammenhänge festzustellen. Die Ergebnisse können Online verwaltet und veröffentlicht werden.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Intervallbetrieb präsentiert. Dabei werden u.a. die eingesetzten Substrate, die biologische und technische Flexibilisierung sowie die Ertragswerte, welche aus den unterschiedlichen Fahrweisen hervorgehen, vorgestellt.

4.1 Bewertung eingesetzter Substrate

Die im Grundlastbetrieb eingesetzten Substrate wurden im Intervallbetrieb weiterhin verwendet. Auf der linken Seite von Abbildung 19 wird deutlich, dass die Biogasanlage (weiterhin) hauptsächlich mit Gülle und Mist versorgt wird (Verteilung bewertet nach Masse). Weitere wichtige Hauptprodukte sind Mais und Zuckerrübe, während Grassilage nur im kleinen Anteil eingesetzt wurde. Unter die Rubrik „Sonstiges*“ sind weitere Reststoffe angegeben, welche im kleinen Maße mit verwendet wurden. So wurden u.a. CCM, Zuckerrübenschnitzel, Zuckerhirse, Mist und Rapsölfilterkuchen eingesetzt.

Während der Intensivierung der Fahrweisen durch den Intervallbetrieb wurde mehr energiereiches Substrat eingesetzt, um eine geeignete Versorgung zu gewährleisten. Trotzdem sank der relative Anteil an Gülle und Mist nicht dramatisch und lag noch über 72 % (Abbildung 19, links), während der Energieanteil aufgrund der energiearmen Gülle nur bei knapp 41 % lag (Abbildung 19, rechts).

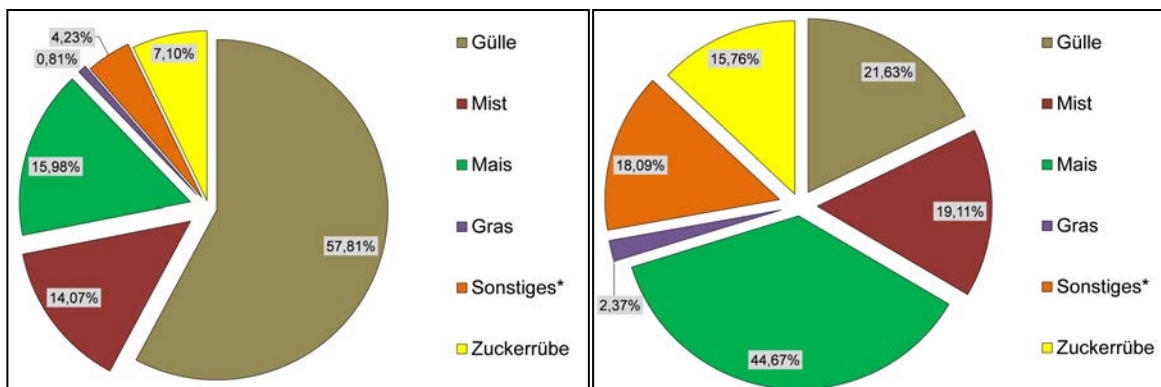


Abbildung 19: Gegenüberstellung des Substrateinsatzes nach Masse (links) und Energiegehalt (rechts) im gesamten Intervallbetrieb (*Sonstiges enthält Reststoffe wie CCM, Zuckerrübenschnitzel, Zuckerhirse, weiteren Mist und Rapsölfilterkuchen)

Es wurden während des Intervallbetriebs verschiedene Gülleproben aus der Vorgrube gezogen. Die Rindergülle ist jenes Substrat, welches von der Menge (Masse) her am meisten eingesetzt wurde. Der relative Anteil während des Intervallbetriebs ist leicht zurückgegangen, dennoch zählt die Rindergülle mit einem Masseanteil von mehr als 58 % im Substratmix zur Hauptkomponente.

Im Folgenden werden die gemessenen Trockensubstanzgehalte aus der entnommenen Rindergülle vorgestellt.

Tabelle 4: Trockensubstanz-Bestimmung von Gülle im Zeitraum 2017

Probe (P)	Schale (S) [g]	S + P, nass [g]	S + P, trocken [g]	Net P, nass [g]	Net P, trocken [g]	TS %
Probe 1	5,5	142,0	13,4	136,5	7,9	5,79 %
Probe2	5,5	118,7	12,0	113,2	6,5	5,74 %
Probe 3	5,5	118,5	12,6	113,0	7,1	6,28 %
Probe 4	5,4	106,9	11	101,5	5,6	5,52 %
Probe 5	5,5	124,3	12,1	118,8	6,6	5,56 %
Mittelwert:						5,78 %

Die Proben wurden über das Jahr 2017 entnommen. Bei einem durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von 5,78 % liegt folglich der Wassergehalt bei 94,22 %. Dieser hohe Wasseranteil bietet Vor- und Nachteile für die Biogasanlage. So dient er als Puffer für die Fermenterbiologie und verbessert zusätzlich die Viskosität, wohingegen verhältnismäßig wenig Energie bereitgestellt wird, weshalb Gülle folglich die Gärrestlagerkapazitäten stärker beansprucht.

Da die Biogasanlage als eine Versuchsanlage geführt wird, konnten Substrate getestet werden, die in der herkömmlichen Praxis nicht verwendet wurden. Hierbei wurden ca. elf Tonnen an Filterkuchen aus der Rapsölproduktion mit im Fermenter eingesetzt. Der Filterkuchen wies einen hohen TS-Gehalt von 67,77 % (Tabelle 5). Insgesamt kann dieses energiereiche Substrat mit einer hohen Oberfläche (musförmige Masse) als ein gutes Abbauprodukt in der Biogasanlage eingesetzt werden. Des Weiteren ist dieses Substrat zur Bekämpfung von Schaum interessant, da es Spuren von Rapsöl enthält (siehe dazu auch Kapitel 4.2.3.2). Der Effekt der Schaumbekämpfung konnte jedoch aufgrund der geringen Einsatzmenge nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 5: Einmalige Trockensubstanz-Bestimmung von Filterkuchen aus Rapsöl

Probe (P)	Schale (S) [g]	S + P, nass [g]	S + P, trocken [g]	Net P, nass [g]	Net P, trocken [g]	TS %
Probe 1	5,5	78,1	54,7	72,6	49,2	67,77 %

4.2 Die „Biologische Flexibilisierung“

Unter der Biologischen Flexibilisierung versteht man den Anspruch der flexibel geführten Fahrweise auf die Fermenterbiologie/-technologie sowie auf die Gasproduktion und Speicherung.

4.2.1 Fermenterbiologie

Die Erhöhung der Bemessungsleistung der Biogasanlage führte zu einem erhöhten Verbrauch an Biogas und somit zu einem verstärkten Einsatz an Substraten. Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt worden ist, wurden verstärkt energiereiche Substrate eingesetzt, welche die Prozesse zur Biogas-/Methanproduktion im Fermenter intensivierten. Basierend auf diesem Hintergrund wurden die Auswirkungen durch die zusätzliche Belastung dokumentiert und gemessen. Hierbei wurde fast wöchentlich eine Probe aus dem Gärgemisch entnommen und dem Labor (AQU, Freising) zugesendet. Es gab beim Fermenter drei Entnahmehähne, welche für die Entnahme aus drei verschiedenen Gärgemischhöhen/-schichten (oberer, mittlerer und unterer Bereich) installiert wurden. Messungen ergaben, dass sich die drei Gemischproben voneinander nicht nennenswert unterschieden, sodass eine Gemischprobe aus dem mittleren Bereich zur Darstellung der Fermenterbiologie genügte.

In Abbildung 20 werden der pH-Wert, Trockensubstanzgehalt sowie FOS/TAC-Wert über die Zeit des Intervallbetriebs vorgestellt, während in Tabelle 6 die Ergebnisse in Durchschnittswerte, Standardabweichung, Minima und Maxima (inklusive der organischen Trockensubstanz und Ammoniumstickstoff) angegeben werden.

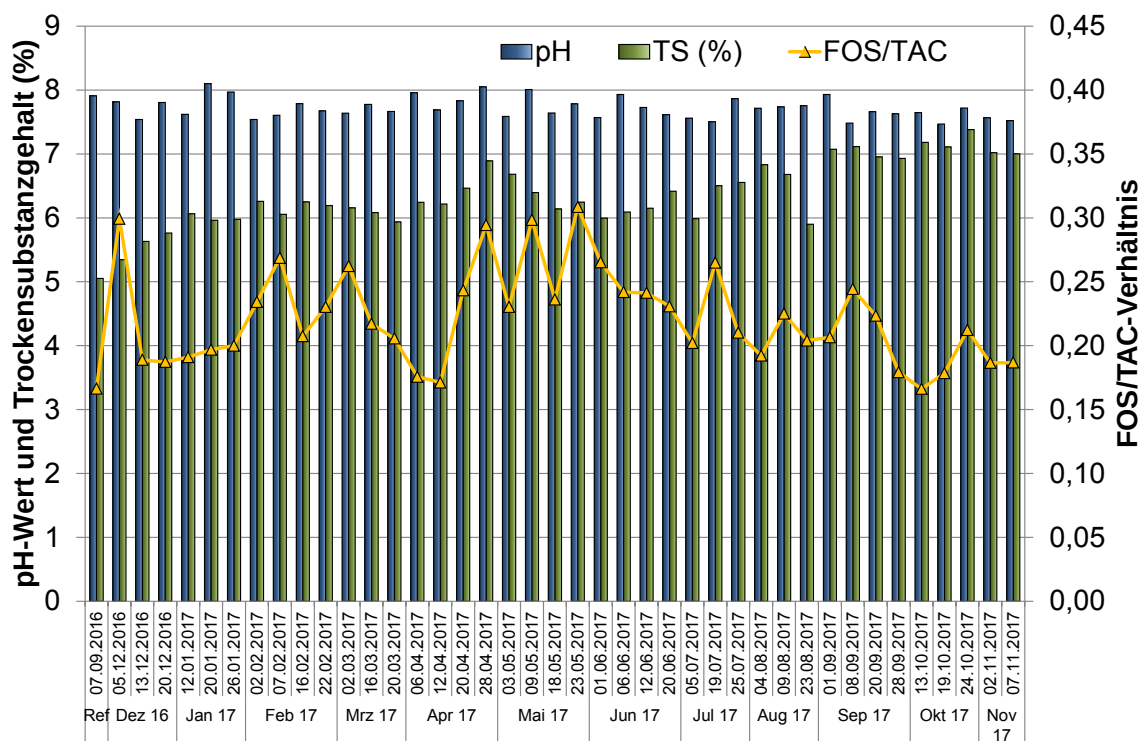


Abbildung 20: Parameter gezogener Proben aus dem Gärgemisch zur Bewertung der Fermenterbiologie während des Intervallbetriebs

Tabelle 6: Parameter gezogener Fermenterproben in Zahlen zur Bewertung der Biologie inklusive organischer Trockensubstanz und Ammoniumstickstoff

Parameter	Trocken- substanz [%]	Org. Trocken- substanz [%]	pH-Wert [%]	FOS/ TAC	Ammoniumstickstoff NH ₄ -N [mg/kg]
Maximum	7,38	74,3	8,1	0,31	1939,3
Standard- abweichung	0,48	1,40	0,2	0,04	264,8
Mittelwert	6,40	70,7	7,7	0,22	1451,6
Standard- abweichung	0,48	1,40	0,2	0,04	264,8
Minimum	5,34	68,5	7,5	0,17	1057,6

Aus Abbildung 20 und Tabelle 6 geht hervor, dass die Parameter und somit die Fermenterbiologie trotz der intensiven Maßnahmen während des Intervallbetriebs stabil geblieben sind. Dies wird am pH- und FOS/TAC-Wert deutlich. Der pH-Wert veränderte sich nicht nennenswert und bewegte sich zwischen 7,5 und 8,1, während das Verhältnis der flüchtigen organischen Säuren (FOS) zur Carbonat-Pufferkapazität (TAC) nur einmal den Wert von 0,31 erreicht, was noch als ein ungefährlicher Bereich angesehen wird. Dies ist auf den hohen Einsatz von Gülle zurückzuführen. Die Raumbelastung variierte zudem in einem relativ niedrigen Bereich von ungefähr 1,5 bis 4,0 kg oTS (m³ d)⁻¹. Auffällig ist, dass der FOS/TAC-Wert Anfang Dezember und im Monat April stark anstieg. Dies ist auf eine zweistufige intensive Erhöhung der Energieproduktion zurückzuführen. Gegenüber der Referenzprobe aus dem Grundlastbetrieb am 07.09.2016 stieg der FOS/TAC-Wert kurzzeitig am 05.12.2016 von ca. 0,16 auf 0,30 an, da dort die Umstellung auf den Intervallbetrieb stattfand. Im April wurden die Fahrweisen nochmal intensiviert und verstärkt Zuckerrüben eingesetzt. Der FOS/TAC-Wert erreichte bis Ende Mai einen Maximal-Wert um 0,31 und nahm in den Folgemonaten wieder ab.

4.2.2 Einsatz von Rührwerken in Abhängigkeit von der Trockensubstanz

Der intensivere Einsatz von energiereichen Substraten mit einem (im Vergleich zur Gülle) erhöhten Trockensubstanzgehalt führte zum Anstieg des absoluten Trockensubstanzgehalts (TS-Gehalt) im Gärgemisch. So stieg der Trockensubstanzgehalt von 5,34 % auf maximal 7,12 % an. Unter den gegebenen Voraussetzungen und trotz des Anstiegs des TS-Gehalts sind insgesamt keine negativen Effekte auf die Fermenterbiologie bzw. der Biogasproduktion festgestellt worden.

Es wurde zuerst davon ausgegangen, dass eine Erhöhung des TS-Gehalts im Gärgemisch zu einer Erhöhung des elektrischen Leistungsanspruchs bei den Rührwerken führt. Hierbei wurden die Tagesverbräuche des Stab- und Tauchrührwerks im Fermenter über die Zeit der intensiveren Beschickung und in Abhängigkeit des jeweiligen TS-Gehalts im Gärgemisch untersucht. Diese werden in Abbildung 21 dargestellt. Es lässt sich wegen dem geringen Bestimmtheitsmaß (niedriges R²) keine signifikante Korrelation zwischen den Parametern feststellen. Beim Tauchrührwerk war kaum ein Anstieg zu verzeichnen, während beim Stabrührwerk Ausschläge unabhängig zum TS-Gehalt festzustellen war. Dies ist

darauf zurückzuführen, dass beim Stabrührwerk mit unterschiedlichen Rührwerkszeiten/-intervallen aufgrund der verstärkten Schaumbelastung experimentiert wurde. Trotzdem lässt sich bei allen drei Trendlinien eine positive Steigung feststellen, was darauf hindeutet, dass ein erhöhter TS-Gehalt einen geringen Einfluss auf eine höhere Rührwerksleistung aufweist. Diese Annahme müsste jedoch in Zukunft weiter geprüft werden. Hierzu müssen sowohl längere Zeiträume sowie weitere Parameter wie Schaumbelastung, Fütterungsintensitäten (v.a. durch Zuckerrübenmus) und -zusammensetzung betrachtet werden.

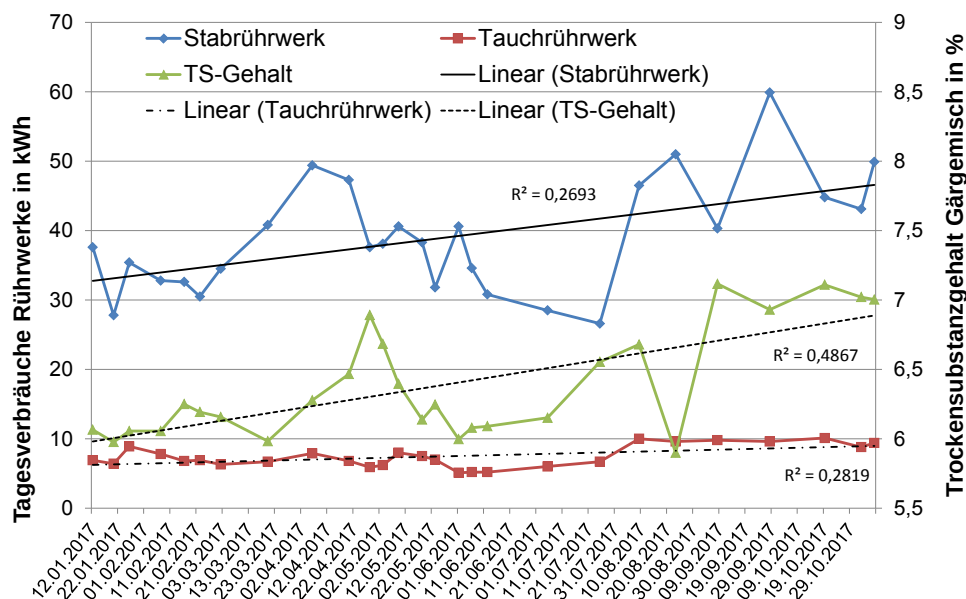


Abbildung 21: Tagesverbräuche einzelner Rührwerke im Fermenter im Zusammenhang mit ermitteltem Trockensubstanzgehalt im Gärgemisch

Um einen tieferen Einblick in die Rührwerkszeiten und Leistungsabnahme über Zeit geben zu können, wurden zwei Beispiele ausgewählt, welche sich stark von dem TS-Gehalt im Gärgemisch unterscheiden. Im Folgenden werden in Tabelle 7 die einzelnen Hintergrundinformationen und Details von zwei ausgewählten Tagen – einmal jeweils im Grundlastbetrieb (GLB) und im Intervallbetrieb (IB) – vorgestellt.

Tabelle 7: Beschreibung der Rührwerkseinsätze zweier ausgewählter Arbeitstage

Datum/ Betrieb	Rührwerk	Rührzeit/d	Rührintervalle (~Min.)	TS-Gehalt	Tagesverbrauch
22.07.2016/ Grundlast- betrieb (GLB)	Stabrührwerk	~ 113 Min. /d	1 Std. Takt = 4 - 7 Min.	5,34 %	20,4 kWh
	Tauchrührwerk	~ 94Min./d	2 Std. Takt = 5 – 6 Min.		13,9 kWh
24.10.2017/ Intervall- betrieb (IB)	Stabrührwerk	~ 434 Min./d	¼ Std. Takt = 2 Min. 1 Std. Takt = 11 Min	7,38 %	41,7 kWh
	Tauchrührwerk	~ 50 Min./d	3 Std. Takt = 6 Min.		9,6 kWh

Es ist bei der Tabelle 7 hinzuzufügen, dass die ausgewählten Tage im Zusammenhang mit den umliegenden Arbeitstagen überprüft wurden und keine nennenswerten Abweichungen im Tagesverbrauch festgestellt wurden. Vergleicht man nun die Tagesverbräuche der gewählten Tage, so lässt sich feststellen, dass im Intervallbetrieb der Gesamtverbrauch von 51,3 kWh wesentlich größer ist als die 34,3 kWh im Grundlastbetrieb. Dies entspricht einer Faktorzunahme von 1,5. Der Anstieg des TS-Gehalts von mehr als 2 % im Fermenter ließ zunächst vermuten, dass der TS-Gehalt die Leistungszunahme mit beeinflusst. Der Leistungsanstieg ist jedoch mit der erhöhten Rührwerkszeit verbunden. Während im Grundlastbetrieb 207 Minuten gerührt werden, fallen bis zu 484 Minuten beim Intervallbetrieb an. Dies entspricht einer Faktorzunahme von über 2,3, was einer wesentlich größeren Zunahme an Rührwerkszeit gegenüber der Zunahme an Stromverbrauch entspricht. Daraus lässt sich schließen, dass ein erhöhter Stromverbrauch nicht direkt proportional zur erhöhten Rührzeit ist. In Abbildung 22 wird diese Schlussfolgerung nochmal ersichtlich. Dabei wurden aus diesem Tage die Leistungsabnahme mehrerer zeitgleicher Rühreinheiten übereinandergelegt und daraus ein Mittelwert gebildet. Dabei konnte festgestellt werden, dass die maximale Leistungsabnahme beider Rührwerke während der Rührwerkszeit im Intervallbetrieb um ein bis zwei Kilowatt Leistung geringer war als im Grundlastbetrieb.

Es lässt sich zusammenfassen, dass der Intervallbetrieb aufgrund der insgesamt längeren Rührzeiten zu insgesamt höheren Tagesverbräuchen führte, wohingegen der einzelne Stromverbrauch pro Rühreinheit und -zeit etwas geringer war.

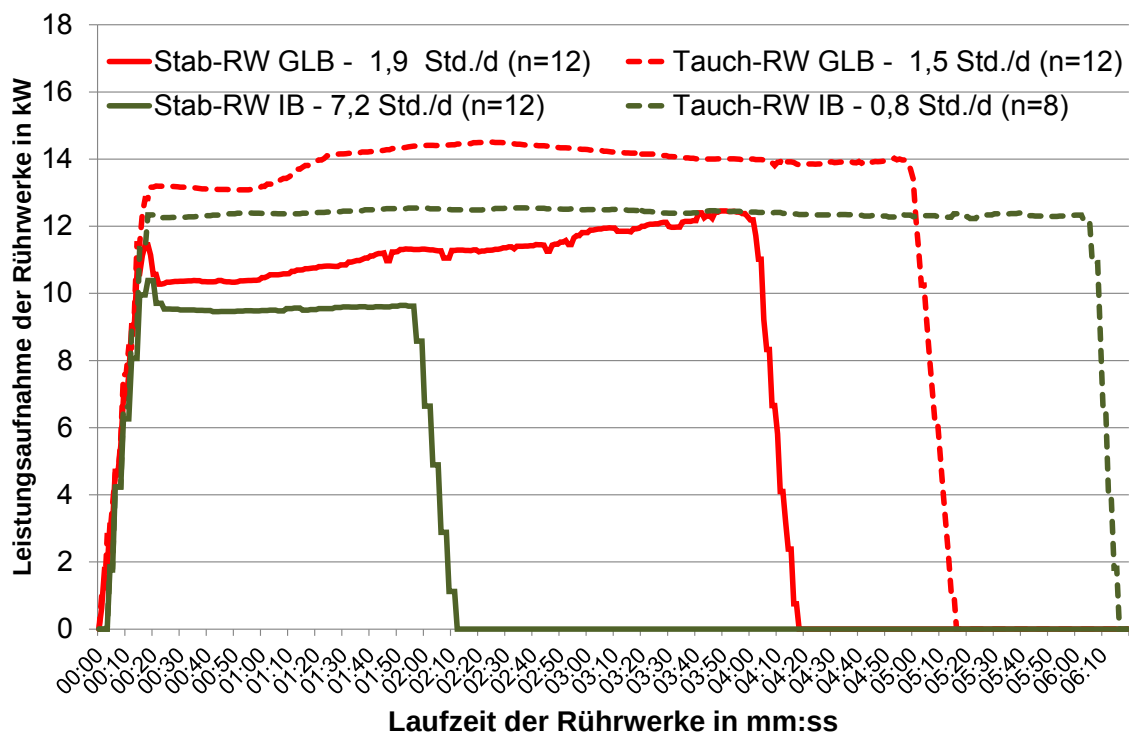


Abbildung 22: Darstellung Leistungsaufnahmen und Laufzeiten des Stab- und Tauchrührwerks im Fermenter während des Grundlast- (GLB) und Intervallbetriebs (IB) (Wiederholung eines gewählten Tages)

In folgender Tabelle 9 werden nun die gemessenen Spurenelemente im Intervallbetrieb (IB) im Vergleich zum Grundlastbetrieb (GLB) dargestellt. Dabei werden die Entwicklungen bzw. Tendenzen der einzelnen Spurenelementkonzentrationen gegenüber dem Grundlastbetrieb vorgestellt. In Tabelle 8 werden die von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. zusammengetragenen Ergebnisse dargestellt. Vergleicht man nun die Ergebnisse beider Tabellen so lässt sich feststellen, dass die Konzentrationen der Spurenelemente der Biogasanlage in Grub aus Tabelle 9 in dem vorgegebenen Bereich aus Tabelle 8 liegen. Allerdings sind diese Richtwerte aus verschiedenen Literaturquellen entnommen worden. Eine spezifische Analyse der einzelnen Spurenelemente im Einzelnen übersteigt die Grenzen des Projektes, dennoch gibt der Vergleich Aufschluss darüber, dass keine negativen Auffälligkeiten in der Fermenterbiologie zu vermerken sind.

Tabelle 8: Günstige Spurenelementkonzentrationen verschiedener Literaturquellen (FNR, 2013)

Element	Richtwerte [5-28]	Richtwerte [5-27]
	mg/kgTS	Konzentration mg/l
Cobalt	0,4–10 (optimal 1,8)	0,06
Molybdän	0,05–16 (optimal 4)	0,05
Nickel	4–30 (optimal 16)	0,006
Selen	0,05–4 (optimal 0,5)	0,008
Wolfram	0,1–30 (optimal 0,6)	
Zink	30–400 (optimal 200)	
Mangan	100–1500 (optimal 300)	0,005-50
Kupfer	10–80 (optimal 40)	
Eisen	750–5000 (optimal 2400)	1–10 [5-29]

Tabelle 9: Ermittelte Konzentrationen der Spurenelemente aus dem Gärgemisch der Fermenterprobe (GLB = Grundlastbetrieb, IB = Intervallbetrieb)

GLB/ IB	mg/kg TS	Kobalt (Co)	Selen (Se)	Nickel (Ni)	Bor (B)	Alumi- nium (Al)	Eisen (Fe)	Kupfer (Cu)	Man- gan (Mn)	Mo- lybdän (Mo)	Zink (Zn)	Cad- mium (Cd)
GLB	31.08. 2015	1,29	0,91	3,39	34,3	720	1259	51,32	259,8	3,98	311,4	0,17
IB	09.05. 2017	1,27	0,9	4,44	36,5	762	1216	68,04	272,1	3,39	262,8	0,16
IB2	25.07. 2017	1,28	0,88	2,99	40,0	1.060	1.460	46,3	288,3	2,77	271,1	0,18
IB3	24.10. 2017	1,42	0,76	5,16	39,7	1.369	1.618	45,38	282,4	2,73	244,2	0,24
Tendenz	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+

4.2.3 Schaumproblematik im Fermenter

Im Folgenden werden nun die Erfahrungen aus der Schaumbildung auf der Versuchs-Biogasanlage in Grub vorgestellt.

4.2.3.1 Schaumbildung und Ursachenforschung

Obwohl die Fermenterbiologie sowohl im Grundlast- als auch im Intervallbetrieb stets intakt war und keine Beeinträchtigung der Gasproduktion festgestellt wurde, stellt die Bildung von Schaum ein Problem auf der Biogasanlage dar. Die Schaumbildung wurde bereits während des Grundlastbetriebs festgestellt. Dennoch ist eine verstärkte Schaumbildung während des Intervallbetriebs beobachtet worden, was auf den verstärkten Einsatz von energiereichen Substraten zurückzuführen ist.



Abbildung 23: Erkennbare Schaumschicht im Fermenter

Die Ursachenanalyse für die Schaumbildung gestaltet sich als äußerst schwierig, da zum einen viele verschiedene Ursachen möglich sind und zum anderen viele Synergieeffekte in einem Fermenter vorherrschen, welche aus einem Substrat-Mix hervorgerufen werden. Im Folgenden werden verschiedene ermittelte Ursachen aus dem Biogas Forum (Kliche und Lebuhn, 2017), die mit der Biogasanlage in Grub in Verbindung gebracht werden könnten, vorgestellt:

- Tenside aus dem Melkstand (Stallreinigung gelangt in die Gülle)
- Abrupter Substratwechsel
- Zu schnelle Steigerung der Anteile leicht verwertbarer Substrate wie Getreideschrot oder
- Zuckerrübenmus in der Substratmischung
- Schleimstoffe in den Substraten (z.B. GPS und Zuckerrübe)
- Spurenelementmangel oder anderer Nährstoffe (dieses Gebiet ist noch unerforscht, da es keine eindeutigen Vorgaben für eine perfekte Spurenelementzusammensetzung gibt)

- Schimmelpilze im Substrat
- Nacherwärmung der Silage
- Übersäuerung
- Hoher Proteinanteil (z.B. durch Getreide- oder Rindergülleinsatz)
- Unzureichende Durchmischung des Gärgemisches
- Sehr geringer Trockensubstanzgehalt im Fermente

Die Komplexität der Fermenterbiologie und der damit verbundenen Einsatzstoffen erschweren die Ursachenforschung. Eine geeignete Ursachenforschung müsste in isolierten Systemen auf Labormaßstab erfolgen. Es lässt sich jedoch im Sommer feststellen, dass sich der Schaum wesentlich schneller bildet als im Winter.

Dies liegt zum einen am verstärkten Einsatz von Zuckerrübenmus, welcher ab Ende Februar bis Ende September eingesetzt worden ist. Beispielsweise wurde an einem heißen Sommertag beobachtet, wie eine Beigabe von ein bis zwei Kubikmeter Zuckerrübenmus innerhalb von ein bis zwei Stunden zu einer Erhöhung der Schaumschicht um einen Meter führte. Die Witterungsverhältnisse könnten dabei eine Rolle spielen, belegen lässt sich dies nach heutigem Kenntnisstand jedoch noch nicht.

4.2.3.2 Maßnahmen zur Schaumreduzierung /-bekämpfung

Sofern der Schaum(stand) nicht kontrolliert sowie nicht abgesenkt wird, kann dies zu Verstopfungen in den Gasleitungen und Überdrucksicherungen führen, was zu einem Austreten des Gärsubstrats aus den Überdrucksicherungen und im schlimmsten Falle zu einer Anhebung des Betondaches (Totalschaden) führen kann.

Die Bekämpfung von Schaum ist auf jeder Anlage möglich und auch wichtig. Doch nicht jede Maßnahme ist ökonomisch sinnvoll. Die mechanische Schaumbekämpfung beispielsweise stellt einen hohen Kosten- und Arbeitsaufwand dar, da im Fermenter bauliche Vorkehrungen getroffen werden müssten. Es wird stattdessen empfohlen, mit erhöhten Rührzeiten zu arbeiten, um eine gute Durchmischung der Substrate zu gewährleisten („indirekte mechanische Schaumbekämpfung“).

Für die Biogasanlage in Grub wurde eine einfache und kostengünstige Lösung gefunden. Hierbei wird in das Gärgemisch über die Zufuhrschnecke Öl in Form von Rapsöl beige-mischt. Dies geschieht zeitgleich während der Beschickung der Feststoffe. Während der ersten Versuche wurde Rapsöl in die Schnecke hineingegeben. Durch das Beschicken der Anlage wurde die beigefügte Rapsölmenge in den Fermenter gepumpt. Da kurz danach das Stabrührwerk startet, wird das Rapsöl zusammen mit den neuen Substraten in das Gärgemisch eingerührt. Durch das Beimischen des Rapsöls konnte der Schaumspiegel wieder erfolgreich abgesenkt werden. Allerdings funktioniert der Effekt nur für wenige Stunden, da das Rapsöl in dem Gärprozess zur Gasproduktion mit abgebaut wird.

Um eine regelmäßige und gleichmäßige Schaumkontrolle gewährleisten zu können, wurde in Freising die Werkstatt mit dem Bau einer kleindimensionierten Rapsölpumpe beauftragt, welche automatisch gesteuert werden kann (siehe Abbildung 24, links).



Abbildung 24: Aufbau und Einsatz einer automatisierten Rapsölpumpe zur kontrollierten Bekämpfung der Schaumbildung

Diese konstruierte Pumpe konnte dann neben dem Feststoffdosierer installiert werden (siehe Abbildung 24, rechts). Sobald der Schieber sich öffnet, wird die Rapsölpumpe aktiviert und fügt in die Schnecke parallel zum Fütterungsprozess Rapsöl ein. Über eine Anzeige konnte die einzutragende Menge pro Zyklus eingegeben werden. So konnte die Menge entsprechend der Schaumbildung und der Reduktionsleistung angepasst werden und Erfahrungswerte generiert werden: während in den kälteren Monaten (Oktober – März) die tägliche Zufuhr zwischen null bis drei Liter variierte, stieg der Tagessatz in den wärmeren Monaten (April bis September) auf zwölf bis 15 Liter an. Durch den automatisierten Eintrag konnte die Schaumbildung kontrolliert werden. Außerdem wurden während der Abwesenheit (z.B. am Wochenende) Gefahren zur Schaumüberproduktion vermieden.

4.2.4 Gasproduktion

Während des Intervallbetriebs wurden wöchentlich Vorgaben an die Fahrweise der BHKW-Aggregate angegeben. Hierbei wurde die Beschickung der Anlage an die unterschiedlichen Gasverbräuche der Lasteneinstellungen der BHKW-Aggregate angepasst. Während am Wochenende die Verbräuche geringer waren, waren von Montag bis Freitag die größten Verbräuche zu vermerken. Gerade am Montag wurden durch die hohen Lastenspitzen die größten Tagesverbräuche gemessen, welche tendenziell bis Freitag abnahmen.

Während der Woche und insbesondere Montag fand eine intensive Beschickung statt, so dass die Gasproduktion „hochgekurbelt“ wurde, mit dem Ziel genügend Gas für das Wochenende sowie den darauf folgenden Montag bereitzustellen.

In Abbildung 25 werden die Produktionsdaten (Gasproduktion in Gelb und Beschickung der Feststoffe in Blau sowie Gülle in Rot) eines Wochenverlaufs von den Tagen Montag, Donnerstag, Freitag und Sonntag aus der gleichen Woche vorgestellt. Dies gehört zu den ersten Produktionsmustern aus dem Intervallbetrieb. Während der Woche wurden die Fütterungsraten verstärkt, wohingegen am Wochenende die Stromnachfrage geringer war und weniger gefüttert wurde. Die Beschickung und Motoreinstellung wurden so ausgelegt, dass eine Befüllung des Beschickers am Freitag ausreichte, um bis Montag ohne weiteren Arbeitseinsatz durchzufahren. An diesen Tagen konnte festgestellt werden, dass durchschnittlich weniger Gas produziert wurde und dabei Spitzen und Täler in der Gasproduktion deutlich wurden. Die Spitzen lassen sich durch die Rührzeiten erklären. Zum Zeitpunkt der Rühreinheit stieg die Gasproduktion mit an, da durch das Mischen der Schwimmschicht verschlossenes Gas freigesetzt wurde. Am Montagmorgen findet die Auffüllung des Feststoffdosierers statt. Außerdem werden die Fütterungsraten wieder hoch gestellt.

Über die Woche steigt die Gasproduktion an (siehe Donnerstag). Ab Freitag wurde die Beschickungsrate und Gasproduktion wieder runtergestellt, um eine Versorgung über das ganze Wochenende zur Verfügung zu stellen. Der durchschnittliche Gasdurchfluss nahm dementsprechend wieder ab, sodass die Spitzen aus den Rührzeiten deutlich erkennbar wurden. Die Daten wurden Mitte Dezember 2016 erhoben. Es wurden hierbei noch keine Zuckerrüben eingesetzt und die Fahrzeiten waren noch in der Anfangsphase des Intervallbetriebs, in der noch weniger intensiv gefahren wurde.

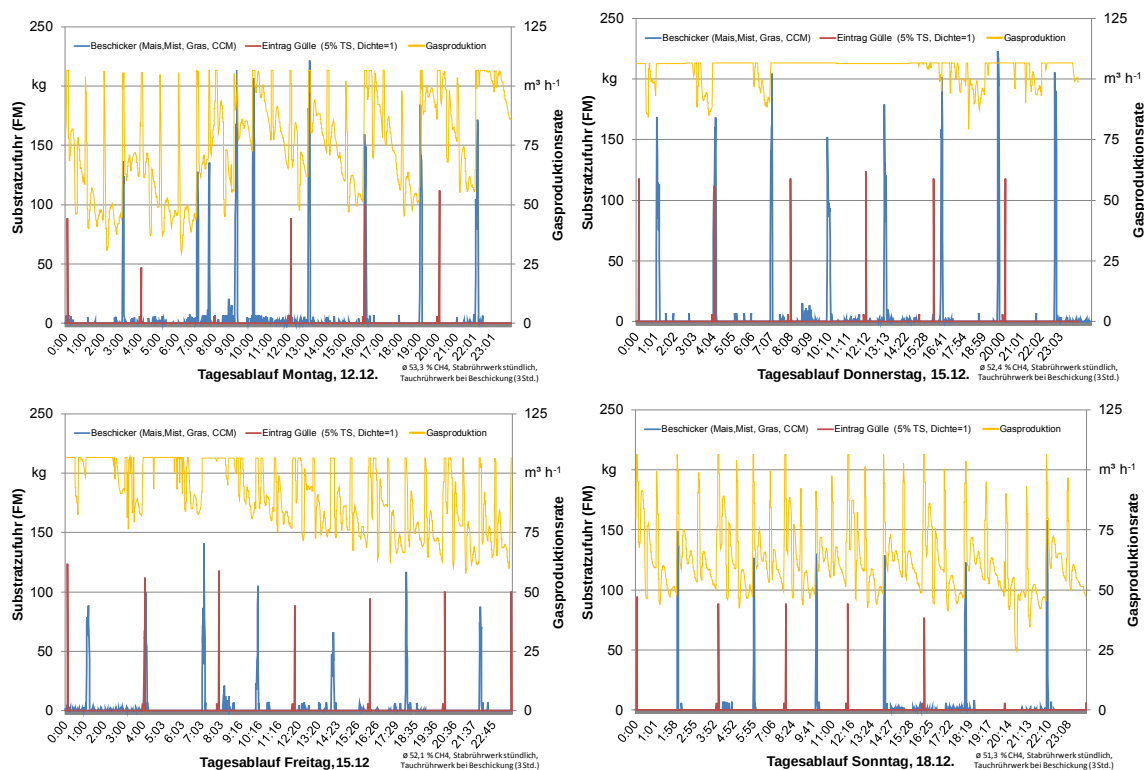


Abbildung 25: Tagesabläufe der Fütterung und Gasproduktionsrate ausgewählter Wochentage (Montag, Donnerstag, Freitag und Sonntag)

Während des Kalenderjahres 2017 wurden die Fahrweisen wöchentlich weiter intensiviert. Es konnten größere Mengen des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub abgedeckt werden. Doch die Ansprüche an die Gasproduktion stiegen auch weiterhin an. Hierbei erwies sich eine kontinuierliche aber hohe Gasproduktionsrate als förderlich. In Kombination mit dem Gasspeicher konnten hiermit höhere Lasteneinstellungen während der Woche abgefahren werden (siehe auch Kapitel 4.2.5). Zudem wurde im März 2018 der alte Feststoffdosierer durch einen neuen ersetzt, der das doppelte Fassungsvermögen von 16 m³ (ursprünglich 8 m³) aufwies. In Abbildung 26 wird ein täglicher Ablauf am 02.05.2017 dargestellt, in der auch Zuckerrübenmus zum Einsatz kommt.

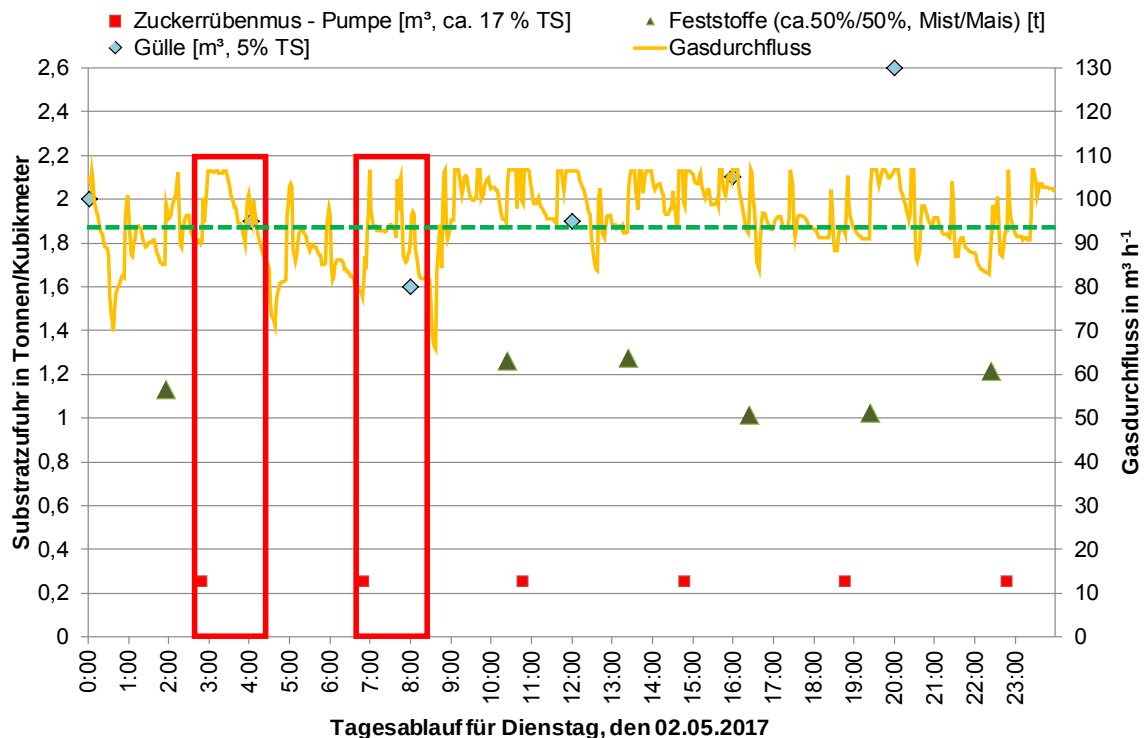


Abbildung 26: Tagesablauf (Dienstag) der Fütterung sowie Einfluss der Zuckerrübenpumpe auf die Gasproduktionsrate

In dieser Abbildung wird deutlich, dass die Gasproduktionsrate möglichst hoch und gleichmäßig gehalten wird. Die durchschnittliche Produktionsrate liegt hierbei bei $95,4 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ (grüne Linie) und entspricht somit einer Tagesproduktion von $2.290 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ bei einem Tagesverbrauch von $2.128 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$. Die Abbildung bildet den 02.05.2017 (Dienstag) ab, dem Tag nach einem verlängerten Wochenende. Dort wurde der Feststoffdosierer im sechs Stunden Takt eingestellt, ehe er am Dienstag auf den drei Stunden Takt gestellt worden ist. Dabei lief die Zuckerrübenpumpe im drei Stunden Takt, um im jeweiligen Takt $0,25 \text{ m}^3$ Zuckerrübenbrei zu pumpen. Leichte Ausschläge sind in der Gasproduktion nach den zwei alleine laufenden Pumpvorgängen erkennbar (rote Umrandung). Durch den Einsatz der Zuckerrübenpumpe konnten hohe kontinuierliche Produktionsraten über (verlängerte) Wochenenden gewährleistet werden und Engpässe durch schnell verfügbares Gas überwunden werden. Der Gasspeicher assistierte dabei als Puffer, was im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

4.2.5 Gasspeicher

Die Planung der Motorleistung und Stromproduktion zieht auch die Planung der Gasproduktion mit sich. Synergieeffekte im Gärsubstrat, lange Umsatzzeiten des Substrats sowie außerplanmäßige Ausfälle der Motoren erschweren eine zeitgleiche Abstimmung der Gasproduktion auf den Gasbedarf der Motoren. Der Gasspeicher funktioniert dabei als eine Art Puffersystem, um solche Schwankungen auszugleichen. Dabei wird der Gasspeicher zu einem gewissen Maße aufgefüllt, während weniger Gas benötigt wird (z.B. nachts). Dieses gespeicherte Gas kann dann zur Unterstützung der Tagesspitzen oder langen Wochenenden verwendet werden. Zur Unterstützung von Engpässen wird zusätzlich Zuckerrübenmus oder eine erhöhte Zufuhr verwendet, wohingegen bei einem zu vollen Gasspeicher die Fütterung von Substraten reduziert oder ausgelassen wird. Die Fütte-

rungsintensität wurde möglichst konstant gehalten, jedoch in Abstimmung mit dem Füllstand des Gasspeichers sowie Gasdruck (Gasfluss) bei Bedarf angepasst.

Folgende Punkte sind beim Gasspeicher in Grub beobachtet worden:

- Die zwei Schlauchwagen geben den prozentualen Füllstand des Gasspeichers an. Er sollte zusammen mit dem Leitungsdruck (Biogasproduktion) gemittelt werden, um eine genauere Momentanmessung angeben zu können.
- Witterungsverhältnisse sollten berücksichtigt werden. Durch die Erhitzung des Gasspeichers dehnt sich das Gas aus und füllt den Gasspeicher auf. Gerade an heißen Sommertagen wurde unter extremen Temperaturänderungen ein Verlust von bis zu 30 % des Speichervolumens festgestellt. Deswegen sollte der Gasspeicher im Sommer nicht zu voll sein (bis zu 70 % wird hierfür empfohlen).
- Es konnte in den meisten Fällen der Betrieb bei einem Gasspeicher unter 10 % aufrecht erhalten werden, solange der Gasdruck nicht absank (BHKW schaltet bei 0,5 mbar ab $\Leftrightarrow$ der Gasdruck bewegt sich normalerweise zwischen 1,5 und 2,5 mbar) bzw. solange die Gasproduktionsrate über dem Gasverbrauch lag.

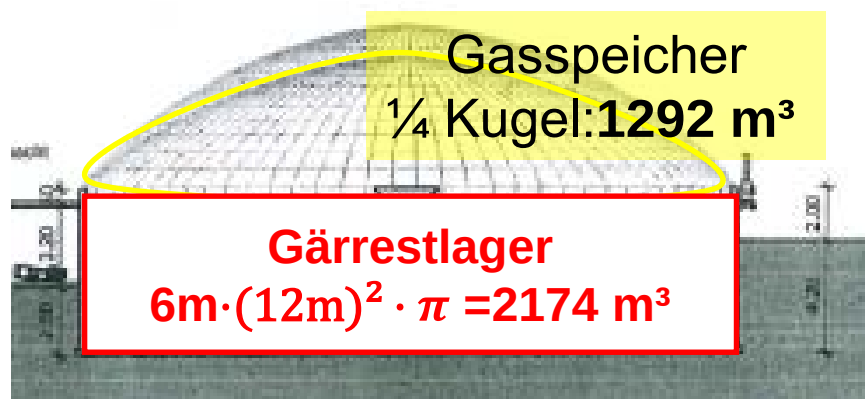


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Gärrestlagers und Gasspeichers

4.2.6 Zuckerrübenmus und -schnittel als Flex-Substrat: Bewertung und Ausführung

Aufgrund der leicht verdaulichen Kohlehydrate kann bereits kurz nach der Fütterung ein deutlicher Anstieg der Gasproduktion festgestellt werden. Betrachtet man die nachfolgende Graphik zur Gasdurchflussmenge im Fermenter genauer, so fällt auf, dass die gemessene Menge im Gegensatz zum Gärrestlager und BHKW stark schwankend ist. Dies liegt zum einen an den stündlichen Rührintervallen und der damit verbunden kurzzeitigen Gasfreisetzung. Andererseits kann man aber auch deutlich den Einfluss der Zuckerrübenfütterung erkennen. In diesem Fall erfolgte die Zudosierung um 08:30 Uhr und 15:30 Uhr. Kurz danach ist ein etwa dreistündiger Anstieg der Gasproduktion messbar.

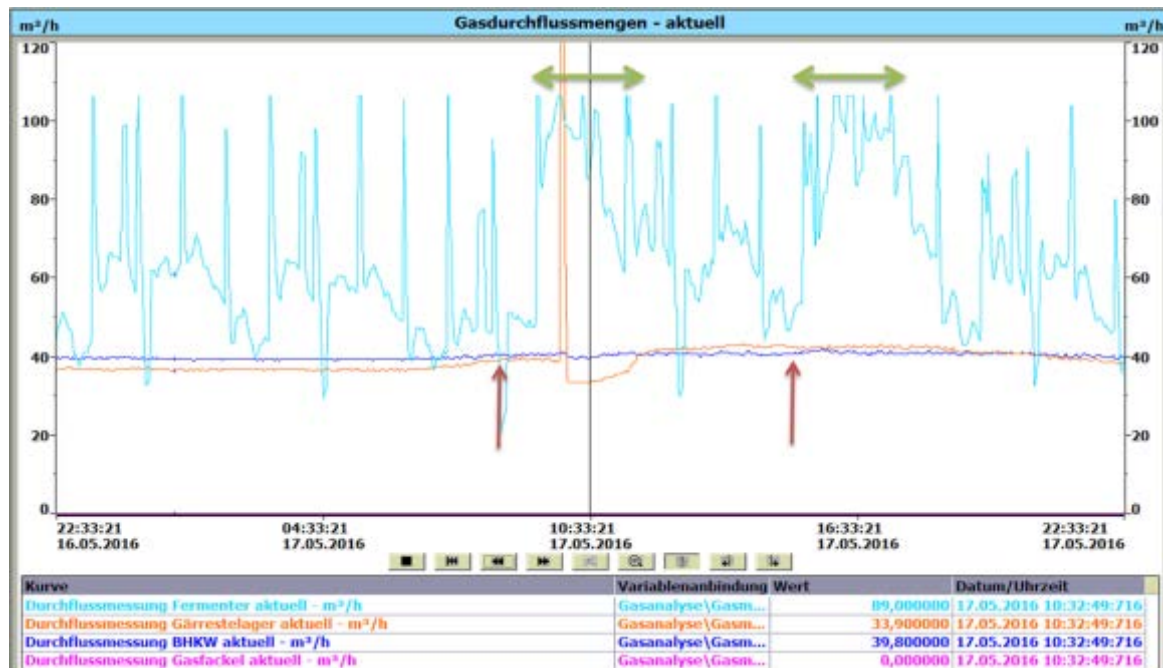


Abbildung 28: Einfluss der Zuckerrübenfütterung auf die Gasproduktion

Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass der Zuckerrübenbrei trotz seines geringeren TS-Gehaltes die Maissilage fast 1:1 ersetzen kann. Hierbei muss aber berücksichtigt werden, dass der Energiegehalt der Maissilage in 2016 aufgrund des geringen Kornanteils sehr niedrig war. Anhand der regelmäßigen TS-Untersuchungen kann auch ein kontinuierlicher Rückgang des Trockensubstanzgehaltes und somit eine Verflüssigung des Gärsubstrats festgestellt werden. Eine Veränderung der Gasqualität konnte bisher nicht beobachtet werden.

Die wichtigsten (praktischen und theoretischen) Erkenntnisse aus der Nutzung von Zuckerrübenmus zur Gasproduktion werden im Folgenden zusammengefasst:

- Das Substrat kann in pumpfähiger Form automatisch und unabhängig von dem Feststoffdosierer eingesetzt werden. So kann das Substrat sowohl regelmäßig eingesetzt werden, als auch in Schüben, um schnell verfügbares Gas bereitzustellen
- Durch den hohen Zuckergehalt und seiner großen Oberflächenstruktur ist der Zuckerrübenbrei ein energiereiches Substrat, welches in wenigen Stunden umgesetzt werden konnte. Es wurde beobachtet, dass das Substrat in Schüben von ein bis zwei Kubikmetern bei Gasspeicherfüllständen unter zehn Prozent das Abfahren von Tagesspitzen ermöglichte und sogar unter Volllast (200 kW_{el}) zu einer ansteigenden Tendenz im Gasspeicher führte.
- Um ein Kubikmeter Zuckerrübenmus pumpen zu können werden ca. 0,4 kWh (wesentlich weniger als der Feststoffdosierer für 1 Tonne Mais) an Arbeitsleistung benötigt. Dabei entstehen laut KTBL 2017 150 m³ Biogas, welches in wenigen Stunden abgebaut wird (Schätzung: drei bis vier Stunden)
- Durch den zusätzlichen Einsatz von Zuckerrübenmus können am Wochenende die Produktionsrate um 20 kW durchgängig erhöht werden (von 122 auf 142 kW_{el}) ohne eine zusätzliche Arbeitskraft für die Fütterung hinzuzuziehen. Außerdem können verlängerte Wochenenden ohne zusätzlichen Einsatz überwunden werden.

- Es wurde bei einem Einsatz von bis zu zwei Kubikmetern Zuckerrübenbrei innerhalb von einer Stunde ein Anstieg des Schaums um einen Meter beobachtet. Durch das Hinzugeben und Einrühren von Rapsöl konnte der Schaumspiegel wieder erfolgreich abgesenkt werden.

Zwischen der Befüllung des ausgekleideten Güllebehälters mit Zuckerrübenmus und der tatsächlichen Nutzung von Zuckerrübenmus vergehen ca. drei bis vier Monate. Es wird davon ausgegangen, dass am Anfang der Lagerung und bis der Zuckerrübenbrei pumpfähig wird die stärksten Verluste (v.a. in der Deckschicht) zu verzeichnen sind. In der Zwischenzeit konnten für ein bis zwei Monate die übrig gebliebenen Zuckerrüben, welche nicht mehr gemust werden konnten, über den Feststoffdosierer in Form von Schnitzel eingebracht werden.

Synergieeffekte des Substratmixes erschwerten Aussagen bzw. Auswertungen der Umsetzraten von Zuckerrübenschnitzel im Fermenter. Außerdem ist das Zeitfenster zur Bewertung von Zuckerrübenschnitzel sehr klein, sodass keine Langzeitversuche getätigt werden konnten. Es wird daher empfohlen, Messungen in isolierten Batch-Ansätzen zu tätigen, um genauere Aussagen und Faustzahlen ermitteln zu können. Während des Intervallbetriebs wurden nichtsdestotrotz Messungen getätigt, um Tendenzen feststellen zu können. Diese werden in Abbildung 29 dargestellt.

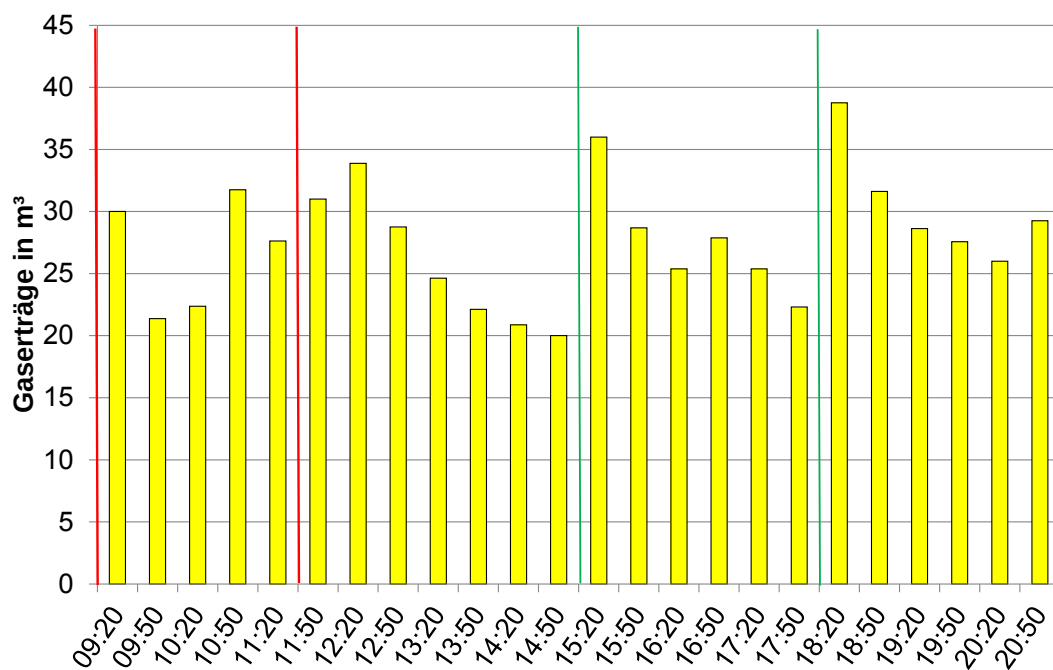


Abbildung 29: Halbestündige Gaserträge (gelbe Balken) sowie Beschickungsraten von Zuckerrübenschnitzel (rot) und Maissilage (grün)

Hierbei wurden zweimal Zuckerrübenschnitzel im Drei-Stunden-Takt gefüttert (roter Balken) mit jeweils ein und 1,5 Tonnen (ergibt insgesamt 80 % der Beschickung $\Leftrightarrow$ 20 % waren Reste aus Mist und Mais) Substrat. Anschließend wurde zum Vergleich jeweils knapp 900 kg und 300 kg Mist insgesamt zweimal eingesetzt (grüner Balken). Aufgrund

von Synergieeffekten zwischen den Substraten lassen sich keine Aussagen über die Umsetzungsrate machen.

4.3 Die technische Flexibilisierung

Neben der biologischen Flexibilisierung wurde auch die technische Flexibilisierung mit untersucht. Unter der technischen Flexibilisierung wird betrachtet, welche Anforderungen und Funktionsweisen bei der Technik der Biogasanlage durch die flexible und bedarfsgerechte Stromerzeugung hervorgerufen werden. Hauptbestandteil ist dabei die Betrachtung der BHKW-Aggregate, die ein wichtiges Organ bei der Biogasanlage darstellen.

4.3.1 BHKW-Eigenschaften und –Anforderungen

Die unterschiedlich vorgegebenen Fahrweisen stellen gewisse Ansprüche an die BHKW-Aggregate. Neben den Start-/Stopp-Vorgängen sind insbesondere die Voll- und Teillasteinstellungen dabei entscheidend. Hierbei wird das Spitzenlast-BHKW auf Voll- bis 60 % Teillast gefahren (203 – 122 kW), während das Grundlast-BHKW im Betrieb ausschließlich auf Volllast gefahren wird. Trotzdem wurden die BHKW-Eigenschaften des Grundlast-BHKW bereits unter Voll- und Teillast (100 %, 80 % und 60%) gemessen, welche in Abbildung 30 dargestellt sind. Zudem wurden die einzelnen getätigten Einstellungen von dem Spitzenlast-BHKW (100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 60 % Last) gemessen und bewertet, welche in Abbildung 31 abgebildet werden.

Es wurden die Emissionskonzentrationen Stickoxid (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (THC, total hydrocarbons) sowie Methanschlupf unter Normbedingungen (5 % Sauerstoff) berechnet bzw. gemessen. Aus den vorliegenden Parametern zum Bestimmen des Energieverbrauchs (Methangehalt, Normgasverbrauch, Energiegehalt) und Produktion (Eigenverbrauch, Bruttoverbrauch) kann der elektrische Wirkungsgrad² (Verbrauch/Effizienz) ermittelt werden. Bei den Ergebnissen in Abbildung 30 sowie Abbildung 31 fällt zunächst auf, dass v.a. die NO_x -Emissionen Richtung Teillast abnehmen, während die THC-Werte sowie der Methanschlupf unter Teillast ansteigen. Dies ist auf die schlechtere Verbrennung in den Brennkammern zurückzuführen, die zu einer kühleren Verbrennung (geringere NO_x -Emissionen) sowie Totzonen im Verbrennungsraum (erhöhte THC-Emissionen) führen. Der Anstieg der Kohlenwasserstoffe respektive des Methanschlupfs spielt für die Ermittlung der CO_2 -Bilanz und damit des CO_2 -Einsparpotentials (z.B. bei CO_2 -Zertifikaten) eine Rolle. Dabei muss die Einstellung unter Teillast mit berücksichtigt werden. Da die Anlage nicht unter die BImSchV-pflichtige Anlagen fällt, müssen die Grenzwerte nach TA-Luft (z.B. NO_x -Grenzwert) nicht eingehalten werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der elektrische (el.) Wirkungsgrad. Durch die unvollständigere Verbrennung unter Teillast fällt er von Voll- auf 80 % Teillast bei beiden Motoren um zwei und drei Prozentpunkte (absolut), während bei 60 % Teillast zwischen sechs und sieben Prozentpunkte (absolut) verzeichnet werden. Dies führt zu erhöhten Verbräuchen, welche bei der Strom- und Substratplanung (Spitzenlast-BHKW) mit berücksichtigt werden müssen. Die Verbrauchsänderung unter Teillast wird im nächsten Kapitel genauer untersucht.

² Gemessen nach den Bedingungen der DIN 3046-1, ohne die Berücksichtigung der 5 % Kraftstoffkorrektur

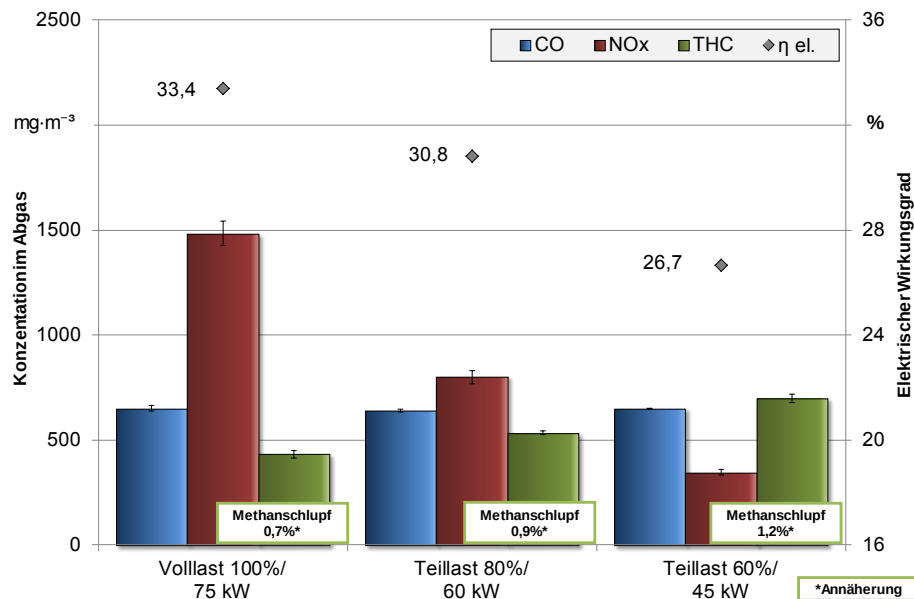


Abbildung 30: Ergebnisse des el. Wirkungsgrades und Emissionen unter verschiedener Last einer Messung (24.05.2015, 16.254 Bh) des 75 kW Gas-Otto-Motors

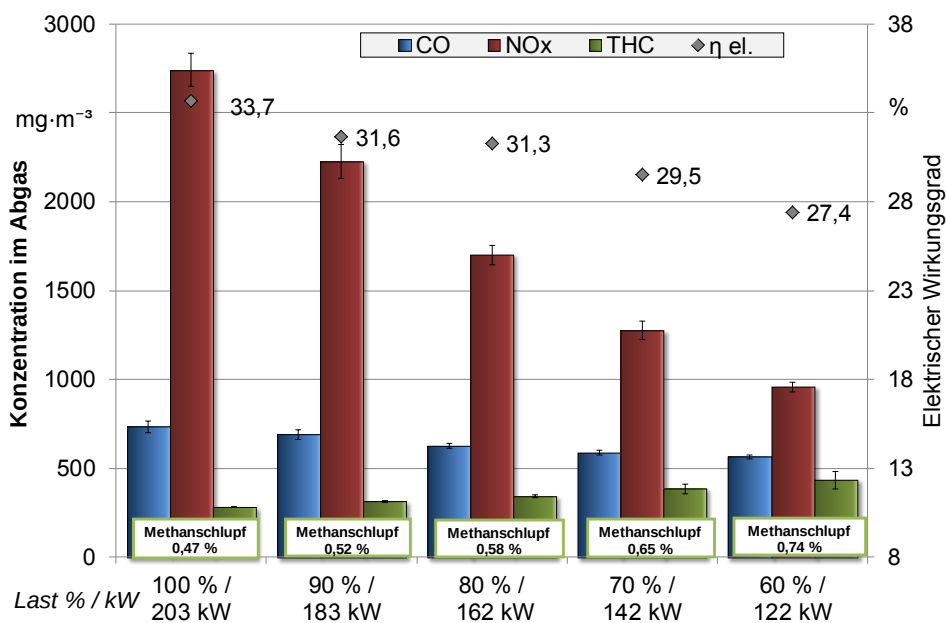


Abbildung 31: Ergebnisse des el. Wirkungsgrades und Emissionen unter verschiedener Last einer Messung (16.10.17, 5.677 Bh) des 203 kW Gas-Otto-Motors

4.3.2 Darstellung des elektrischen Wirkungsgrades

Da der el. Wirkungsgrad (bzw. der Verbrauch) eine wichtige Rolle bei einer bedarfsge- rechten und flexiblen Strombereitstellung spielt, ist dieser für die Ermittlung der Gaspro- duktion sowie Substrateinsatz elementar. In diesem Zusammenhang wurde im Herbst 2017 auf dem Zentralcomputer der Versuchs-Biogasanlage eine Anzeige zur Darstellung des gegenwärtigen el. Wirkungsgrades installiert. Dieser dient nun zur zusätzlichen Über-

wachung der Motoren und unterstützt bei der Auswertung der Verbrauchsdaten. Für die Darstellung des el. Wirkungsgrades η_{el} wurde folgende Formel hinterlegt:

$$(1) \quad \eta_{el} = \frac{\text{Brutto-Stromleistung [kW]} - \text{Leistung-Eigenverbrauch [kW]}}{\text{Normgasverbrauch [m}^3\text{h}^{-1}] \cdot \text{Methangehalt [\%]} \cdot \text{unterer Heizwert [kWh m}^{-3}\text{]}}$$

Die Versuchsbiogasanlage weist damit eine neue Möglichkeit auf, BHKW-Eigenschaften zu überwachen und zu bewerten. So können – unter der Bedingung, dass die Messinstrumente zuverlässig und gleichmäßig arbeiten – die „Gesundheit“ des BHKW überwacht werden. Innermotorische Probleme oder eine veränderte innermotorische Einstellung führt zu einer Abänderung des el. Wirkungsgrades. Sofern keine Maschinenprobleme oder Änderungen der Einstellung vorzufinden sind, kann eine unerwartete Abänderung des el. Wirkungsgrades als Indikator dafür stehen, dass ein beteiligtes Messgerät nicht richtig funktioniert (Gasanalyse oder Strom-/Gaszähler). Auch Auswirkungen von Fahrweisen auf den Momentanwert können näher untersucht werden. In Abbildung 32 wird ein Tagesverlauf der Lasteneinstellung im Zusammenhang mit dem el. Wirkungsgrades gestellt.

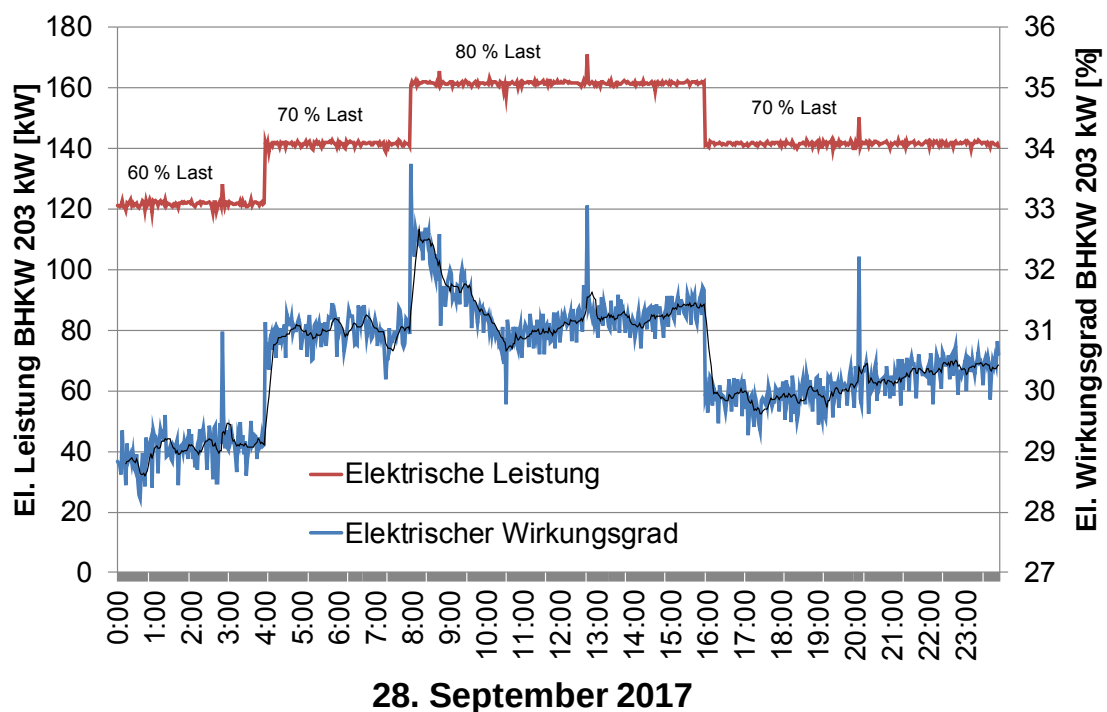


Abbildung 32: Gemessener elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Lasteneinstellung

Hierbei wird nochmal deutlich, dass eine erhöhte Lasteneinstellung zu erhöhten el. Wirkungsgraden führt. Die kleineren Schwankungen sind auf die Schwankungen in den Anzeigen des Strom- und Gaszählers sowie durch das Zu- und Abschalten der Nebenaggregate (Gaskühlung) zurückzuführen. Der Rückgang des el. Wirkungsgrades unter 80 % Teil-

last lässt sich nicht erklären, der Wirkungsgrad scheint sich in diesem Falle „einzupendeln“.

Eine genauere Erfassung der Verbräuche bzw. des el. Wirkungsgrades lässt sich über eine größere Anzahl an Messwerten über längeren Überwachungszeitraum berechnen. Die über einem Monat ermittelten Parameter el. Wirkungsgrad, (tatsächliche) Last, Gasverbrauch sowie Effizienz werden in Tabelle 10 für alle getätigten Lasteneinstellung dargestellt.

Tabelle 10: Ermittelte Parameter aller getätigten Lasteneinstellungen beider BHKW-Motoren von dem 27.09.17 bis 25.10.17

	Last	Parameter	El. Wirkungsgrad. [%]	Last [kW]	Gasverbrauch [m³/h]	Effizienz A [kWh/m³]	Effizienz B [m³/kWh]
BHKW 1	75 kW / 100 %	Max	35,3	76,7	47,1	1,63	0,61
		Mittelwert	33,1	74,6	42,1	1,77	0,56
		Min	27,1	73	23	3,17	0,32
		Stabw.	1,4	0,7	2,5	0,29	3,47
BHKW 2	203 kW / 100 %	Max	35,9	201,1	115,5	1,74	0,57
		Mittelwert	34,2	199,5	110,7	1,8	0,55
		Min	32,5	197,3	104,2	1,89	0,53
		Stabw.	0,7	0,4	1,9	0,19	5,14
	183 kW / 90 %	Max	37,3	185,3	107,4	1,72	0,58
		Mittelwert	33	181,5	104,1	1,74	0,57
		Min	31,8	180,1	91,6	1,97	0,51
		Stabw.	0,7	0,4	2	0,2	5,03
	162 kW / 80 %	Max	34,3	165,9	102	1,63	0,61
		Mittelwert	31,7	161,5	95,7	1,69	0,59
		Min	29,6	159	89,5	1,78	0,56
		Stabw.	0,7	0,5	1,6	0,29	3,45
	142 kW / 70 %	Max	35,6	145,8	91	1,6	0,62
		Mittelwert	30,6	141,5	86,8	1,63	0,61
		Min	28,1	139	77,6	1,79	0,56
		Stabw.	0,6	0,6	1,2	0,47	2,11
	122kW / 60 %	Max	32,2	125,8	81,9	1,54	0,65
		Mittelwert	29,0	121,5	78,2	1,55	0,64
		Min	26,9	118,1	69,8	1,69	0,59
		Stabw.	0,6	0,9	1,1	0,8	1,25

Es wird dadurch deutlich, dass das Absenken der Last von 100 auf 60 % einen erhöhten Verbrauch (um den Faktor 1,2) zur Folge hat. Durch den längeren Messzeitraum sind die Verluste des el. Wirkungsgrades geringer als bei der Einzelmessung, gelten aber als „genauer“. So fallen bei 60 % Teillast gegenüber Volllast nur noch 5,2 %-Punkte (absolut) an, wohingegen in der Einzelmessung 6,3 %-Punkte (absolut) ermittelt wurden.

4.3.3 Störungen im Betrieb

Während des Intervallbetriebs bzw. ab der Inbetriebnahme des Spitzenlast-BHKW wurden die Störungen auf der Biogasanlage überwacht. Für ein Jahr lang wurden alle Störungen dokumentiert. Deren Verteilung wurde im Folgenden nach Prozenten (Abbildung 33) sowie nach Anzahl (Abbildung 34) in Tortendiagrammen³ abgebildet.

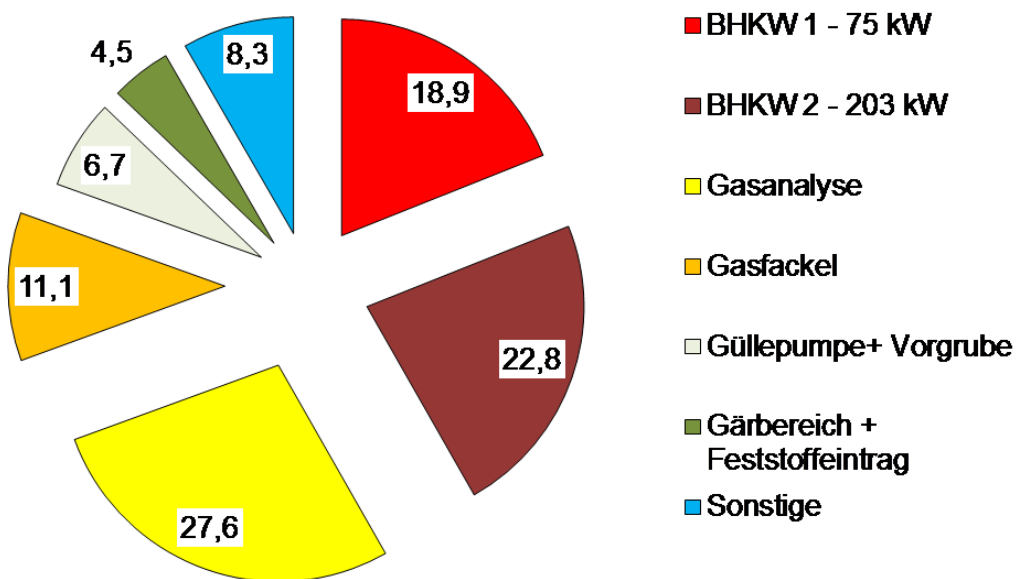


Abbildung 33: %-Anteile angefallener Störungen auf der Biogasanlage während des Lastregelbetriebs (23.11.16-22.11.17)

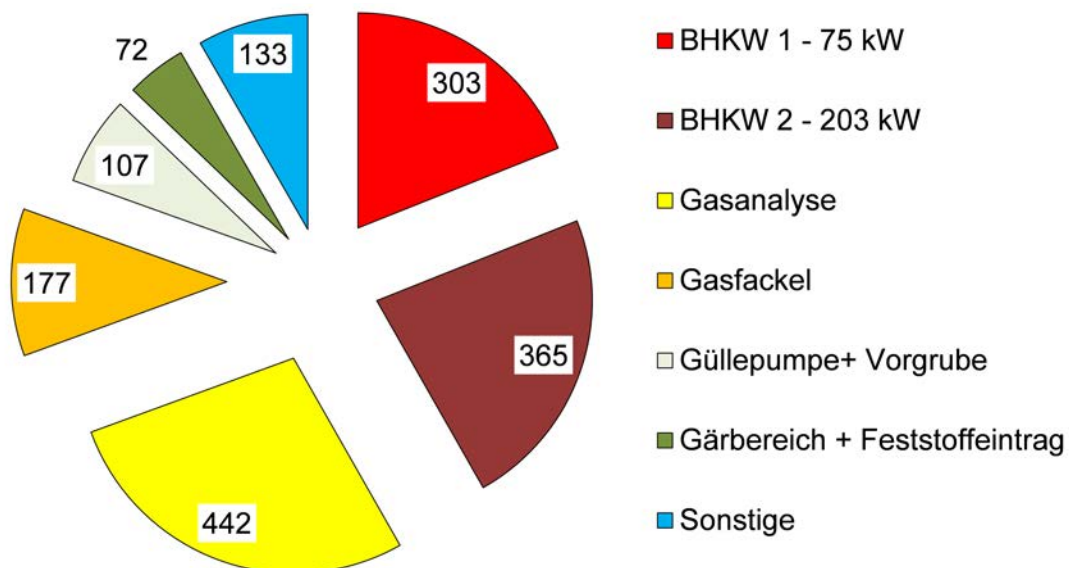


Abbildung 34: Anzahl angefallener Störungen auf der Biogasanlage während des Lastregelbetriebs (23.11.16-22.11.17)

³ Beide Tortendiagramme zeigen die selbe Verteilung und unterscheiden sich nur durch die Angabe

Die Hauptanteile aller entstandenen Störungen machen die Gastechnik und die BHKW-Aggregaten aus. Die Gastechnik machte mit 38,7 % den zweitgrößten Anteil aller Störungen aus und ist hauptsächlich auf die Gasanalyse zurückzuführen. Hierbei ist kein Zusammenhang mit dem Intervallbetrieb festzustellen, da das Gas immer mit ähnlicher Zusammensetzung durchgeflossen ist. Auch bei der Gasfackel lässt sich kein direkter Zusammenhang feststellen, obwohl sie im Vergleich zu den Jahren im Grundlastbetrieb öfters gelaufen ist. Dennoch wurde eine starke Verschmutzung beim Magnetventil festgestellt, welcher sich in der Gasleitung zwischen Gasfackel und Fermenter befindet. Beim Öffnen der Leitung wurden kleine, schwefelfarbene Brocken gefunden. Der Verschmutzungsgrad war so groß, dass das Ventil sich nicht mehr richtig verschloss und ausgetauscht werden musste.

Die meisten Störungen mit einem Anteil von 41,7 % sind auf die BHKW-Aggregate zurückzuführen. Die insgesamt 668 Störungen im Jahr entsprechen einem Durchschnitt von fast zwei Störungen am Tag (Störungen treten jedoch eher vermengt in kurzer Zeit auf). Dies zeigt, dass BHKW-Aggregate das Herzstück einer Anlage darstellen. Im Folgenden werden häufig beobachtete Störungstypen, die zum Teil in dem Zusammenhang mit der flexiblen Fahrweise gestellt werden können, vorgestellt:

- BHKW 1 (75 kW Gas-Otto-Motor): Seit der Inbetriebnahme des BHKW war dieses mit einer manuell gesteuerten Drosselklappe ausgestattet, was seither zu Start-Problemen führte. Es mussten mehrere Start-Versuche getätigt werden, bevor die Drosselklappe die geeignete Mischzufuhr (Luft-Brennstoff) richtig regulieren konnte. Dieses Problem wurde erst im Intervallbetrieb deutlich, da dieser Motor nicht mehr kontinuierlich fuhr, sondern während der Woche öfters gestartet wurde. Die Lösung war eine elektrische Drosselklappe, welche sich beim Starten dem Verbrennungsverhalten anpasst. Diese konnte erst nach mehr als einem Jahr durch den Hersteller geliefert werden. Nach deren Installation im Sommer 2017 sind beim Starten keine Störungen mehr detektiert worden.
- Während der Anfangsphase wurden beim Spitzenlast-BHKW mehrere frequentiv vorkommende Störungen detektiert:
 - Beim Starten des Motors erfolgte keine oder eine zu späte Aktivierung des Notkühlers. Folglich überhitzte der Motor und das BHKW schaltete sich ab. Nach mehreren Wochen konnte dieses Problem durch den Hersteller behoben werden.
 - Sobald der Motor unter Teillast gefahren wurde, kam es zu einer Störmeldung des BHKW, da der Kühlmischer nicht fähig war, automatisch die geeignete Kühltemperatur über den Rücklauf zum Motor zu steuern. Auch dieser Fehler wurde nach mehreren Wochen durch den Hersteller behoben.
 - Der Temperaturfühler vor dem Oxidationskatalysators zeigte einen Wert über dem Grenzwert an, was zu einem Herunterfahren des Motors führte. Dies lag zum einen an dem Temperaturfühler, zum anderen an dem fehlerhaften Einbau durch den Motorenhersteller.
 - In diesem Zusammenhang musste der Oxidationskatalysator ausgebaut werden, da dieser innerhalb von drei Monaten unbrauchbar war. Es wird mit dem Hersteller noch immer um eine Gewährleistung verhandelt, da die Lebenszeit üblich kurz gewesen ist. In Absprache mit weiteren unabhängigen Experten wird unter gegebenen Bedingungen ein Zusammenhang mit der flexiblen Fahrweise ausgeschlossen.

Die Störungen, die während des Intervallbetriebs entstanden sind, sind nicht auf die Abnutzung des Motors durch die flexible Fahrweise zurückzuführen. Stattdessen sind es Probleme gewesen, die entweder bereits im Grundlastbetrieb vorhanden waren oder durch mangelhafte Vorbereitung auf den Flex-Betrieb sowie den Service durch den Motorenhersteller provoziert wurden. Es wird empfohlen, einen Wartungs- und Servicevertrag mit dem Hersteller zu vereinbaren und mit ihm bei der Inbetriebnahme alle Fahrweisen genau durchzugehen. Dabei sollte der Motor unter Begleitung der Servicetechniker für mindestens 15 Minuten unter jede mögliche Lasteneinstellung (wenigstens 10 % Schritte) abgefahren werden und die Temperatur im Zu- und Rücklauf, die Drehzahl (immer 1500 Umdrehungen in der Minute), die Leistung des BHKW und dessen Nebenaggregate sowie das Luft-Brennstoff-Verhältnis überwacht werden. Diese sollten sich unter jeder Einstellung konstant (mit nur geringen Schwankungen) verhalten.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass die flexible Fahrweisen die Störungen nicht direkt verursacht haben oder die Lebenszeiten der Aggregate beeinträchtigen. Jedoch muss eine Biogasanlage auf eine flexible Fahrweise gut vorbereitet sein.

4.4 Auswertung einer dezentralen Stromversorgung im Intervallbetrieb

Im Grundlastbetrieb wurde durch das Grundlast-BHKW kontinuierlich unter Volllast 75 kW_{el} erzeugt. Durch die Inbetriebnahme des Spitzenlast-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 203 kW konnte die Stromproduktion erfolgreich gesteigert werden. Seit dem 27.11.2016 wurden wöchentlich verschiedene Fahrweisen getestet, um eine stufenweise Steigerung der Wochenleistung aus den gesammelten Erfahrungen der bisherigen Woche(n) zu gewährleisten.

4.4.1 Auswertung verschiedener Fahrweisen

In den ersten Wochen wurde das Spitzenlast-BHKW nur zum Abfahren der Tagesspitzen unter den Arbeitstagen (Montag bis Freitag) eingesetzt. Dabei fiel auf, dass das Spitzenlast-BHKW meist im Alleingang die Tagesspitzen abfahren konnte, da es auch unter Teillast eingesetzt wurde. Zu Beginn des Intervallbetriebs war noch nicht bekannt, inwieweit ein erhöhter Einsatz an Substraten die Fermenterbiologie oder Schaumbildung verändert. So wurden verschiedene Fahrweisen wochenweise erprobt und die Wochenleistung langsam angehoben. In Abbildung 35 wird der Verlauf der Stromproduktion und Residuallast der Kalenderwoche 50 (12.-18.12.2016) während der Anfangsphase dargestellt.

Dabei wird ersichtlich, dass das Spitzenlast-BHKW die Tagesspitzen von Montag bis Freitag abfährt, während das Grundlast-BHKW über Nacht und am Wochenende gefahren wird. In dieser Kalenderwoche wurde zusätzlich der große Motor von Mittwoch auf Donnerstag über Nacht unter Teillast eingesetzt, sodass die Residuallast auch nachts verringert werden konnte. Dies deutet daraufhin, dass durch den stärkeren Einsatz des Spitzenlast-BHKW unter Teillast ein größerer Anteil an Strom auf der Liegenschaft Grub gedeckt werden kann. Insgesamt konnte ein Deckungsgrad von 52,4 % für diese Kalenderwoche erreicht werden.

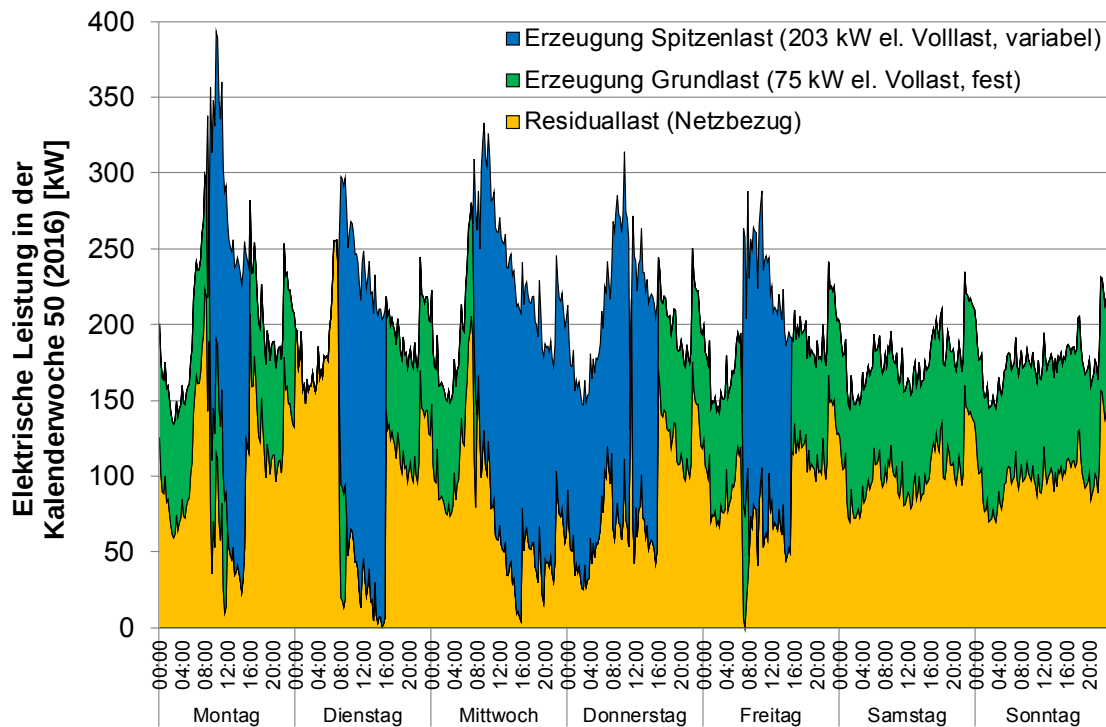


Abbildung 35: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 50, 2016)

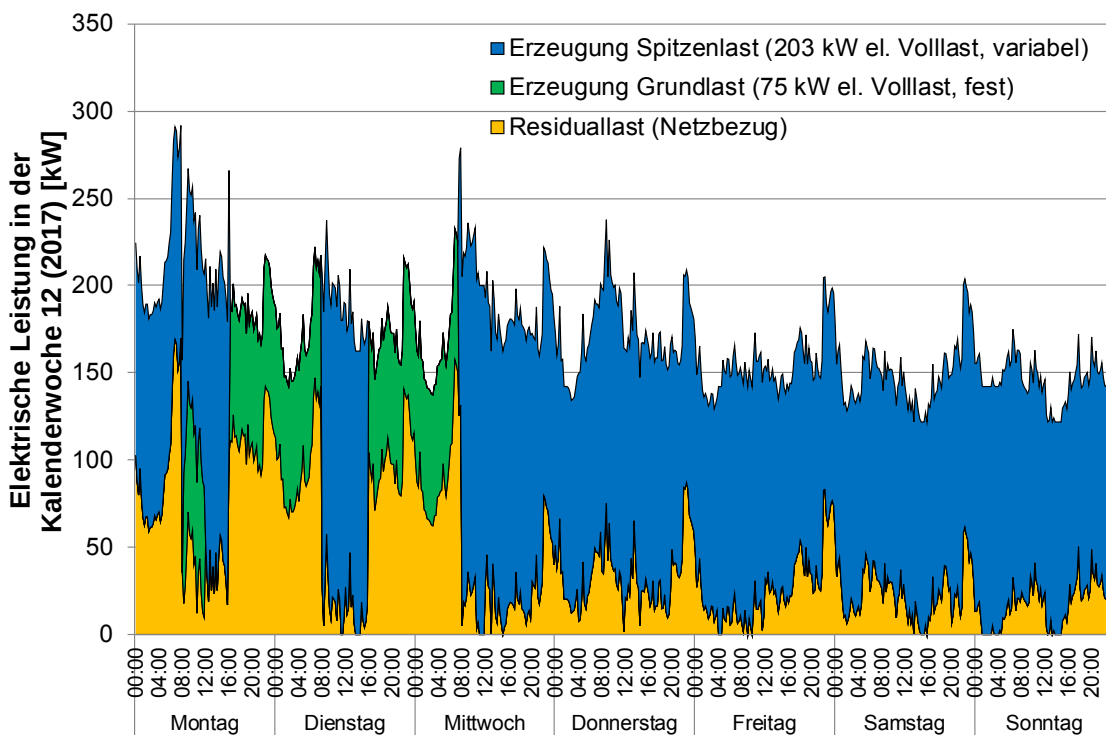


Abbildung 36: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 12, 2017)

Abbildung 36 zeigt Kalenderwoche 12 (20.-26.03.2017), worin der erhöhte Anteil an dem Spitzenlast-BHKW am Gesamtwochenverlauf ersichtlich wird. Einzig über die Nächte von Montag zu Dienstag sowie Dienstag zu Mittwoch wurde das Spitzenlast-BHKW

durch das Grundlast-BHKW ersetzt. Hier wurde zum einen noch der kombinatorische Einsatz mit dem Grundlast-BHKW geprobt. Außerdem war zu dem Zeitpunkt nicht genügend Gas verfügbar, um kontinuierlich mit dem Spitzenlast-BHKW zu fahren. Der Gasspeicher wurde über das Wochenende „geleert“ und musste zu Wochenanfang wieder aufgefüllt werden. Durch diese Fahrweise konnte ein Deckungsgrad von über 67,7 % erreichen.

Durch eine angepasste Planung konnte ein System realisiert werden, worin bereits am Montag genügend Gas zur Verfügung stand, damit das Spitzenlast-BHKW weiterhin durchgängig fahren konnte. In Abbildung 37 wird die Kalenderwoche 26 (27.06.-03.07.2016) vorgestellt, in der die Substratplanung so angepasst wurde, dass das BHKW die gesamte Woche durchlaufen konnte. Dabei ist der Einsatz von Zuckerrübenmus ein wichtiger Bestandteil der Planung, welcher die Maximierung der Fahrweisen über die Wochenspitzen und Wochenenden erst ermöglicht. Dennoch werden zwei Ausfälle des großen Motors bei den Spitzen am Mittwoch und Donnerstag ersichtlich, welche in Abbildung 37 rot markiert sind. Zu diesen Zeitpunkten fiel der Motor aufgrund von Störungen aus, was in einem stark erhöhtem Netzverbrauch der Liegenschaft resultierte. Das Grundlast-BHKW konnte zu diesem Zeitpunkt noch nicht automatisch gestartet werden und konnte daher noch nicht einspringen.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass hohe Deckungsgrade realisierbar sind, sofern die Gasverfügbarkeit sowie die kontinuierliche Verfügbarkeit der BHKW-Motoren über den gesamten Zeitraum gewährleistet sind.

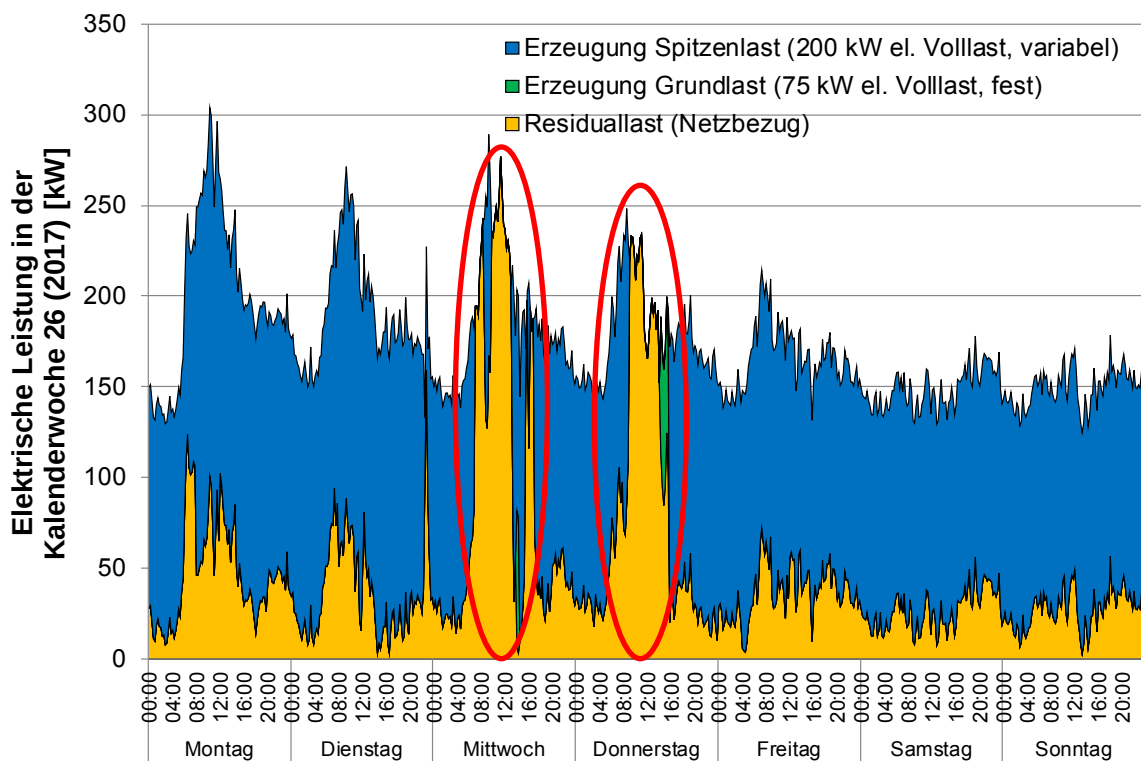


Abbildung 37: Wochenverlauf der Stromproduktion der Biogasanlage sowie netzbezogener Residuallast der Liegenschaft Grub (Kalenderwoche 26, 2017)

Durch seine Fähigkeit, flexibel von 122 bis auf über 200 kW elektrischer Leistung liefern zu können und dadurch den Deckungsgrad zu erhöhen, bekam der Spitzenlast-Motor über

die Projektlaufzeit eine neue Rolle als kontinuierlich laufender „Flex-Motor“ zugewiesen. Obwohl das Grundlast-BHKW mit seinen 75 kW elektrischer Leistung mittlerweile eine eher untergeordnete Rolle spielt, sollte aus folgenden Gründen auf es nicht verzichtet werden:

- Das kleine BHKW kann an Tagen, an dem noch zusätzlich Leistung benötigt wird (insgesamt 278 kW_{el}) zusammen mit dem Spitzenlast-BHKW eingesetzt werden. Die durchschnittliche Häufigkeit beträgt ca. vier bis acht Stunden in der Woche.
- Sobald das große BHKW aufgrund eines Fehlers ausfällt oder gewartet werden muss, kann das kleine eingeschaltet werden, um wertvolle Kilowattstunden zu produzieren und eine zu schnelle Auffüllung des Gassacks zu verhindern.
- Sofern zu wenig Gas zur Verfügung steht, sei es durch planerische oder technische Gründe, kann von der Teillast-Stufe 122 kW (Spitzenlast-BHKW) auf das kleinere 75 kW-Aggregat umgeschaltet werden. Der durchschnittliche Verbrauch senkt sich um weitere 36,1 m³/h (entnommene Mittelwerte aus Tabelle 10).

4.4.2 Steigerung der Stromproduktion in den einzelnen Kalenderwochen

Durch die gesammelte Erfahrung der einzelnen Wochenfahrpläne konnte die Bemessungsleistung pro Woche bzw. die produzierte Wochenleistung in Kilowattstunden über ein Jahr erfolgreich gesteigert werden. Die einzelnen Wochenleistungen durch die Biogasanlage während des Intervallbetriebs werden in Abbildung 38 ausgeführt. Zusätzlich wird die netzbezogene Residuallast der Liegenschaft Grub sowie die Bemessungsleistung und Deckungsgrade dargestellt. Dabei wird auch die auf der Liegenschaft Grub installierte Photovoltaik-Anlage mit einer elektrischen Gesamtleistung von bis zu 55 kW_p mit berücksichtigt, da diese auch Strom für die Liegenschaft Grub mit produziert.

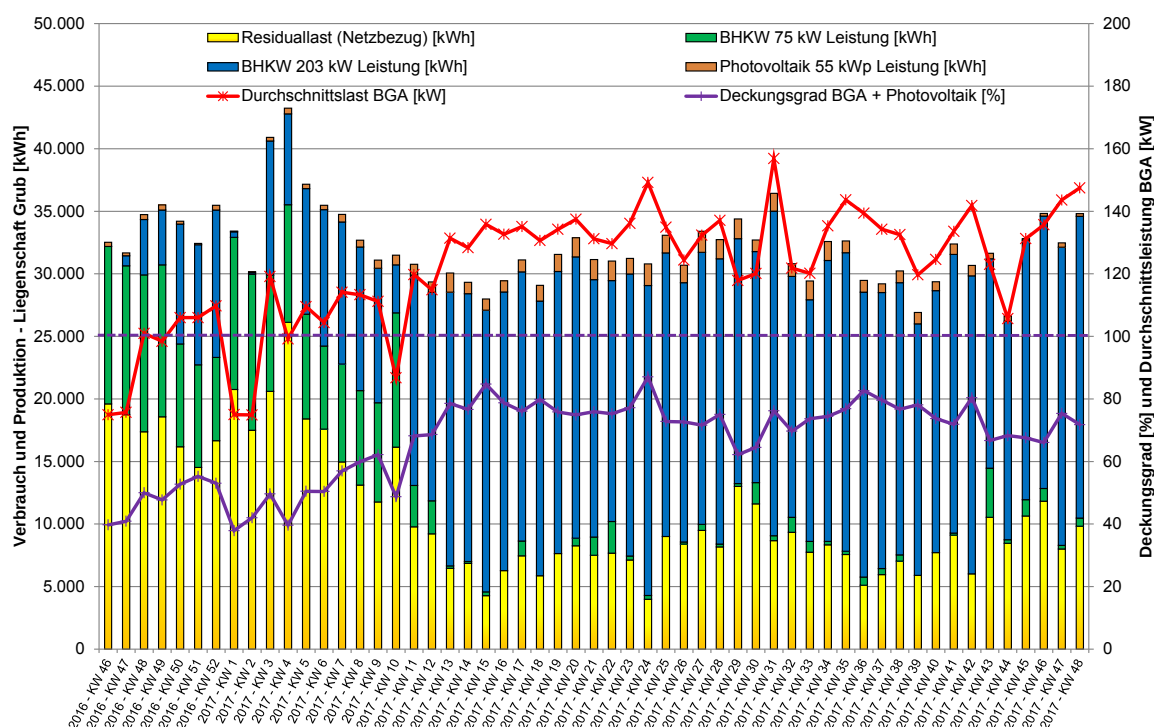


Abbildung 38: In Wochen gestaffelte Stromverbräuche und -produktionen sowie Darstellung der Bemessungsleistung der Biogasanlage und Deckungsgrad (des Stromverbrauchs Grub) durch die Energieerzeuger

In diesem Diagramm wird nochmal deutlich, wie der über Zeit größer werdende Anteil durch den 203 kW Gas-Otto-Motor zu einem erhöhten Deckungsgrad führt. Die Bemessungsleistung der Biogasanlage steigt dabei von 75 kW_{el} auf bis zu knapp 160 kW_{el} an. Die „Rückfälle“, die dabei in anderen Wochen zu verzeichnen sind, sind auf Motorenausfälle oder in selteneren Fällen auf außerplanmäßige mangelnde Gasverfügbarkeit zurückzuführen, was zu einem Absinken auf bis knapp 110 kW_{el} Leistung führt.

Der größte Sprung des wöchentlichen Deckungsgrades von 68,2 % bis 84,7 % fand zwischen der Kalenderwoche elf und 15 statt, jenen Zeitraum, indem das Spitzenlast-BHKW intensiv eingesetzt wurde. Seitdem konnte in 2017 von der Kalenderwoche 15 bis 48 der Stromverbrauch der Liegenschaft durchschnittlich mit rund 74,5 % durch die Biogas- und Photovoltaikanlage gedeckt werden. Davon macht die Photovoltaik durchschnittlich 0,8 %-Punkte (absolut) am Deckungsgrad aus. In der Kalenderwoche 24 wurde ein Spitzenwert von bis zu 87,0 % erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass der Deckungsgrad im 4h Betrieb zukünftig durchschnittlich zwischen 75 und 80 % liegen wird, sofern die beseitigten Probleme am BHKW nicht wiederkehren bzw. die technischen und biologischen Verfügbarkeiten gewährleistet sind. Weitere Steigerungen des Deckungsbedarfs können nur durch eine Vollautomatisierung in engeren Zeitspannen mit Bedarfssteuerung über den Strombezugspunkt am Mittelspannungstransformator erreicht werden.

4.4.3 Netzbezogene Stromeinspeisung durch Überproduktion

Das Ziel, einen möglichst hohen Anteil am Strombedarf der Liegenschaft Grub zu decken, unterliegt mitunter der Bedingung eine Überproduktion zu vermeiden oder zumindest gering zu halten. Die Überproduktion wird als solche definiert, sofern mehr Strom durch die Biogasanlage produziert wird, als das sie zum selbigen Zeitpunkt durch die Liegenschaft abgenommen werden kann. Da dieser überproduzierte Strom nicht das interne Netz belasten darf, wird er in das öffentliche Netz eingespeist. Die Biogasanlage dient zur Eigenversorgung der Liegenschaft und wird dementsprechend nicht durch das EEG vergütet. Folglich wird eine Überproduktion als Verlust angesehen, da der Börsenpreis unter dem zu substituierten Preis des genutzten Stroms liegt. Nichtsdestotrotz wird die Überproduktion bei einem überfüllten Gasspeicher als Option gegenüber der Gasfackel gesehen. Die Herausforderung bei der Energieplanung liegt im Austarieren verschiedener Parameter: Es soll möglichst viel Eigenbedarf gedeckt werden und dabei überproduzierter Strom wenn möglich vermieden werden. Dabei müssen die BHKW-Aggregate im Vier-Stunden-Takt auf eine schneller fluktuierende Stromnachfrage reagieren. In Abbildung 39 wird die Überproduktion der Gesamtproduktion der Biogasanlage für die einzelnen Kalenderwochen gegenübergestellt.

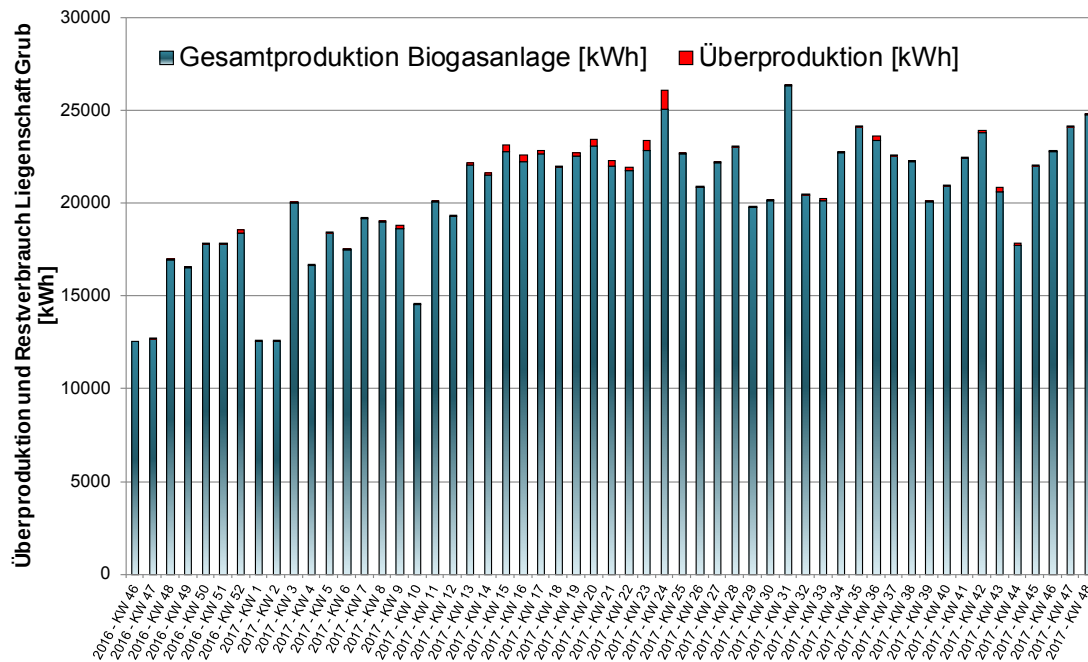


Abbildung 39: Anteil der Überproduktion im Verhältnis zur Stromproduktion in der Liegenschaft Grub

In den meisten Fällen ist die Überproduktion kaum erkennbar. Überproduktionen erfolgen beispielsweise, wenn zu viel Gas vorhanden ist und daher „abgefahren“ werden muss oder bei einer Abweichung der Nachfrage zur getätigten Prognose (inklusive kurzer Schwankungen aus Verhaltensmustern, die sich nicht vorhersagen lässt).

Bewertet man nun die Jahresmenge an überproduzierten Kilowattstunden, so kommt man auf insgesamt 5.994 kWh. Bei einer produzierten Jahresleistung von 1.072.623 kWh kommt man damit auf einen Anteil von nur 0,6 %. Geht man nun von einem Börsenpreis von 3 – 5 Ct kWh⁻¹ mit einem angenommenen Durchschnittswert von 4 Ct kWh⁻¹ aus und stellt man dem den sonst zu substituierten Strompreis von 20,34 Ct kWh⁻¹ (Jahrespreis in Grub für 2017) gegenüber, so kommt man auf einen Verlust von rund 979,42 € a⁻¹. Bei einem Potential von 218.171,52 € an bisher substituierten Stromkosten ist dieser Wert mit einem Anteil von 0,45 % vernachlässigbar.

Die Überproduktion konnte zwar nicht vermieden werden, aber in einem sehr geringen und somit vernachlässigbaren Maße gehalten werden.

4.4.4 Gasverfügbarkeit und –überproduktion

Betrachtet man nun das Planen und die Überwachung der Gasproduktion, so gibt es zwei Extrema, die vermieden werden müssen:

1. Es muss genügend Gas zur Verfügung stehen, sodass der Gasdruck nicht unter 0,5 mbar fallen darf.
2. Es sollte nicht zu viel Gas gespeichert bzw. vorhanden sein. Der Gasdruck steigt folglich an, bis bei 3,0 mbar die Gasfackel anspringt. Sollte diese defekt sein, dann würde im Notfall bei rund 3,5 mbar die mechanische Überdrucksicherung anspringen.

Ein akuter Gasmangel, welcher zum Abschalten der Motoren geführt hat, kam nur sehr selten vor. Stattdessen führte ein Gasmangel zu einer außerplanmäßigen Reduzierung der BHKW-Leistung. Über das Jahr gesehen kam eine Überproduktion wesentlich öfters vor, die zu einem Einsatz der Gasfackel führte. Diese wird in folgender Grafik zusammengefasst:

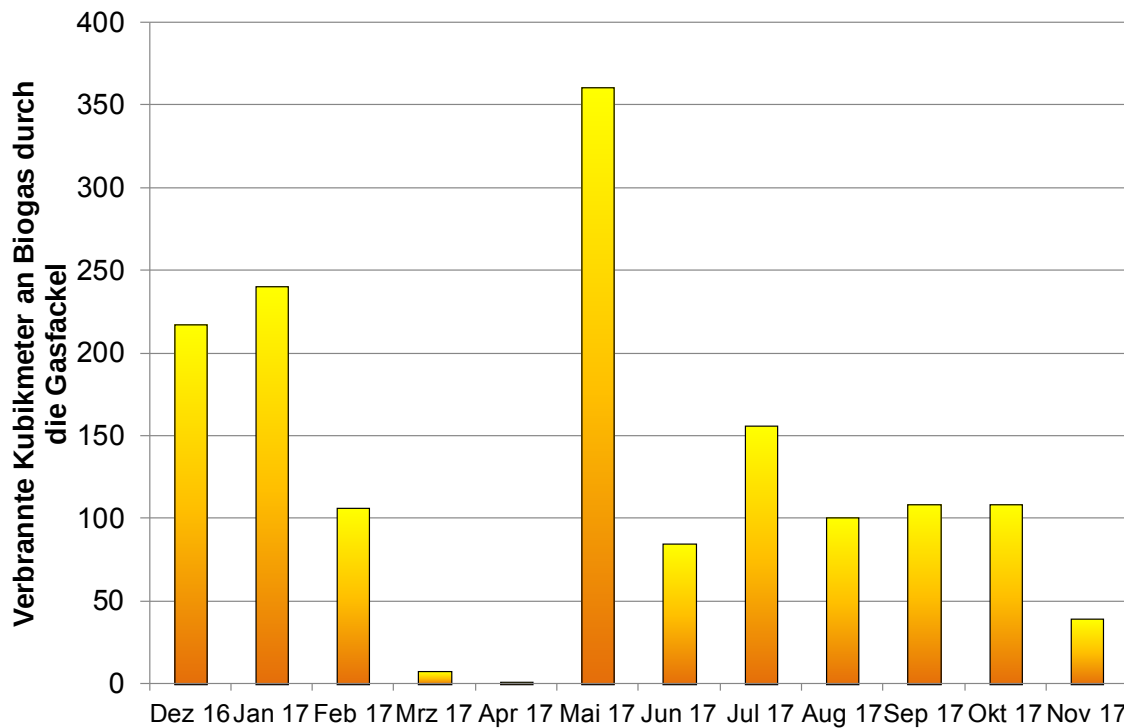


Abbildung 40: Abgefackeltes Biogas auf der Biogasanlage während des Intervallbetriebs

Abbildung 40 zeigt die Monatswerte in Kubikmeter an Biogas an, welche über die Gasfackel verbrannt wurden. Die Ursachen werden im Folgenden zusammengefasst und aufgezählt:

- Gasüberdruck durch einen hohen Gasanfall oder Fehlkalkulation oder außerplanmäßige Gasproduktion (v.a. in der Startphase)
- Gasüberdruck aufgrund von Ausfällen von BHKW-Aggregaten (v.a. im Sommer)
- Überschreiten des Druckgrenzwertes durch das Einfrieren des Drucksensors im Winter
- Überschreiten des Druckgrenzwertes durch einen verdreckten und defekten Sensor im Sommer 2017
- Witterungsverhältnisse im Sommer, welche zum Ausdehnen des Biogases und somit zu einem schnellen Druckanstieg führten
- Schwefelfarbene Verschmutzung am Magnetventil, welches sich zeitweise nicht mehr schließen ließ (Abbildung 41)



Abbildung 41: Ablagerungen/Verschmutzung am Magnetventil vor der Gasfackel

Die Gasfackel ist mit dem Drucksensor verbunden. Dieser befindet sich in der Gasleitung zwischen Fermenter und Gärrestlager und gibt der Gasfackel durch das Überschreiten des Grenzwertes von 3,0 mbar das Signal zum Zünden. Im Normalfall schwankt der interne Druck zwischen einem und zwei Millibar ($\varnothing$ 1,5 mbar). Sobald der Gasspeicher ausgelastet ist, steigt folglich der Druck mit an. Der stärkere Temperaturanstieg im Sommer (z.B. durch Änderung der Wetterlage) führt zum Ausdehnen des Gases und bei vollrem Gasspeicher auch zu einem Druckanstieg. Um Verluste durch die Gasfackel zu vermeiden, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Drucksensoren sollten wärmedämmend sein, insbesondere sofern sie sich in einer windreichen Lage befinden.
- Drucksensoren sollten monatlich geputzt werden und von Wasser befreit sein.
- Bei Schaumbildung sollte darauf geachtet werden, dass dieser nicht in die Leitungen dringt und Magnetventile verschmutzt. Allgemein sollten Magnetventile öfters überprüft und gegebenenfalls gesäubert werden.
- Bei der Umstellung auf eine höhere Gasproduktion oder ein anderes Substrat sollte das Gasverhalten während der Anfangsphase strenger überwacht werden, ehe sich Erfahrungswerte ableiten lassen.
- Bei BHKW-Ausfällen sollte die Stillstandszeit abgeschätzt werden und entsprechend die Substratzufuhr verringert werden.
- Im Sommer und gerade bei starken Temperaturschwankungen sollte der Gasspeicher nicht zu voll sein. Wie bereits erwähnt, sollte der Maximal-Wert von 70 % der Füllmenge im Gasspeicher an heißen Sommertagen nicht überschritten werden.

4.5 Thermische Energie

Obwohl in der Aufgaben- und Zielstellung des Projektes ausschließlich die Betrachtung der Stromproduktion definiert wird, wurden zusätzlich die Produktion der thermischen Energie bzw. Wärmeproduktion betrachtet. Die produzierte Wärme auf einer Biogasanlage ist ein wichtiger Bestandteil der Energieproduktion, welcher in der Praxis häufig aufgrund von strukturarmen Voraussetzungen zu wenig verwendet wird. Die Vergütung zielt in der Praxis auf die Stromproduktion ab, jedoch wird die zusätzliche Abnahme bzw. Verkauf der Wärme ein immer wichtigeres Thema, da im Zuge der Ausschreibung die Biogasanlagen eine geringere Stromvergütung anbieten müssen. Doch auch in Grub ist die

Wärmeproduktion ein wichtiges Thema. Im Augenblick wird ein Teil der Wärmeproduktion für die Beheizung von drei Bürogebäuden verwendet. Außerdem wird der Fermenter beheizt, damit die Mikroorganismen ein geeignetes Klima zur Methanproduktion vorfinden. Die Fermenter werden auf allen Biogasanlagen ausschließlich durch die BHKW-Wärme beheizt.

Um das Gesamtpotential der thermischen Bruttoleistung zu erschließen, wurde die Jahresleistung vom Grundlast-BHKW analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass entgegen der Angaben des Herstellers von 104 kW thermischer Leistung 114 kW gemessen wurde. Es wird vermutet, dass das Verzichten auf eine Luftkühlung (Nebenaggregat) zu einer Erhöhung der thermischen Leistung führte. Durch seine Größe kann das Spitzenlast-BHKW laut Herstellerangaben eine höhere Gesamtwärmeleistung von 239 kW erreichen. Tatsächlich wurde über die Wärmemengenzähler ein Wert von rund 286 kW thermischer Leistung gemessen (siehe Tabelle 11). Somit steht eine Gesamtwärmeleistung von insgesamt 400 kW zur Verfügung, gesetzt beide Motoren laufen gleichzeitig unter Volllast. Das Spitzenlast-BHKW läuft jedoch meist alleine und kann bis zu einer elektrischen Leistung von 122 kW gedrosselt werden. Die thermische Leistung wurde für Volllast sowie 60 % Teillast gemessen und in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Volllast mit 60 % Teillast des Spitzenlast-BHKW zur Erschließung eines thermischen Leistungsprofils

Parameter – Spitzenlast-BHKW	Volllast	Teillast 60 %	Einheit
Max über Messzeitraum	201,13	123,63	kW _{el}
Schnitt über Messzeitraum	199,62	121,50	kW _{el}
Min über Messzeitraum	198,25	119,06	kW _{el}
Messdatum	18.03.2017	11.04.2017	
Messzeitraum	3,5	24	Std.
Thermische Energie (ohne Leitungsverluste)	1000,00	4200,00	kWh _{th}
Thermische Leistung	285,71	175,00	kW
Verhältnis Leistung Wärme/Strom	1,43	1,44	
Durchschnittsverbrauch (Tabelle 10)	104,10	69,80	Nm ³ /h
Effizienz Strom (unter Normbedingungen)	1,92	1,74	kW _{el} m ⁻³
Effizienz bei Wärme (unter Normbedingungen)	2,74	2,51	kW _{th} m ⁻³
Verlust der Effizienz bei Strom		9,22	%
Verlust der Effizienz bei Wärme		8,65	%
Elektrischer Wirkungsgrad (Tabelle 10)	34,2	29,0	%
Thermischer Wirkungsgrad	53,3	49,0	%
Verlust el. Wirkungsgrad (%Punkte, absolut)		5,2	%
Verlust th. Wirkungsgrad (%Punkte, absolut)		4,3	%

Während die thermische Leistung unter Volllast 286 kW beträgt, liegt sie unter 60 % Teillast noch bei 175 kW. Zudem scheint der Verlust der Effizienz bei 60 % Teillast bei der Wärmeproduktion mit 8,65 % etwas geringer zu sein als bei der Stromproduktion mit 9,22 %. Hinzu kommt noch, dass der Anteil an Nebenaggregaten den Wirkungsgrad weiter reduziert, während bei der Wärmeproduktion keine Eigenaggregate am Motor versorgt werden müssen. So liegt der Verlust in Prozentpunkten bei 60 % Teillast gegenüber Volllast beim thermischen Wirkungsgrad nur bei 4,3 %, wohingegen der elektrische Wirkungsgrad 5,3 % aufweist. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch der thermische Wirkungsgrad wie der elektrische Wirkungsgrad sinkt, jedoch geringere Verluste unter Teillast zu verzeichnen sind.

Fasst man nun das Spektrum der Fahrweisen zusammen, so sollte sich die thermische Leistung der Biogasanlage in Grub hauptsächlich zwischen 175 kW und rund 286 kW bewegen (Spitzenlast-BHKW) mit der Option auf eine Gesamtleistung von bis zu 400 kW thermischer Leistung. Falls beispielsweise das Spitzenlast-BHKW gewartet werden müsste und nur das kleine Aggregat läuft, liegt die Produktion immer noch bei 114 kW thermischer Leistung.

Bezieht man die Jahreszahlen aus Abbildung 48 in Kapitel 4.6.3, so lässt sich eine Jahrestromproduktion von insgesamt 1.415.050 kW ermitteln. Bei einer angenommenen Betriebsstundenanzahl von 8.322 Bh (geschätzte Verfügbarkeit 95 %) ergibt sich eine Bemessungsleistung der thermischen Energie von 170 kW. Es wird davon ausgegangen, dass das Verhalten der Stromnachfrage sich proportional zu der Nachfrage an Wärme verhält, da Wärme ähnlich wie beim Strom hauptsächlich zur Arbeitszeit benötigt wird. Die Biogasanlage würde dementsprechend ein ähnliches Wärmeprofil bzw. Deckungsmuster abfahren.

Bisher wurde die Bruttowärmeleistung berechnet. Während des Intervallbetriebs in 2017 stand tatsächlich weniger Wärme zur Verfügung, da auch Wärme für den Fermenter und bereits für das Nahwärmenetz verwendet wird. Diese werden in der folgenden Abbildung dargestellt:

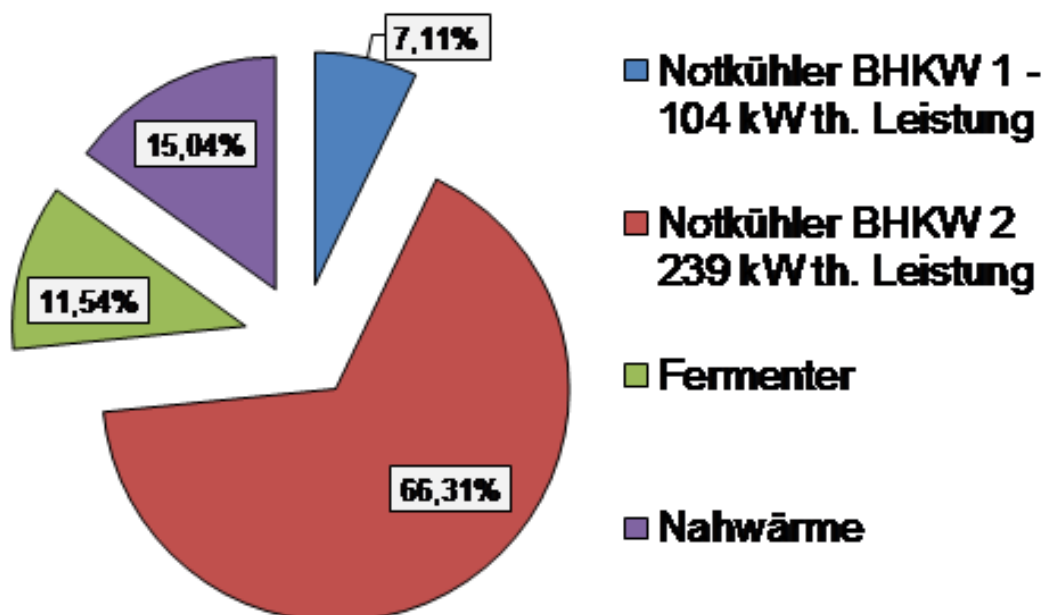


Abbildung 42: Prozentuale Verteilung der genutzten Wärme (Fermenter, Nahwärme) und der ungenutzten Wärme (Notkühler)

In Abbildung 42 wird ersichtlich, dass jeweils 15,04 % für das Nahwärmenetz und 11,54 % für den Fermenter verwendet werden. Letzteres fällt unter den Eigenverbrauch der Biogasanlage und stellt einen äußerst geringen Wert für eine Biogasanlage mit einem Gülleanteil von 50 bis 60 % dar. Dies ist zum einen auf die mesophile Betriebsweise im Fermenter zurückzuführen, welche eine geringere Temperatur (ca. 40-42 °C) benötigt als eine thermophile Betriebsweise ($> 50\text{ °C}$). Zum anderen ist der Fermenter mit einem Betondeckel ausgestattet und im Erdreich versenkt, was eine zusätzliche sowie natürliche Isolierung gewährleistet.

Der Rest der ungenutzten Wärme von insgesamt 73,42 % geht über die Notkühler verloren. Diese Wärme stünde neben der bereits genutzten Wärme für das Nahwärmenetz für weitere Nutzungszwecke zur Verfügung. Zählt man das bereits erschlossene Nahwärmenetz hinzu kommt man auf 88,46 %. Im Jahr stünden somit weitere 1.251.753 kWh an thermischer Energie für das Nahwärmenetz zur Verfügung, was bei optimaler Nutzung einem Aggregat/Anlage mit einer Bemessungsleistung von knapp 143 kW thermischer Leistung gleich käme. Laut dem Bauamt Rosenheim⁴ liegt der Jahresverbrauch der Liegenschaft bei ca. 2.500 MWh a⁻¹. Zusammen mit der bereits ausgebauten Fernwärmeleitung könnte bis zu 50 % der Liegenschaft versorgt werden.

Da sich die Verbräuche bzw. genutzte Energie auf der Biogasanlage durch die Nachfrage bzw. Witterungsverhältnisse sowie Jahresverlauf der Umgebungstemperatur unterscheiden, wird in Abbildung 43 eine detaillierte Ansicht der Verbräuche über das Jahr verteilt vorgestellt.

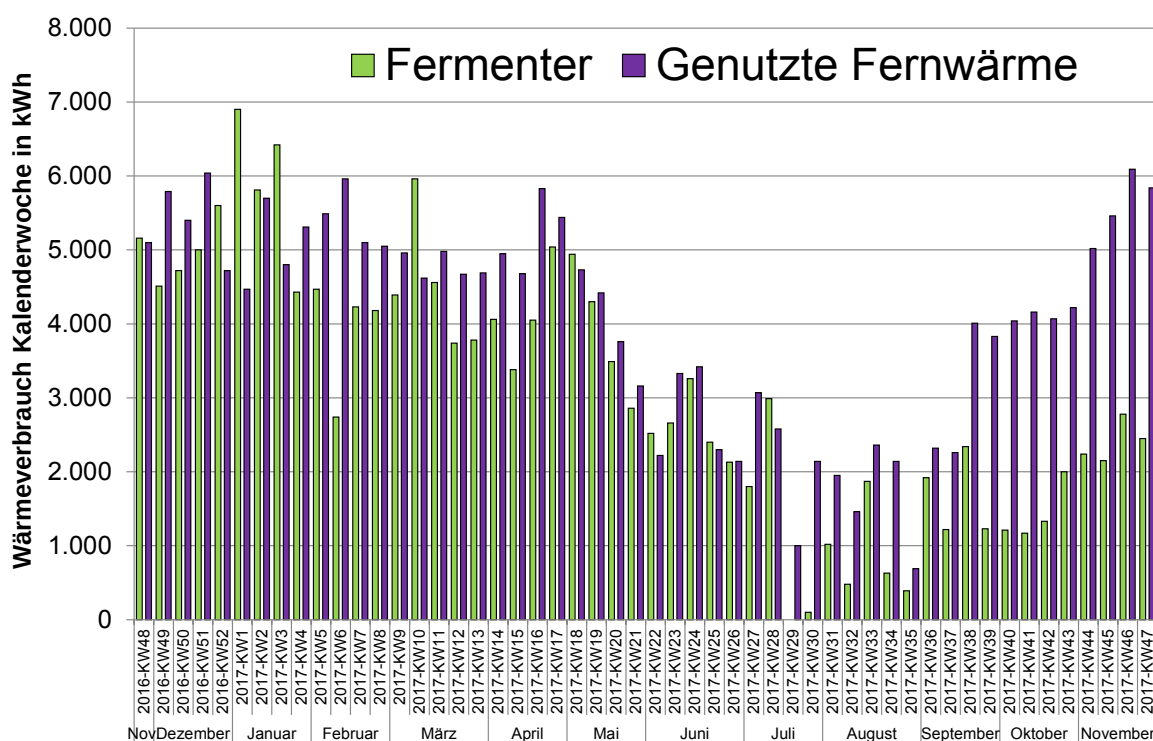


Abbildung 43: Verlauf des wöchentlichen Wärmebedarfs des Fermenter sowie Fernwärme

⁴ E-Mail Korrespondenz mit Herrn Pfisterer

Zwischen November 2016 und April 2017 ist die genutzte Wärme im Fermenter und durch die angeschlossenen Bürogebäude größer, wohingegen zwischen Juni und Juli die Verbräuche stark zurückgehen. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Monatsmitteln aus der Meteorologie-Station in Grub (LfL) in Abbildung 44, so lässt sich dieses Verhalten mit der Umgebungstemperatur erklären, denn eine höhere Umgebungstemperatur führt zu einer geringeren Wärmenutzung. Dies wird gerade beim Fermenter deutlich. Bei einem Monatsmittel von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Januar stieg der Wert bis zu 7.000 kWh pro Woche an, während bei einem Monatsmittel Juli von $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ für eine gesamte Woche keine Kilowattstunde nötig war.

Betrachtet man in Abbildung 43 Kalenderwoche 33 bis 47 in 2017 und vergleicht diese mit den Wintermonaten ab Kalenderwoche 48 (2016), so fällt auf, dass die Verbrauchswerte des Fermenters im November 2017 wesentlich niedriger als der Referenzwert in November 2016 sind, obwohl der Verbrauch am Nahwärmenetz ähnlich war wie im Vorjahr. Dies liegt nahe, dass entweder durch den um ca. zwei Prozent erhöhte TS-Gehalt im Fermenter zu dieser Verbrauchsreduzierung führte. Ein weiterer Grund ist die erhöhte Umgebungstemperatur im Jahr 2017, welche aus den meteorologischen Daten aus der Messstation in Grub (Abbildung 44) ersichtlich wird. Dies führt jedoch zur Annahme, dass das Wärmeverhalten im Jahr 2017 nicht den Witterungsverhältnissen angepasst wurde und noch optimiert werden müsste.

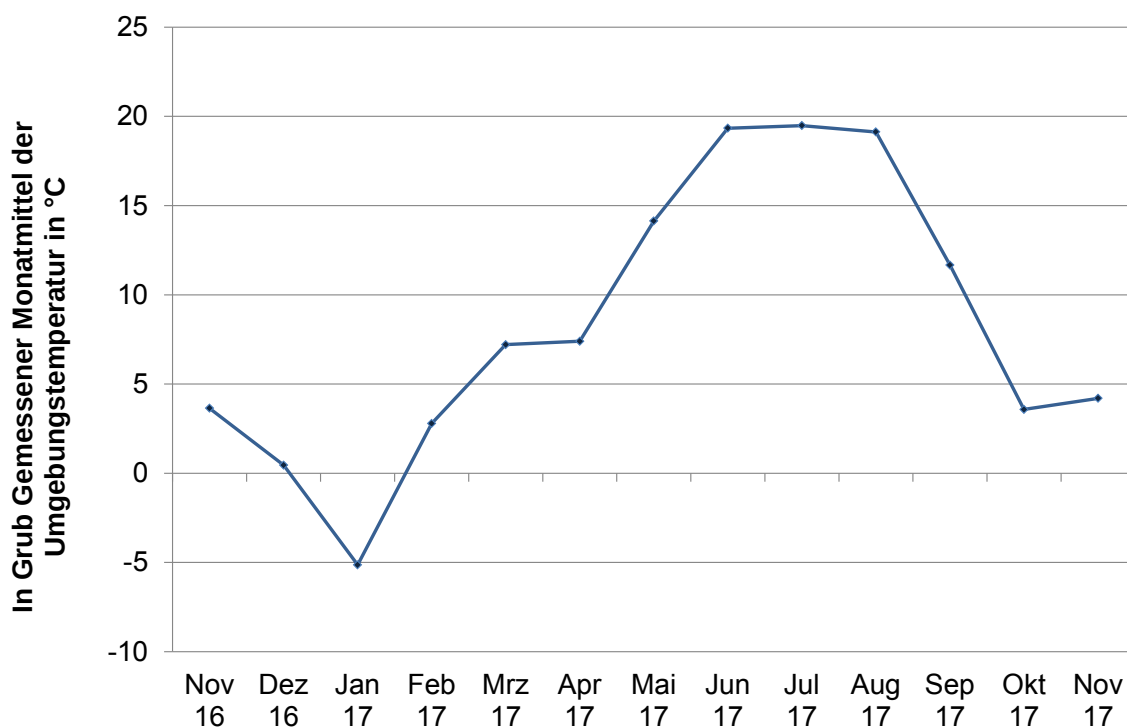


Abbildung 44: Die auf der Meteorologie-Station in Grub (LfL) Vorort gemessenen sowie errechneten Monatsmittel der Umgebungstemperatur

In folgender Abbildung 45 werden zu den bisherigen Angaben aus Abbildung 43 (Fermenter und Nahwärmenutzung) zusätzlich die Energieleistung der Notkühler beider BHKW-Aggregate vorgestellt.

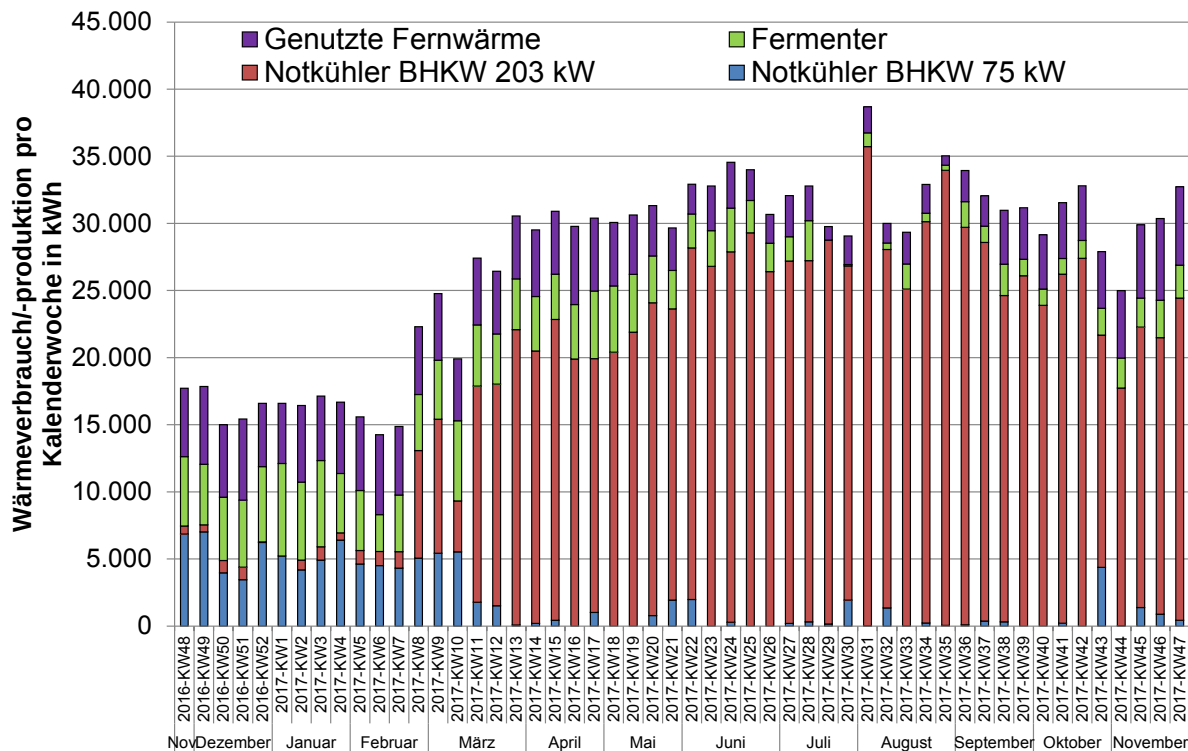


Abbildung 45: Wöchentliche Wärmeverbräuche sowie Gesamtproduktion der Biogasanlage

Die Summe der einzelnen Parameter ergeben für den jeweiligen Balken die gesamte Wochenleistung (Verluste im Nahwärmenetz sind bereits berücksichtigt). Auffällig ist, dass der Anteil am Notkühler des Grundlast-BHKW über Zeit sinkt, während der Anteil des Notkühlers des großen Motors immer mehr zunimmt und zum Anstieg der Gesamtleistung beiträgt. Dies ist auf den verstärkten Einsatz des Spitzenlast-BHKW zurückzuführen, welcher das Grundlast-BHKW immer mehr ablöst. Durch die immer intensivere Stromproduktion über verbesserte Fahrprofile steigt auch die thermische Leistung mit an, was sich in der erhöhten Wochenleistung bemerkbar macht. Der Verbrauch hat sich seit dem Grundlastbetrieb jedoch nicht erhöht. Deswegen wird der Zuwachs an thermischer Leistung über den Notkühler in die Atmosphäre abgelassen und bleibt ungenutzt. Zukünftig soll diese „verlorene“ Energie durch den Ausbau eines Wärmenetzes genutzt werden. Durch den erhöhten Produktionsanteil sinkt auch der Eigenverbrauchsanteil des Fermenters.

In Abbildung 46 werden die Mittelwerte der Tagesproduktionen der einzelnen Wochentage präsentiert inklusive deren jeweiligen Minima und Maxima. Die Ergebnisse wurden für die zweite Jahreshälfte (Kalenderwoche 22 bis 47, 2017) des Intervallbetriebs gewählt, da in dieser Zeit die größten Optimierungsschritte stattgefunden haben und für zukünftige Analysen aussagekräftiger sind. Insgesamt ist die Wärmeproduktion während der Woche höher als am Wochenende. Die durchschnittliche Tagesproduktionsrate liegt bei rund 4.274 kWh d^{-1} .

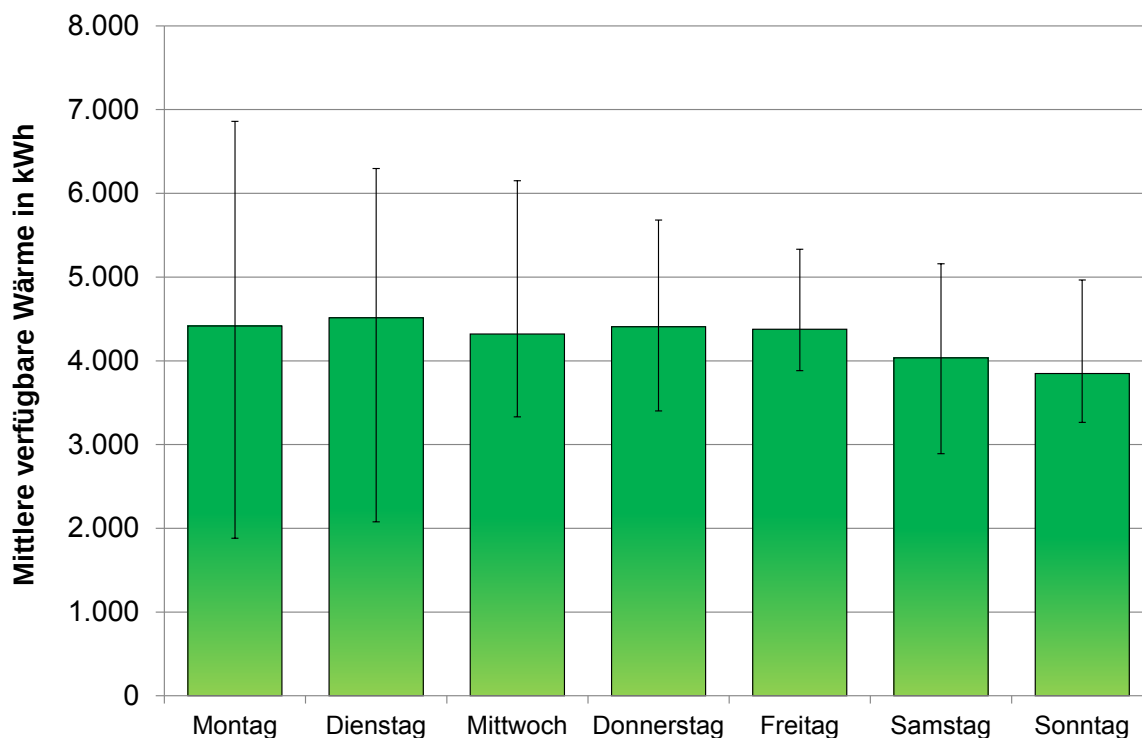


Abbildung 46: Mittelwerte aller Wochentage inklusive Minima und Maxima (als Fehlerindikatoren dargestellt) der verfügbaren Wärme seit der optimierten Fahrweise (Kalenderwoche 22 – 47, Halbjahresmessung)

4.6 Kennzahlen im Grundlast- und Intervallbetrieb

Die Versuchs-Biogasanlage konnte erfolgreich für über ein Jahr lang Strom bedarfsgerecht und flexibel im Intervallbetrieb produzieren. Dabei konnten neue Erkenntnisse erworben werden. Dieses Kapitel stellt ermittelte Jahreswerte vor, welche mit den Daten aus dem Grundlastbetrieb verglichen werden. Des Weiteren werden auch Kennzahlen, die während des Intervallbetriebs erworben wurden, vorgestellt.

4.6.1 Substrateinsatz und –eigenschaften

Durch die Erprobung des Intervallbetriebs auf der Liegenschaft Grub konnte die Bemesungsleistung erfolgreich erhöht werden. Es wurden wochenweise Werte von bis zu 160 kW_{el} erreicht. Das führt jedoch zu einem erhöhten Energiebedarf und damit zu einem stärkeren Einsatz von energiereichen Substraten wie Mais und Zuckerrüben.

In Tabelle 12 werden die jährliche Substratmengen des Intervallbetriebs 2017 vorgestellt und mit den Kennzahlen aus dem Grundlastbetrieb (2015 und 2016) verglichen. Der erhöhte Einsatz an energiereichen Substraten macht sich vor allem durch den erhöhten Maisseinsatz bemerkbar, in dem 780 Tonnen mehr als im Vorjahr eingesetzt wurden. Unter der Rubrik „Sonstiges“ wurden Substrate wie CCM, Zuckerrübenschnitzel sowie Reste aus Mist und Zuckerhirse aufgenommen. Auch hier ist ein Zuwachs von 242 Tonnen im Vergleich zum Vorjahr zu erkennen. Obwohl mehr energiereiches Substrat während des Intervallbetriebs eingesetzt wurde, liegt der Anteil von Gülle und Mist bei rund 72 %. Weitere anfallende Reststoffe (z.B. unbrauchbares Futter, kleiner Anteil) sind hierbei nicht explizit erfasst worden.

Tabelle 12: Jährlicher Substrateinsatz während des Grundlast- und Intervallbetriebs in Grub

Parameter	2015	2016	2017
Lastmanagement	Grundlastbetrieb	Grundlastbetrieb	Intervallbetrieb
Substrate	6.413	5.010	7.051
Anteil Gülle und Mist	93,4 %	83,5 %	71,9 %
Gülle	5.019	3.285	3.824
Mist	972	900	931
Mais	287	277	1.057
Gras	20	60	54
Sonstiges	115	38	280
Zuckerrübenmus (Schätzung)	0	300	470

4.6.2 Kennzahlen Zuckerrübe – Verarbeitung und Lagereigenschaften

Zuckerrübenmus oder –schnittel sind als Energiesubstrat ein wichtiger Bestandteil zur flexiblen Strombereitstellung. Hierfür ist eine geeignete Lagerung und Aufbereitung notwendig. Im Folgenden werden Kennzahlen aus der Verarbeitung und Lagerung vorgestellt.

4.6.2.1 Verarbeitung

Nach der Ernte werden die Zuckerrüben in Form einer Miete auf dem Hof zwischengelagert. Wenige Tage nach der Zwischenlagerung am Hof werden die Zuckerrüben entsteint (gewaschen). Dabei wurden Proben aus fünf verschiedenen Bereichen der Miete vor und nach der Zuckerrübenwäsche entnommen und bei der Südzucker AG zur Untersuchung eingereicht. Die Ergebnisse zur Qualitätsbestimmung aus dem Labor werden in Tabelle 13 für 2016 und Tabelle 14 für 2017 aufgelistet.

Tabelle 13: Qualitätsbestimmung der Zuckerrüben aus der Zuckerrübenernte und -wäsche 2016

Variante	Analyse am	Proben-Nr.	Polarisation	Kalium	Natrium	Stickst.	Ionenb.
ungewaschen	15.11.2016 10:38	914230	22,4	37,2	1,7	11,2	-10,9
ungewaschen	15.11.2016 10:38	914231	21,7	39,4	1,7	13,5	-10,2
ungewaschen	15.11.2016 10:39	914232	20,2	36,5	1,7	12,1	-12,1
Mittelwert:			21,4	37,7	1,7	12,3	-11,1
Nach Wäsche:	15.11.2016 10:37	914227	22,2	39,0	2,0	13,0	-10,0
Nach Wäsche:	15.11.2016 10:37	914228	21,8	38,0	1,7	13,0	-11,2
Nach Wäsche:	15.11.2016 10:38	914229	22,0	37,6	1,6	12,8	-11,6
Mittelwert:			22,0	38,2	1,8	12,9	-10,9

Tabelle 14: Qualitätsbestimmung der Zuckerrüben aus der Zuckerrübenernte und -wäsche 2017

Variante 28.10.2017	Proben-Nr.	Polarisation	Kalium	Natrium	Stickst.	Ionenb.
ungewaschen	914398	21,2	37,9	1,6	24,5	-17,94
gewaschen	914206	19,7	35,2	1,1	15,2	-15,56

Der Zuckergehalt (Polarisation) aller Proben bewegte sich zwischen 19,7 und 22,4 %. Ein Einfluss der Wäsche auf die Qualität der Zuckerrüben ließ sich in beiden Jahren nicht feststellen.

4.6.2.2 Substrateigenschaften und Lagerung

Nach dem Einmüssen der Zuckerrüben in den Zuckerrübenbehälter mussten die Zuckerrüben für drei bis vier Monate gelagert werden, ehe die Masse pumpfähig wurde. Während des Einsatzes des Muses im Intervallbetrieb wurde ein Entnahmehahn installiert, um Proben zu entnehmen. Diese wurden anschließend eingefroren und im Herbst 2017 in Batch-Tests auf ihr Methanertragspotential untersucht. Die Ergebnisse der untersuchten Proben werden in Tabelle 15 dargestellt.

Bei geschlossenen Lagersystemen für Zuckerrübenmus und der resultierenden geringeren Sauerstoffverfügbarkeit sind die Masseverluste bei Hochsilos geringer als bei nicht abgedeckten Lagunen. Bei offenen Systemen werden nach Literaturangaben in den oberen Schichten bis 75 cm Tiefe oTS-Verluste mit 30 bis 45 % erwartet, während unter dieser Deckschicht die oTS-Verluste zwischen 10 und 18 % liegen (KTBL, 2017). Aus diesem

Grund wurde in Grub bewusst ein tiefer Lagerbehälter gewählt, um die relative Oberfläche möglichst gering zu halten. Die Proben wurden unterhalb der Deckschicht entnommen, welche schätzungsweise nur ca. 30 cm tief war. Die Deckschicht dient als Schutz für das darunter gelagerte Mus.

Betrachtet man nun die Biogasausbeute pro kg Frischmasse und nimmt den Mittelwert der Biogasausbeute pro Frischmasse der frisch entnommenen Proben (Oktober 2016, zwei Wiederholungen), so lassen sich im Verlauf der Lagerung Verluste von rund 25 bis 41 % feststellen. Obwohl eine starke Abnahme des TS-Gehalts über Zeit festzustellen ist, können keine Aussagen über die Energieverluste getroffen werden. Grund hierfür ist die mögliche Bildung von Alkoholen und Säuren während gleichzeitiger Abnahme der Frischmasse, welche im Biogasprozess auch Methan erzeugen (Die Massenverluste des gesamten Silos sind unbekannt). Erwähnenswert ist noch der hohe Anteil an Methan aus der Gasproduktion, welcher über dem durchschnittlichen Methangehalt liegt und somit je nach Substrateinsatz zu einer etwas besseren Gasqualität im Biogasbildungsprozess führen könnte.

Tabelle 15: Eigenschaften von Zuckerrübenmus während der Lagerdauer

Beschreibung	TS-Gehalt [% FM]	oTS-Gehalt [% TM]	Biogas- ausbeute [l _N kg ⁻¹ oTS]	Biogas- ausbeute [l _N kg ⁻¹ FM]	Verlust [%]	CV [%]	St. Abw.	St. Fehler	Methan- thangeh. [%]
ZR-Ernte Okt '16 frisch P1	21,99	91,13	784	157,1	-	9	72	42	54,5
ZR-Ernte Okt '16 frisch P2	22,32	92,44	825	170,2	-	8	67	39	54,1
ZR1 25.07.17	18,51	90,77	727	122,1	25	3	27	15	54,3
ZR2 04.08.17	16,80	83,88	757	106,7	35	6	46	26	56,8
ZR3 23.08.17	14,59	88,09	752	96,6	41	1	9	5	54,1
ZR4 20.09.17	16,44	89,85	721	106,5	35	2	15	9	55,7

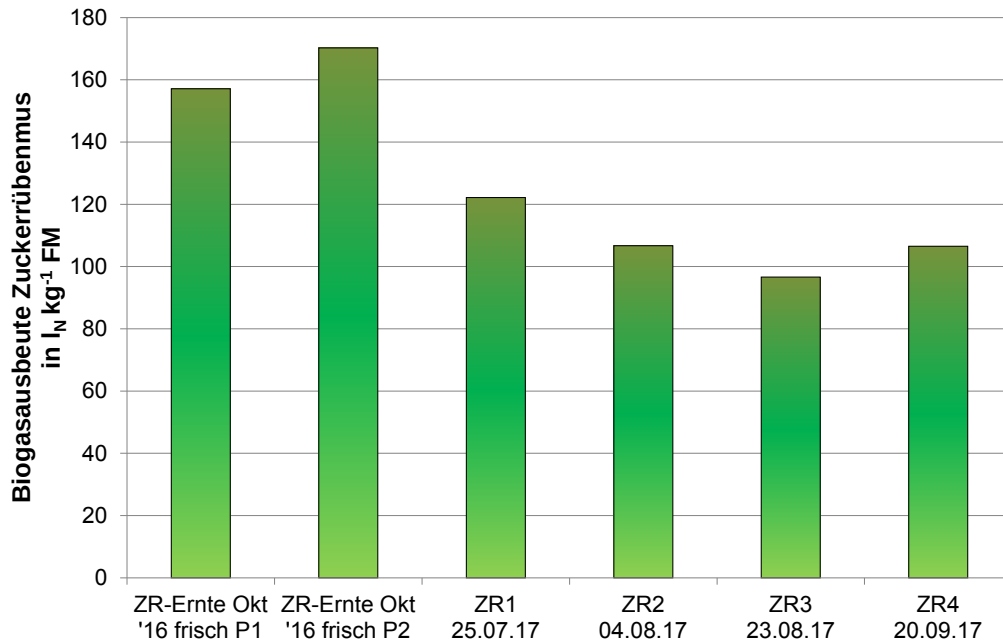


Abbildung 47: Biogasausbeute verschiedener entnommener Proben aus der Lagerung von Zuckerrübenmus (Ergebnisse aus Tabelle 15)

4.6.3 Gesamtproduktion und Eigenverbrauch

Wie bereits erwähnt konnte durch das Hinzuziehen eines Spitzenlast-BHKW, welcher in Voll- bis 60 % Teillast gefahren werden konnte, gegenüber dem Grundlastbetrieb die Bemessungsleistung gesteigert werden. Die durchschnittliche Bemessungsleistung der Biogasanlage stieg von ursprünglich 75 kW elektrischer Leistung im Grundlastbetrieb auf 123 kW elektrische Leistung im Intervallbetrieb an. Nimmt man die Bemessungsleistung seit der optimierten Fahrweise ab Kalenderwoche 21 (2017), so lässt sich eine durchschnittliche Bemessungsleistung von rund 132 kW elektrischer Leistung ermitteln. In Abbildung 48 werden nun die Jahreskennzahlen der Strom- und Wärmeproduktion sowie der Betriebsstromverbrauch und Anteil der Wärmenutzung für die Kalenderjahre 2015 und 2016 (Grundlastbetrieb) sowie 2017 (Intervallbetrieb) vorgestellt und miteinander verglichen.⁵

⁵ Die Jahresmessung bezieht sich von Ende November 2016 bis Ende November 2017, während für den Grundlastbetrieb 2016 die Werte auf 12 Monate hochgerechnet wurden.

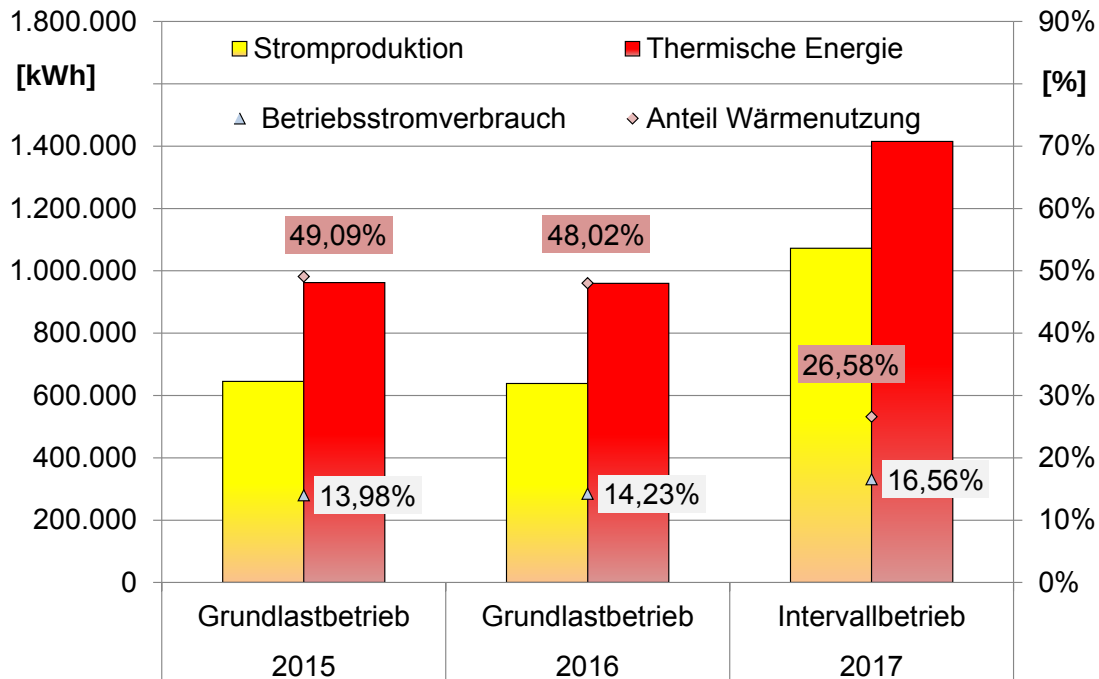


Abbildung 48: Jahreswerte für Strom und Wärmeproduktion sowie Eigenbedarf während des Grundlast- und Intervallbetriebs

Im Grundlastbetrieb ergaben sich in 2015 bei einer Auslastung von 98,22 % 645.287 kWh elektrische Arbeit sowie 962.370 kWh thermische Arbeit, während in 2016 bei einer Auslastung von 97,18 % 638.503 kWh elektrische Arbeit sowie 959.575 kWh thermischer Arbeit ermittelt wurden. Durch die erhöhte Einsatzleistung im Intervallbetrieb stieg die jährliche Stromproduktion auf 1.072.623 kWh sowie die Wärmeproduktion auf 1.415.050 kWh an. Durch den Anstieg der Wärmeproduktion bei einer unveränderten Wärmenutzung sinkt der Anteil der genutzten Wärmeenergie von 49,09 bzw. 48,02 % in den Vorjahren auf 26,58 % im Intervallbetrieb. Somit bleibt knapp Dreiviertel der Energie ungenutzt und geht über den Notkühler verloren. In Zukunft soll auch diese Energie genutzt werden.

Der elektrische Eigenverbrauch der Biogasanlage steigt von rund 14 % (13,98 – 14,23 %) im Grundlastbetrieb bei einer Bemessungsleistung von 75 kW auf 16,56 % im Intervallbetrieb, obwohl die Bemessungsleistung von ursprünglichen 75 kW auf 123 kW elektrischer Leistung im Intervallbetrieb ansteigt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Größe der Produktionsleistung nicht zwangsläufig zu einer Reduzierung des Eigenverbrauchs führt. Dieser Zusammenhang wird in dem nächsten Kapitel genauer erläutert.

4.6.4 Der Anteil des Eigenverbrauchs an der Stromerzeugung der Versuchs-Biogasanlage in Grub

Um die Veränderung des Eigenverbrauchs zwischen dem Grundlastbetrieb und dem Intervallbetrieb verstehen zu können, wird der elektrische Eigenverbrauchsmix des Grundlastbetriebs 2015 mit 13,98 % und mit dem Ergebnis aus dem Intervallbetrieb von 2017 mit

einem Anteil von 16,56 % verglichen. In Abbildung 49 wird nun die Zusammensetzung (%-Anteile) der Nebenaggregate aus 2015 vorgestellt.

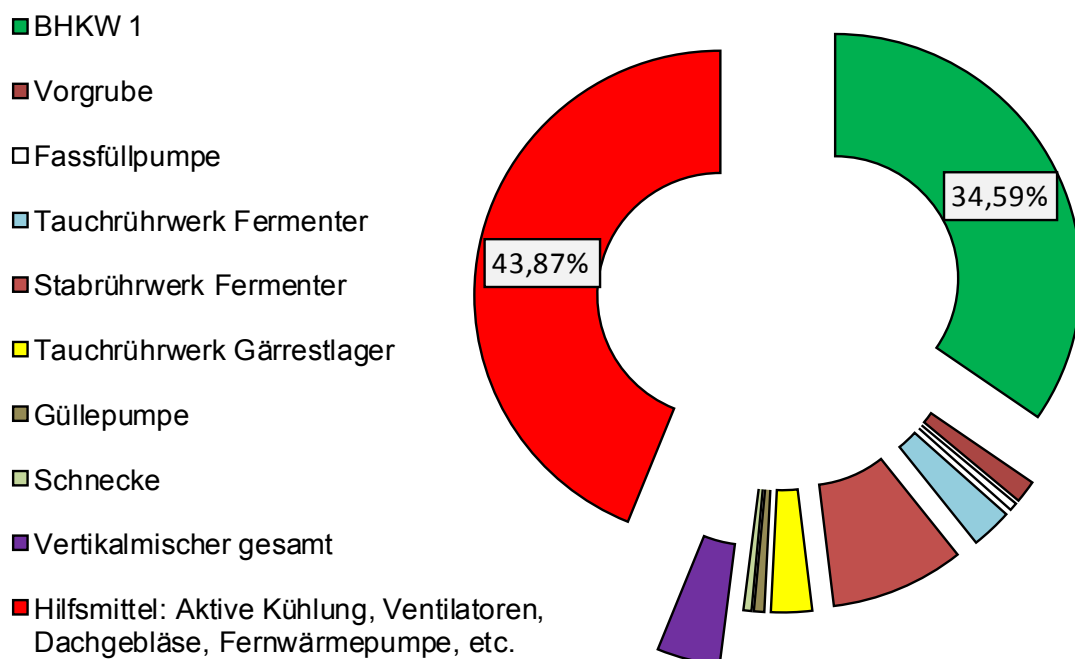


Abbildung 49: Zusammensetzung der der %-Anteile (Leistung) der Nebenaggregate der Biogasanlage während des Grundlastbetriebs 2015

Das Grundlast-BHKW weist als einziges Aggregat den größten Anteil von 34,59 % auf. Unter der Rubrik „Hilfsmittel“, welche 43,87 % des Gesamteigenverbrauchs ausmachen, fallen alle Hauptabnehmer wie Aktive Kühlung (ab Intervallbetrieb), Ventilatoren im BHKW-Raum, Fernwärmepumpen, Dachgebläse sowie Beleuchtung und Computer- und Messtechnik. Unter den restlichen 21,54 % wurden die Rührwerke, Vertikalmischer und Pumpen/Schnecken aufgezeichnet. Das Stabrührwerk weist dabei den größten Anteil auf, da es am meisten eingesetzt wurde.

Betrachtet man nun die Zusammensetzung (in %-Anteile) der Nebenaggregate von 2017 in Abbildung 50, so fällt eine neue Verteilung auf. Der Anteil durch die BHKW-Aggregate steigt auf 40,2 %, wovon 28,7 % auf das Spitzenlast-BHKW und 11,5 % auf das Grundlast-BHKW aufzuteilen sind. Dies entspricht ungefähr der Aufteilung der Fahrzeiten beider Motoren. Durch das Hinzuziehen eines Vertikalmischers mit doppelten Fassungsvermögen steigt dessen Anteil auf 20,5 % an. Im Vergleich zum alten Vertikalmischer mit rund 3.738 kWh a^{-1} (2015) benötigt der gegenwärtige seit der Inbetriebnahme am 8. März 2017 insgesamt $36.470 \text{ kWh a}^{-1}$ an Strom. Bei einer geschätzten Arbeitszeit für diesen Zeitraum von rund 587 Bh läge die Leistungsabnahme bei einem recht hohen Wert von rund 62 kW Leistung. Für einen Kauf eines Vertikalmischers wird empfohlen, zukünftig die variablen Kosten (Stromverbrauch) zusätzlich zu dem Kaufpreis mit einzubeziehen, da letztendlich die Gesamtkosten höher ausfallen könnten als das der Kaufpreis anfangs den Anschein gibt. Durch den erhöhten Anteil der genannten Aggregate sinkt der relative Anteil der Hilfsaggregate auf 28,9 %, obwohl nun zusätzlich die aktive Kühlung (kleiner Verbraucher) hinzugekommen ist. Durch die genannten Abnehmer fallen weitere

wichtige Aggregate wie Rührwerke und Pumpen im Eigenverbrauch nicht ins Gewicht, obwohl diese im Intervallbetrieb öfters eingesetzt werden (Vergleiche dazu Kapitel 4.2.2).

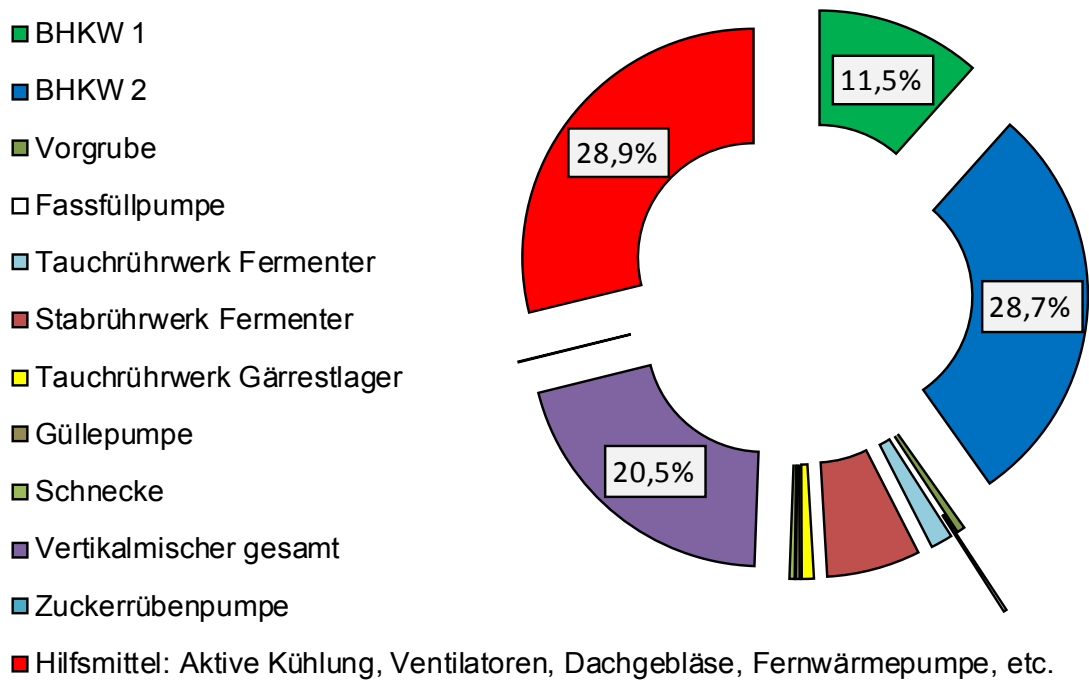


Abbildung 50: Zusammensetzung der %-Anteile (Leistung) der Nebenaggregate der Biogasanlage während des Intervall-Betriebs 2017

Aus der Analyse auf der Biogasanlage Vorort konnten neue Erkenntnisse erworben werden, wie der Eigenverbrauch weiter reduziert werden kann. Diese Empfehlungen sind im Folgenden aufgelistet:

- **Wärmenutzung der Wärme aus dem Notkühler:** Die Wärme, die über den Notkühler verloren geht, könnte durch ein Nahwärmenetz oder einer thermischen Nahverstromung (ORC-Anlage) genutzt werden. Dies bringt den weiteren Vorteil, dass auf die Nutzung des Notkühler (gesehen als Nebenaggregat des BHKW) weitestgehend verzichtet werden kann. Dies könnte die Leistung um rund weitere zwei Kilowatt reduzieren.
- **Verrohrung des Heizkreislafs der BHKW-Motoren:** Auf der Versuchs-Biogasanlage in Grub wurde der Wärmekreislauf des Spitzenlast-BHKW nicht mit dem Zentralverteiler des Wärmenetzes, sondern über den Kreislauf des Grundlast-BHKW verbunden. Dies hat dazu geführt, dass bei Stillstandszeiten des Grundlast-BHKW trotzdem die große Heizkreislaufpumpe laufen muss, damit die Wärme des großen Motors an den Verteiler weitergeleitet wird. Dies ließe sich durch eine unkomplizierte Verrohrung des Heizkreislafs auf den Hauptverteiler lösen. Dadurch könnte eine kleiner dimensionierte Pumpe von 200 Watt die ursprünglich zwei Kilowatt große Pumpe des kleinen Motors ersetzen.
- **Ventilatoren BHKW-Raum:** Damit die Motoren effizient und ohne Probleme laufen können, sollte die Umgebungstemperatur im BHKW-Raum gut durchlüftet bzw. kühl gehalten werden. Da in kalten Wintermonaten eine kühle Umgebungstemperatur vorherrscht, welche durch einen natürlichen Luftaustausch durch die

offenen Schächte in den BHKW-Raum eindringt, könnten die Ventilatoren für einen gewissen Zeitabschnitt komplett abgeschaltet werden, um zusätzliche Kilowattstunden einzusparen

Es wird davon ausgegangen, dass auf der Versuchsanlage in Grub durch die oben genannten Vorkehrungen mindestens vier Kilowatt elektrische Leistung eingespart werden könnten (Schätzwert). Dies würde rechnerisch zu einer Senkung des Eigenverbrauchs von 16,56 % auf 13,34 % führen und würde bei einer durchgängigen Laufzeit der Biogasanlage bis zu 35.040 kWh einsparen.

5 Zusammenfassung einer umgesetzten flexiblen, dezentralen Stromerzeugung

Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse und Schlussfolgerungen zusammengefasst.

5.1 Biologische Flexibilisierung

Durch den erhöhten Gasbedarf im Intervallbetrieb wurden mehr energiereiche Substrate eingesetzt. Dabei sank der relative Masseanteil von Gülle und Mist während des Intervallbetriebs von 84 % (2016, Grundlastbetrieb) auf 72 % (2017, Intervallbetrieb). In der Gülle wurde ein Wassergehalt von durchschnittlich 94,22 % festgestellt. Durch den hohen Wasseranteil wirkt die Gülle als Puffer für Stoßbelastungen im Fermenter. Daher konnte trotz der intensiveren Beschickungsraten und einem erhöhten Anteil an energiereichem Substrat während des Intervallbetriebs keine Beeinträchtigung der Fermenterbiologie festgestellt werden. Kennzeichnend dafür ist auch der FOS/TAC-Wert, welcher einen Maximalwert von nur 0,31 erreichte.

Der Trockensubstanzgehalt im Gärgemisch betrug vor dem Intervallbetrieb noch rund fünf Prozent und stieg durch den verstärkten Einsatz energiereicher Substrate auf über sieben Prozent an. Zwar stieg der Energieverbrauch der Rührwerke durch den verstärkten Einsatz im Intervallbetrieb mit an. Er stieg jedoch aufgrund der insgesamt besseren Durchmischung der Substrate nicht proportional mit den längeren Rührzeiten an. Außerdem konnte durch häufiges Rühren der Schaumbildung entgegengewirkt werden. Trotz der stabilen Fermenterbiologie wurde eine starke Schaumentwicklung beobachtet. Diese verstärkte sich v.a. im Sommer und unter erhöhter Beigabe von Zuckerrübenmus. Die Isolierung einzelner Ursachen ist aufgrund von Synergieeffekten unmöglich. Die Schaumbildung kann durch die Zugabe von Rapsöl kontrolliert werden.

Weitere Maßnahmen wie die Fütterung in gleichmäßigen Fütterungsintervallen durch den Feststoffdosierer trugen zur Stabilität der Fermenterbiologie bei. Einzig die Fütterungsmenge variierte und wurde dem Gasbedarf der BHKW-Aggregate angepasst. Durch seine schnelle Gasverfügbarkeit wurde Zuckerrübenmus zusätzlich bei Bedarf als Flex-Substrat eingesetzt. Der große Gasspeicher konnte hierbei Schwankungen in der Gasproduktion abpuffern. Dabei sollten Witterungsverhältnisse berücksichtigt werden, die den Füllstand des Gasspeichers beeinflussen können. Bei höheren Temperaturen kommt es zur Ausdehnung des Gases. Deshalb sollte im Sommer und an heißen Tagen der Füllstand nicht höher als 70 % sein.

5.2 Aufbereitung und Einsatz von Zuckerrüben

Die Zuckerrüben, welche in Grub Oktober 2016 sowie Oktober 2017 geerntet wurden, wiesen einen relativ hohen Zuckeranteil von 19,7 bis 22,4 % auf. Bevor die Rüben in den Fermenter in verarbeiteter Form eingetragen werden, müssen diese zuerst entsteint werden. Bei dem Entsteinen sollten die Zuckerrüben möglichst langsam (nicht auf Volllast) von der Zuckerrübenwäsche gewaschen werden, damit möglichst wenige Steine mit den Zuckerrüben ausgetragen werden. Der Steinbesatz ist standortabhängig und ließ sich nicht komplett von der Zuckerrübenmiete abtrennen. Ein Restbesatz kann bei der Zuckerrübenschaufel zu Verkeilungen führen. Beim Einmusen der Zuckerrüben werden die restlichen Steine teils weiter zerkleinert und können über die Pumpe in den Fermenter gelangen.

Zuckerrübenmus muss über die ersten Wintermonate (ca. drei bis vier Monate) ruhen, bis das Substrat pumpfähig wird. Das Substrat kann anschließend ab dem Zeitraum Februar/März (Lagerzeit seit Oktober) eingesetzt werden. Währenddessen wurden die übrig gebliebenen ganzen Zuckerrüben direkt über die Schaufel in den Fermenter geschnitzelt. Ganze Zuckerrüben sollten dabei nach der Wäsche möglichst schnell verarbeitet werden, um Verluste zu vermeiden.

Beim Einsatz von Zuckerrübenmus konnte eine relativ schnelle Abbaurate bei der Gasproduktion festgestellt werden. Es wurde beobachtet, dass Zuckerrübenmus während des Flex-Betriebs in wenigen Stunden Gas bereitstellen konnte. Um einen Kubikmeter an Material in den Fermenter zu pumpen und damit ca. 150 m³ Biogas bereitzustellen (KTBL, 2017), wurden durch die Pumpe ca. 0,2 kWh Energie verbraucht.

Im Verlauf der Lagerung von Zuckerrübenmus sind Verluste der relativen Biogasausbeute (Normliter pro Tonne Frischmasse) von 25 bis 41 % festgestellt worden. Eine genaue Bestimmung der Energieverluste über den TS-Gehalt der Frischmasse ist nicht möglich, da bei der Umwandlung von fester in flüssige Phase eine Bildung von Alkoholen und Säuren stattfindet, welche auch zur Methanproduktion im Fermenter beitragen. Da die ca. 30 cm tiefe Deckschicht direkt der Umgebung ausgesetzt ist, sollten dort die höchsten Verluste entstehen. Dabei fungiert sie als Schutzschicht für das unterhalb gelagerte Substrat.

5.3 Technische Flexibilisierung

Die Auswertung der Störmeldungen zeigt, dass BHKW-Motoren mit einem Anteil von fast 50 % aller Störmeldungen die meisten Ausfälle verursachten. Bei den Auswertungen einzelner Störmeldungen fiel auf, dass die meisten Störungen nicht direkt durch längere flexible Fahrweisen hervorgerufen wurden. Es wird daher empfohlen, bei der Inbetriebnahme eines flexibel laufenden Motors mit dem Hersteller alle möglichen, mit dem Flex-Betrieb verbundenen Fahrweisen durchzugehen und diese im Detail zu erproben (betrifft alle Lasteneinstellungen inkl. Start-Stopp-Verhalten). Ein weiterer großer Anteil aller Störungen ist auf das Gassystem zurückzuführen. Dies erfolgte ebenfalls unabhängig von dem Flex-Betrieb, abgesehen von dem erhöhten Verschleiß am Magnetventil, welches vor der Gasfackel geschaltet war.

Durch die Auswertung der unterschiedlichen Lasteneinstellungen der BHKW-Motoren fiel auf, dass der Verbrauch sowie der Methanschlupf unter Teillast zunahmen. Beim Spitzenlast-BHKW steigt gegenüber Volllast der Verbrauch bei 60 % Teillast um den Faktor 1,2 (el. Wirkungsgrad sinkt um 4,8 %-Punkte) an, während der Methanschlupf um den Faktor 1,6 ansteigt (Anstieg um 0,27 %-Punkte). Damit das Fahrverhalten bzw. Fahreigenschaften besser kontrolliert werden können, wurde seit dem Herbst 2017 eine Anzeige in der Kontroll-Software hinterlegt, welche den aktuellen elektrischen Wirkungsgrad anzeigt. Zukünftig kann somit das Verhalten der Motoren über die Zeit analysiert werden.

5.4 Das Konzept „Intervallbetrieb in Grub“

Gegenüber dem Grundlastbetrieb mit einem Motor von 75 kW elektrischer Leistung konnte durch das Hinzuziehen eines Spitzenlast-BHKW von 203 kW elektrischer Leistung der jährliche Deckungsgrad des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub von 38 % auf 71 % gesteigert werden. Die elektrische Bemessungsleistung stieg dabei von 75 kW auf 123 kW an. Die Photovoltaik-Anlage in Grub mit 55 kW_p elektrischer Leistung unterstützt die bedarfsgerechte und dezentrale Stromerzeugung mit durchschnittlich weiteren 0,8 %-

Punkten (absolut) des Deckungsgrades. Die Fahrweisen wurden wöchentlich über Wochenpläne optimiert und ausgewertet. Es konnten hierbei wöchentliche Deckungsgrade von bis zu maximal 86,3 % des Stromverbrauchs der Liegenschaft Grub erreicht werden. Dabei fiel auf, dass die überwiegende Nutzung des Spitzenlast-BHKW das größte Potential mit sich führt. Das Grundlast-BHKW wird bei Bedarf zusätzlich eingeschaltet oder dann genutzt, wenn das Spitzenlast-BHKW ausfällt oder gewartet werden muss.

Durch den Intervallbetrieb konnte die Jahresleistung von ursprünglichen 641.895 kWh Stromproduktion sowie 960.973 kWh thermischer Energie (Mittelwert aus 2015 und 2016, Grundlastbetrieb) auf 1.072.623 kWh Stromproduktion und 1.415.050 kWh thermischer Energie angehoben werden. Der Nutzungsgrad an Wärme nahm von durchschnittlich 48,6 % (2015/2016) auf 26,6 % ab. Die über den Notkühler verlorene Wärme soll zukünftig durch ein Nahwärmenetz genutzt werden. Der elektrische Eigenverbrauch stieg trotz angehobener elektrischer Bemessungsleistung von durchschnittlich 14,1 % (2015/2016) auf 16,6 % (2017) an. Eine Nutzung der über den Notkühler abgelassenen Wärme, welche nun drei Viertel der Gesamtproduktion ausmacht, könnte den elektrischen Eigenverbrauch um weitere zwei Kilowatt Leistung reduzieren, da der Notkühler nicht mehr benötigt würde. Des Weiteren könnte eine Direktvernetzung des Wärmekreislaufs des großen Motors (Entkopplung vom Grundlast-BHKW) mit einer kleineren Pumpe zu weiteren Einsparungen führen, sofern das Grundlast-BHKW nicht läuft. Zusammen mit kleineren Optimierungsmaßnahmen ließe sich der Eigenstromverbrauch um rund zwei Prozentpunkte senken.

Ein Deckungsgrad von 100 % ist unter dem jetzigen Technikstand nicht möglich. Um eine „vollkommene Versorgung“ zu erreichen, muss von dem vier-Stunden-Rhythmus der Motoren auf eine nachfrageorientierte Fahrweise umgeschaltet werden. Es müsste hierfür stets genügend Gas zur Verfügung stehen und die Motoren möglichst ohne Ausfälle laufen (Verfügbarkeit). Zudem sollte eine Überproduktion weitestgehend vermieden werden, da der nicht verwendete und eingespeiste Strom geringer entlohnt wird (nur zum Börsenpreis) als der Wert des zu deckenden Stroms an der Liegenschaft. Der Anteil der Überproduktion an der gesamten Stromproduktion der Biogasanlage liegt derzeit bei 0,6 %.

6 Ausblick: Flex-Biogas 4.0 – Neue alternative Zukunftsmodelle für die Biogasbranche

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) leitete eine Ära ein, welche in den letzten zwei Jahrzehnten zu einem starken Zuwachs an Biogasanlagen geführt hatte. Anschließend Kürzungen in der Grundvergütung sowie der Paradigmenwechsel hin zu einem Ausschreibungsmodell führten dann zu einem Einbruch des Biogasanlagenzubaues. Das Ausschreibungsmodell gilt zwar auch für jene Bestandsanlagen, welche in absehbarer Zeit ablaufen werden. Jedoch müssen die Anlagenbetreiber mit Geboten um einen Zuschlag konkurrieren, was zu einer Unsicherheit bei den Biogasanlagenbetreibern führt (Maximalwert bei 16,9 Cent kWh⁻¹). Richtungsweisende Anreize wie die in der Direktvermarktung verankerte Flexibilitätsprämie wurden geschaffen, um das Potential von Biogasanlagen flexibel bereitstellen zu können nutzbar zu machen.

Durch die Möglichkeit der Gasspeicherung bieten Biogasanlagen das Potential, Strom bedarfsgerecht und flexibel bereitzustellen und zwar dann, wenn es nötig ist. Dies ist die Basis für eine dezentralisierte, entkoppelte Stromproduktion im ländlichen Raum, beispielsweise in Form von Bioenergiedörfern. Auf dieser Grundlage basierend liefert die Versuchs-Biogasanlage in Grub die Möglichkeit, über Praxiserfahrung sowie Messergebnisse neue Alternativen vorzustellen.

6.1 Ausbau der Wärmenutzung der Versuchs-Biogasanlage in Grub

In diesem Projekt wurde bereits ermittelt, dass mittlerweile $\frac{3}{4}$ der thermischen Energie auf der Versuchs-Biogasanlage ungenutzt ist. Hierzu laufen unter Leitung des Bauamts Rosenheim Planungen zur Erschließung des Nahwärmenetzes in Grub durch erneuerbare Energien, was voraussichtlich ab 2019 umgesetzt werden soll. Dabei soll die Biogasanlage zusammen mit einer Holzschnitzelanlage die gesamte Liegenschaft Grub durch ein Nahwärmenetz mit der produzierten Wärme versorgen. Spitzenlast-Kessel sollen hierzu den thermischen Bedarf im Winter abdecken.

Hierzu wurde in diesem Projekt und basierend auf den errechneten Daten aus Kapitel 4.5 das Wärmepotential errechnet, um Aussagen über das Maximal-Potential der thermischen Bereitstellung durch die Versuchs-Biogasanlage in Grub generieren zu können.

Um sowohl die ökonomische wie auch die ökologische Gesamteffizienz der Biogasanlage zu steigern, ist eine rasche Einbindung des geplanten Nahwärmenetzes erforderlich. Ansonsten müssten in Zukunft rund $\frac{3}{4}$ der produzierten Wärme (1.400.000 kWh) über den Notkühler abgeführt werden. Dies entspricht einem Heizöläquivalent von ca. 140.000 Litern pro Jahr.

Wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt wurde, steht bei der Biogasanlage eine jährliche Netto-Leistung von 1.251.753 kWh an thermischer Energie mit einer Durchschnittleistung von knapp 119 kW zur Verfügung, was man dem Jahresverbrauch der Liegenschaft Grub von ca. 2.500 MWh a⁻¹ gegenüberstellen kann. Zählt man das bereits gedeckte Nahwärmenetz hinzu, so könnten durch die Biogasanlage rund 50 % des Wärmebedarfs theoretisch gedeckt werden. Bisher wird die Wärme in der Liegenschaft Grub durch Heizöl bereitgestellt. Bei einem Heizwert von 9,8 kWh je Liter (Power Pellets, 2015) könnte somit die Biogasanlage jährlich bis zu 127.551 Liter ersetzen

Es laufen für 2018 zusätzlich Bestrebungen, eine ORC-Anlage in Zusammenarbeit mit einem Hersteller für Forschungszwecke einzusetzen. Hierfür könnte eine mit 10 kW elektrischer Leistung ausgestattete thermische Nachverstromung eingesetzt werden, welche ca. 155 bis 160 kW der thermischen Energie nutzen würde, was einen Großteil der nicht verwendeten Energie auf der Versuchs-Biogasanlage bedeuten würde. Diesbezüglich könnten neue Forschungsergebnisse in diesem Zeitraum gesammelt werden, um dieses System im Vergleich zum Nahwärmenetz bewerten zu können.

6.2 Automatisierung des Biogasprozesses

Ein wichtiges Ziel dieses Projektes war, die Stromproduktion sowie den Biogasbildungsprozess soweit wie möglich zu automatisieren. Hierbei können mittlerweile die Motoren im Wochenrhythmus automatisiert werden.

In Zukunft sollte die Automatisierung der Biogasanlage weiter vorangetrieben werden. Der nächste Schritt wäre hierfür, die Motoren an die Nachfrage der Liegenschaft Grub zu koppeln. Damit könnte der Deckungsgrad weiter erhöht werden und Arbeitszeit (Planung, getätigte Einstellungen) eingespart werden. Jedoch setzt ein solches Vorhaben eine Planung für die Substrate sowie mögliche elektrische Bemessungsleistung voraus. Hierbei müsste ein Tagesprofil der einzelnen Wochentage entwickelt werden und über das mögliche Fahrprofil der Gasverbrauch rückgerechnet werden, um die Produktionsdaten erschließen zu können. Zunächst wurde von einem möglichen Abdeckungsbereich durch Einstellungsintervalle in 10 kW-Stufen ausgegangen, welche in Abbildung 51 dargestellt sind. Die Motoren sollen in diesem Zusammenhang stufenweise an einen erhöhten Strombedarf angepasst werden, sobald eine positive oder negative Differenz von 10 kW elektrischer Leistung zwischen Nachfrage und Produktion erreicht wird.

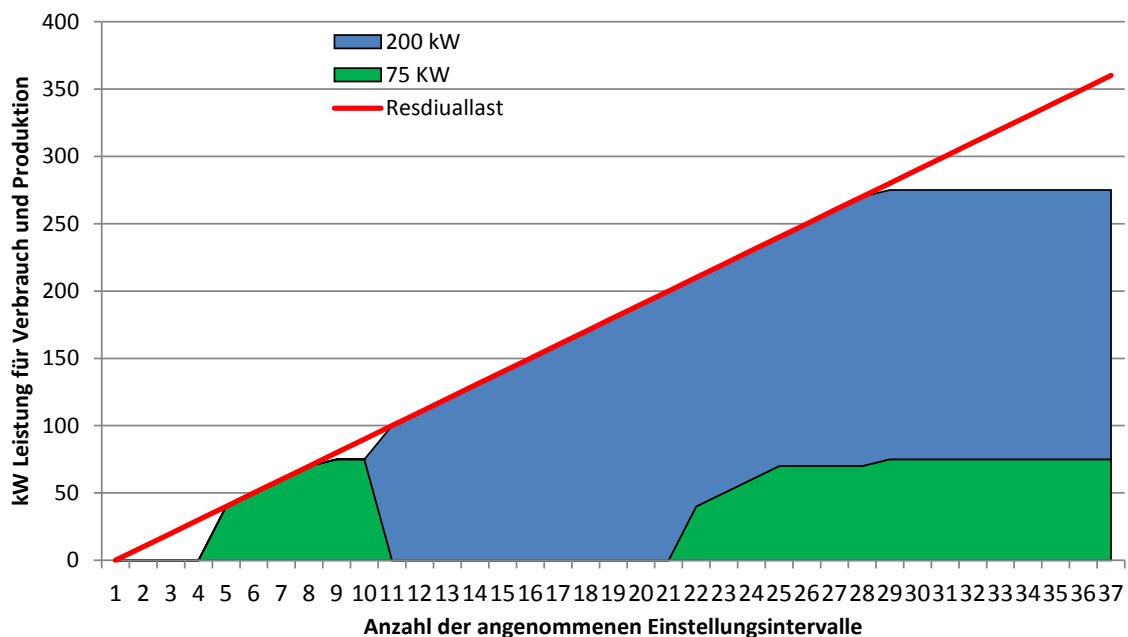


Abbildung 51: Theoretische Abhandlung möglicher Einstellungsintervalle beider BHKW-Aggregate in Abhängigkeit des Stromverbrauchs der Liegenschaft in 10 kW-Schritten

In Abbildung 51 wird erkennbar, dass über die Voll- und Teillast-Einstellungen beider Motoren ein Großteil des Verbrauchs der Liegenschaft Grub abgedeckt werden kann. Als Vorgabe wurden die Einstellungen beim 75 kW Motor auf 40 bis 75 kW und beim 200 (203) kW Motor von 100 bis 200 kW gesetzt. Somit sind Einstellungen innerhalb des Leistungsbereiches von 40 bis 75 kW sowie 75 bis 275 kW möglich. Eine niedrigere Teillast sollte aufgrund der Motorenbelastung und dem zu niedrigen elektrischen Wirkungsgrad vermieden werden. In Abbildung 52 werden nun die Jahresverbrauchsdaten von der Liegenschaft Grub von August 2015 bis Juli 2016 abgebildet, um das Deckungspotential durch die Biogasanlage in Grub zu ermitteln.

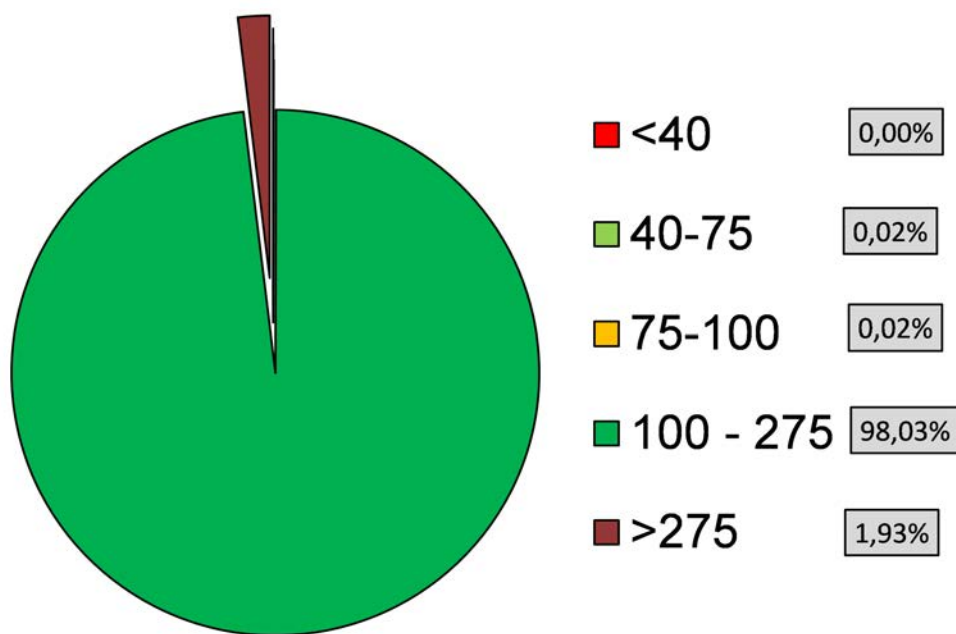


Abbildung 52: Prozentuale Verteilung des Leistungsbereichs der Stromnachfrage zwischen August 2015 und Juli 2016 zur Bewertung ferngesteuerter Lasteneinstellungen der BHKW-Aggregate

Aus der Abbildung 57 ist erkennbar, dass ein maximal möglicher Deckungsgrad von 98 % theoretisch (ohne Ausfälle) erreicht werden kann. Da sich diese Berechnungen auf das Verbrauchsjahr 2015/2016 beziehen, konnte der inzwischen etwas höhere Strombedarf der Liegenschaft u.a. aufgrund der Eigenenergieverbraucher an der Biogasanlage nicht berücksichtigt werden.

Ein weiterer Schritt der Optimierung wäre ein Algorithmus zur Steuerung der Fütterungsintervalle. Dies erfordert einen großen Erfahrungswert über die Gasproduktionsrate durch die Substrate sowie der Umsetzungsrate (Zeit). Dabei könnte der Füllstand im Gasspeicher unter Berücksichtigung der Verzögerung die Fütterungsintensität steuern.

6.3 Weitere Projekte

Im Laufe dieses Projektes fanden neben der Erprobung des Intervallbetriebs weitere Projekte auf der Biogasanlage in Grub statt, welche begleitet wurden.

Im Projekt „Nah-Infrarot-Reflektion Spektroskopie (NIRS) als Monitoringtool“ (Förderkennzeichen EW/12/07) wurde im Jahr 2017 die NIR-Spektroskopie auf der Biogasanlage in Grub verbaut, um zeitnahe Messergebnisse zur Analyse des Gärgemischs sowie der Gülle machen zu können. Dabei wurde das Messgerät zwischen Fermenter und Gärrestlager eingebunden. Nach der Kalibrierphase kann dieses Messgerät nun als „Warnsystem“ eingesetzt werden, um die Parameter, welche auf die Stabilität der Fermenterbiologie hinweisen, schnell auszugeben.

Im Augenblick werden Maisstrohversuche auf der Gruber Biogasanlage durchgeführt. In dem Projekt „Biogas aus Körnermaisstroh“ (KS/17/04) wird auf der Biogasanlage Körnermaisstroh als mögliches Substitut zu Silomais getestet.

In Zusammenarbeit mit der TU München wurde bereits ein Folgeprojekt in Bezug auf die ganzheitliche Emissionsbetrachtung und Optimierung der BHKW-Aggregate auf der Versuchsbiogasanlage in Grub beantragt. Seit Mitte 2017 wurde dieser Projektantrag an das Bayerische Wirtschaftsministerium gestellt.

7 Literatur

BMEL (2017): Digitalpolitik Landwirtschaft, Zukunftsprogramm: Chancen nutzen - Risiken minimieren. Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 514, Stand: August 2017, Berlin.

C.A.R.M.E.N. (2018): Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen. Ein Beitrag zur effizienten Wärmenutzung und zum Klimaschutz (C.A.R.M.E.N. Merkblatt). Hrsg.: C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing https://www.carmen-ev.de/files/festbrennstoffe/merkblatt_Nahwaermenetz_carmen_ev.pdf, (letzte Aktualisierung: 07.02.2018).

FNR (2013): Leitfaden Biogas, Von der Gewinnung zur Nutzung, 6. Auflage, Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013, Gülzow, ISBN 3-00-014333-5.

FNR (2017): Faustzahlen Biogas. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/> (letzte Aktualisierung: 06.11.2017).

KTBL (2017): Bischoff, M., Gruber, W., Hartmann, S. Heilmann, H., Hermus, S., Lemmer, A., Schaiper, D., Strobl, M., Thaysen, J.: Zuckerrüben in Biogasanlagen, Verfahren – Lagerungsverluste – Kosten, KTBL-Heft 120. Hrsg: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, ISBN 978-3-945088-50-0.

Kliche, R., Lebuhn, M. (2017): Schaum in Biogasanlagen. Biogas Forum Bayern Nr. III -19/2017, Hrsg. ALB Bayern e.V., www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0003/schaum-in-biogasanlagen.pdf, (letzte Aktualisierung: 26.01.2018).

LfL (2017): Versuchsstation Grub. Hrsg: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Grub, <https://www.lfl.bayern.de/lv fz/030272/> (letzte Aktualisierung: 06.11.2017).

Power Pellets (2015): Energieverbrauchsrechner – Umrechnungszahlen. Hrsg.: Power Pellets Vertriebs GmbH & Co. KG, Olsberg/Steinhelle, <http://www.power-pellets.de/energieverbrauchsrechner/umrechnungszahlen.html>, (letzte Aktualisierung: 07.02.2018).

Renewable Energy Concepts (2017): Mesophil – Thermophil. Hemmingen, <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/bioenergie/biogas-basiswissen/mesophil-thermophil.html> (letzte Aktualisierung 18.01.2018), UstIDNr.: DE 274070042.

8 Anhang

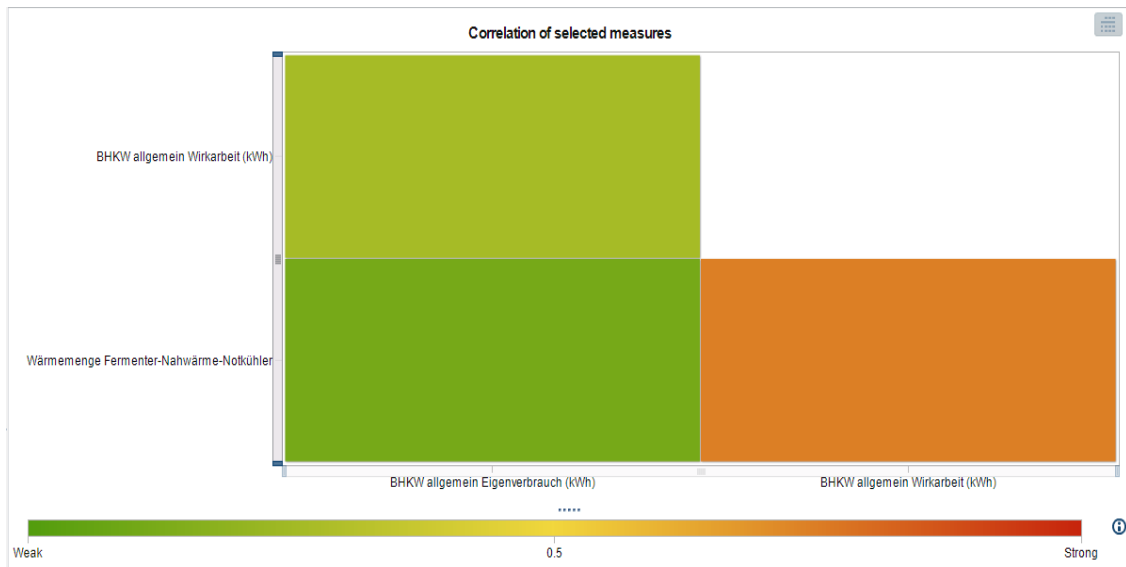


Abbildung 53: Beispiel 1 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen Produktion und Eigenverbräuche von BHKW 1 (Grundlast-Betrieb)

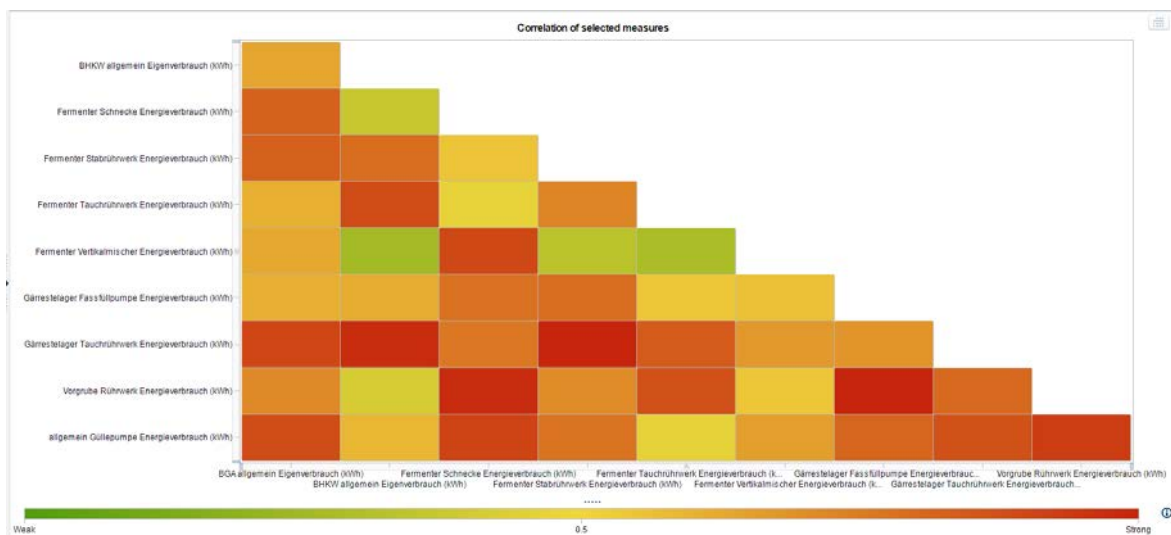


Abbildung 54: Beispiel 2 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen allen Eigenverbräuchen (Strom) der Biogasanlage im Grundlast-Betrieb

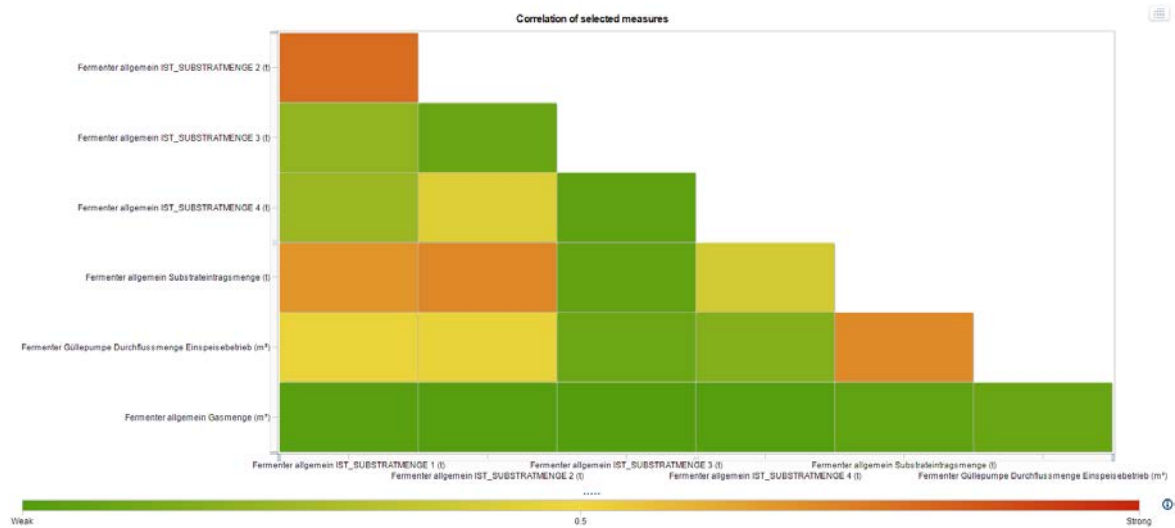


Abbildung 55: Beispiel 3 - SAS Visual Analytics: Darstellung der Korrelation zwischen den eingesetzten Substraten und produzierter Gasmenge auf der Biogasanlage im Grundlast-Betrieb