



Schlussbericht vom September 2026

MiBAS – Mikro-Biogasanlagen Schweiz

Analyse der Leistung einer Kleinstbiogasanlage unter schweizerischen Klimabedingungen

Inkl. Studien zur rechtlichen Situation, zur Wirtschaftlichkeit, zur Anwendung auf Alpwirtschaften und Berggasthäusern



**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
ICBT Institut für Chemie und Biotechnologie
Fachgruppe Umweltbiotechnologie und Bioenergie
Campus Grüental, Postfach, 8820 Wädenswil
<https://www.zhaw.ch/de/lsm/institute-zentren/icbt/biokatalyse-und-prozesstechnologie/fachgruppe-umweltbiotechnologie-und-bioenergie>

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Forschungsgruppe Ökotechnologie
Campus Grüental, Postfach, 8820 Wädenswil
<https://www.zhaw.ch/de/lsm/institute-zentren/iunr/oekotechnologien-energiesysteme/oekotechnologie>

(B)energy GmbH
Westerwaldstr.11, 6335 Neuhausen (DE)
<https://be-nrg.com>

Verein Synergy Village
Oberschirmensee 16, CH-8714 Feldbach
<https://www.synergy-village.org>

Autor/in:

Cornelia Haueisen, ZHAW ICBT
Wolfgang Merkle, ZHAW ICBT, wolfgang.merkle@zhaw.ch
Yves Moser, ZHAW ICBT
Hans-Joachim Nägele, ZHAW ICBT, hans-joachim.naegel@zhaw.ch
Florian Rüschi, ZHAW ICBT, florian.ruesch@zhaw.ch
Lorenzo Santoro, ZHAW ICBT
Gabriel Sciascia, ZHAW ICBT, gabriel.sciascia@zhaw.ch
Devi Bühler, ZHAW IUNR, devi.buehler@zhaw.ch
Katrin Pütz, (B)energy, info@be-nrg.com
Ezra Bühler, Synergy Village, info@synergy-village.org

BFE-Projektbegleitung:

Vanessa Burg, vanessa.burg@bfe.admin.ch
Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502006-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.

Lizenziert unter Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23161291>



Zusammenfassung

Mit dem Projekt MiBAS – Mikro-Biogasanlagen Schweiz wurde erstmals eine wissenschaftlich fundierte Datengrundlage zum Betrieb von Mikro-Biogasanlagen unter Schweizer Klimabedingungen geschaffen. Ziel war die Untersuchung des Potenzials dieser Systeme zur dezentralen Verwertung organischer Reststoffe und zur Bereitstellung erneuerbarer Energie in Haushalten, Kleinstwohnformen, Alpwirtschaften und Berggasthäusern.

Im Zentrum des Projekts stand der Aufbau und der einjährige Betrieb einer Forschungs- und Demonstrationsanlage des Typs «(B)calm» mit einem Fermentervolumen von rund 2 m³. Die Anlage wurde mit Heiz- und Dämmsystemen, umfangreicher Messtechnik sowie einer automatisierten Datenerfassung ausgestattet. Während der zwölfmonatigen Messkampagne wurden kontinuierlich Daten zur Prozessstabilität, Biogasproduktion, Gasqualität und Energieausbeute erhoben. Ergänzend wurden rechtliche, wirtschaftliche und anwendungsspezifische Fragestellungen untersucht.

Insgesamt wurden rund 1.4 t organische Einsatzstoffe verarbeitet. Im Zeitraum vom 50. bis zum 365. Betriebstag entstanden dabei etwa 34 m³ Biogas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 63 %, was einem Energieertrag von rund 215 kWh entspricht. Die mittlere Leistungsabgabe lag bei etwa 28 W. Während der beheizten Betriebsphase wurden durchschnittlich 128 L Biogas pro Tag produziert. Nach dem Abschalten der Heizung sank die Produktion auf rund 89 L pro Tag, womit die hohe Bedeutung der Temperaturführung für die Gasbildung deutlich wurde.

Die Untersuchungen zeigen, dass ein mikrobiologisch stabiler Betrieb von Mikro-Biogasanlagen unter Schweizer Bedingungen grundsätzlich möglich ist. Die gemessenen Prozessparameter, insbesondere pH-Wert und FOS/TAC-Verhältnis, lagen über weite Strecken im optimalen Bereich. Gleichzeitig wurde deutlich, dass Temperaturmanagement, Wärmedämmung und Wärmeübertragung entscheidende Einflussgrößen für den Betrieb und die Energieeffizienz darstellen. Obwohl durch den Einsatz einer aktiven Beheizung stabile Gaserträge erzielt werden konnten, besteht hinsichtlich der thermischen Auslegung und Energieeffizienz weiterer Optimierungsbedarf. Dieser bezieht sich jedoch primär auf die im Projekt untersuchten Betriebsbedingungen mit geringer Anlagenauslastung und lässt keine generellen Rückschlüsse auf das Leistungsvermögen von Mikro-Biogasanlagen bei optimierter Auslegung und Betriebsweise zu.

Die Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen, dass die Energiegestehungskosten stark von Anlagengrösse und Anlagenauslastung abhängen. Die berechneten Werte lagen zwischen 0.09 und 0.65 CHF kWh⁻¹. Grössere Systeme profitieren dabei von Skaleneffekten und weisen unter den getroffenen Annahmen potenziell konkurrenzfähige Energiegestehungskosten auf. Gleichzeitig deuten erste rechtliche Abklärungen darauf hin, dass Mikro-Biogasanlagen unter bestimmten Voraussetzungen bewilligungsfrei erstellt und betrieben werden können.

Insgesamt bestätigt das Projekt die technische Machbarkeit von Mikro-Biogasanlagen und ihr Potenzial zur Förderung der Kreislaufwirtschaft sowie der dezentralen Nutzung organischer Reststoffe. Die gewonnenen Messdaten und Praxiserfahrungen bilden nach Kenntnis der Autorenschaft die bislang umfassendste Datengrundlage für diesen Anwendungsbereich in der Schweiz. Für eine breitere Anwendung, insbesondere im alpinen Raum und bei netzfernen oder kleinräumigen Versorgungskonzepten, sind jedoch weitere Forschungs- und Demonstrationsprojekte erforderlich. Der Fokus sollte dabei auf der Verbesserung der Energieeffizienz, der Untersuchung alpiner Betriebsbedingungen sowie der Einordnung der Technologie im Vergleich zu bestehenden zentralen Verwertungssystemen liegen.



Résumé

Le projet MiBAS – Micro-installations de biogaz en Suisse a permis d'établir, pour la première fois, une base de données scientifiquement fondée sur l'exploitation des micro-installations de biogaz dans les conditions climatiques suisses. L'objectif était d'évaluer le potentiel de ces systèmes pour la valorisation décentralisée des résidus organiques et la fourniture d'énergie renouvelable dans les ménages, les petites formes d'habitat collectif, les exploitations alpines et les auberges de montagne.

Au cœur du projet figurait la mise en place et l'exploitation pendant un an d'une installation de recherche et de démonstration de type « (B)calm », dotée d'un digesteur d'un volume utile d'environ 2 m³. L'installation a été équipée de systèmes de chauffage et d'isolation, d'une instrumentation de mesure complète ainsi que d'un système automatisé d'acquisition de données. Au cours de la campagne de mesures de douze mois, des données sur la stabilité du procédé, la production de biogaz, la qualité du gaz et le rendement énergétique ont été collectées en continu. Des questions d'ordre juridique, économique et liées aux applications potentielles ont également été étudiées.

Au total, environ 1.4 t de substrats organiques ont été traitées. Entre le 50e et le 365e jour d'exploitation, environ 34 m³ de biogaz ont été produits, avec une teneur moyenne en méthane de 63 %, ce qui correspond à un rendement énergétique d'environ 215 kWh. La puissance moyenne produite s'élevait à environ 28 W. Durant la phase d'exploitation chauffée, la production moyenne de biogaz a atteint 128 L par jour. Après l'arrêt du chauffage, elle a diminué à environ 89 L par jour, mettant clairement en évidence l'importance du contrôle de la température pour la formation du biogaz.

Les résultats montrent qu'une exploitation microbiologiquement stable des micro-installations de biogaz est fondamentalement possible dans les conditions suisses. Les principaux indicateurs du procédé, notamment le pH et le rapport FOS/TAC, sont restés dans la plage optimale pendant la majeure partie de la période d'observation. Dans le même temps, la gestion de la température, l'isolation thermique et le transfert de chaleur se sont révélés être des facteurs déterminants pour les performances de l'installation et son efficacité énergétique. Toutefois, ce besoin d'optimisation concerne principalement les conditions d'exploitation étudiées dans le cadre du projet, qui se caractérisaient par un faible débit de traitement de l'installation, et ne permet pas de tirer de conclusions générales quant au potentiel de performance des micro-installations de biogaz dans des conditions de conception et d'exploitation optimisées.

Les analyses économiques montrent que les coûts de production de l'énergie dépendent fortement de la taille de l'installation et de son taux d'utilisation. Les valeurs calculées se situaient entre 0.09 et 0.65 CHF par kWh. Les systèmes de plus grande taille bénéficient d'économies d'échelle et peuvent, selon les hypothèses retenues, atteindre des coûts actualisés de l'énergie potentiellement compétitifs. Parallèlement, de premières analyses juridiques indiquent que les micro-installations de biogaz peuvent, sous certaines conditions, être construites et exploitées sans autorisation.

Dans l'ensemble, le projet confirme la faisabilité technique des micro-installations de biogaz ainsi que leur potentiel pour promouvoir l'économie circulaire et la valorisation décentralisée des résidus organiques. À la connaissance des auteurs, les données de mesure recueillies et l'expérience pratique acquise constituent à ce jour la base de données la plus complète pour ce domaine d'application en Suisse. Toutefois, des projets complémentaires de recherche et de démonstration restent nécessaires pour permettre une diffusion plus large de cette technologie, en particulier dans les régions alpines et dans les concepts d'approvisionnement énergétique hors réseau ou à petite échelle. Les travaux futurs devraient se concentrer sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'étude des conditions d'exploitation en milieu alpin ainsi que le positionnement de cette technologie par rapport aux systèmes centralisés de valorisation existants.



Summary

The MiBAS – Micro Biogas Plants Switzerland project established, for the first time, a scientifically data basis for the operation of micro biogas plants under Swiss climatic conditions. The objective was to investigate the potential of these systems for the decentralized treatment of organic residues and the provision of renewable energy in households, small residential communities, alpine farms, and mountain inns.

At the core of the project was the installation and one-year operation of a research and demonstration plant of the “(B)calm” type, featuring a digester volume of approximately 2 m³. The system was equipped with heating and insulation components, extensive monitoring technology, and automated data acquisition. Over the twelve-month measurement campaign, continuous data on process stability, biogas production, gas quality, and energy yield were collected. In addition, legal, economic, and application-specific aspects were investigated.

In total, approximately 1.4 t of organic feedstock was processed. Between day 50 and day 365 of operation, around 34 m³ of biogas was produced with an average methane content of 63%, corresponding to an energy yield of approximately 215 kWh. The average power output was about 28 W. During the heated operating phase, biogas production averaged 128 L per day. After the heating system was switched off, production declined to around 89 L per day, clearly demonstrating the importance of temperature control for gas generation.

The results show that microbiologically stable operation of micro biogas plants is fundamentally feasible under Swiss conditions. Key process indicators, particularly pH and the VFA/TIC ratio, remained within the optimal range for most of the monitoring period. At the same time, it became clear that temperature management, thermal insulation, and heat transfer are key factors influencing both plant operation and energy efficiency. Although stable gas yields were achieved through the use of active heating, further optimisation is required with regard to thermal design and energy efficiency. However, this optimisation need primarily relates to the operating conditions investigated in the project, which were characterized by low plant throughput, and does not allow general conclusions to be drawn about the performance potential of micro biogas plants under optimized design and operating conditions.

Economic assessments revealed that energy production costs depend strongly on plant size and utilization rate, with calculated values ranging from CHF 0.09 to CHF 0.65 per kWh. Larger systems benefit from economies of scale and, under the assumptions made, may achieve competitive levelized costs of energy. At the same time, preliminary legal assessments indicate that micro-biogas plants may, under certain conditions, be constructed and operated without requiring a permit.

Overall, the project confirms the technical feasibility of micro biogas plants and their potential to support a circular economy through the decentralized utilization of organic residues. To the authors' knowledge, the measurement data and practical experience obtained constitute the most comprehensive data basis available to date for this field of application in Switzerland. Nevertheless, further research and demonstration projects are required before wider deployment can be achieved, particularly in alpine regions and off-grid or small-scale energy supply concepts. Future work should focus on improving energy efficiency, evaluating performance under alpine conditions, and positioning the technology relative to existing centralized waste treatment systems.



Kernbotschaften «Take-Home Messages»

Erstmalig belastbare Betriebsdaten für Mikro-Biogasanlagen erhoben

Mit MiBAS wurde über ein vollständiges Betriebsjahr erstmals eine umfassende Datengrundlage zu Leistung, Prozessstabilität und Betriebsverhalten einer Mikro-Biogasanlage im Schweizer Mittelland geschaffen. Die Ergebnisse schliessen eine wesentliche Wissenslücke und bilden eine Grundlage für die Beurteilung und Weiterentwicklung solcher Systeme im mitteleuropäischen Raum.

Stabiler Anlagenbetrieb ist möglich, erfordert jedoch angepasste Anlagentechnik

Die Untersuchung zeigte, dass Mikro-Biogasanlagen auch unter Schweizer Bedingungen zuverlässig betrieben werden können. Entscheidend sind jedoch eine ausreichende Wärmedämmung, ein geeignetes Heizsystem sowie eine auf das Klima abgestimmte Betriebsweise. Nach Abschaltung der Heizung reduzierte sich die Gasproduktion um rund 25 %, was die hohe Bedeutung des Wärmemanagements für die Energieausbeute verdeutlicht.

Versuchsergebnisse sind durch die geringe Auslastung des Fermenters geprägt

Die im Versuch gemessene Gasproduktion wurde massgeblich durch die sehr geringe organische Raumbelastung eines deutlich überdimensionierten Fermenters beeinflusst. Die Potenzialanalysen zeigen, dass bei einer an die Substratmenge angepassten Anlagenauslegung und höheren Auslastung deutlich höhere Energieerträge möglich sind. Die gemessenen Versuchsergebnisse sind deshalb nicht als Ausdruck des grundlegenden technischen Potenzials von Mikro-Biogasanlagen zu verstehen.

Energiepotenzial reicht von Kochenergie bis zur Wärmeversorgung kleiner Betriebe

Die untersuchte Anlage erzeugte ausreichend Biogas für einen täglichen Kochbetrieb (ca. 30 min). Die Potenzialanalysen zeigen, dass grössere bzw. besser ausgelastete Systeme wie „MiBAS“, „Gastro“ oder „Alp“ je nach Substratmenge und Betriebsweise Warmwasser- und Heizbedarf von Haushalten oder landwirtschaftlichen Betrieben decken können. Damit eröffnen sich Anwendungsmöglichkeiten für Haushalte, Gemeinschaftsanlagen, Alpbetriebe und Berggasthäuser.

Wärmeeigenbedarf weiterhin offene Schlüsselfrage

Die Untersuchung bestätigt die hohe Bedeutung von Temperaturführung, Heizung und Wärmedämmung für den Anlagenbetrieb. Belastbare Aussagen zum Wärmeeigenbedarf stehen zwar noch aus, erste Abschätzungen deuten jedoch darauf hin, dass durch eine angepasste Anlagenauslegung und verbesserte Dämmung ein energetisch weitgehend autarker Betrieb möglich sein könnte.

Wirtschaftliche Perspektiven insbesondere für grössere und dezentrale Anwendungen

Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung zeigt Skaleneffekte. Während sehr kleine Haushaltssysteme vergleichsweise hohe Energiegestehungskosten aufweisen, können grössere Anlagenkonzepte unter geeigneten Rahmenbedingungen erneuerbare Wärme zu konkurrenzfähigen Kosten bereitstellen. Besonders interessant sind Anwendungen an Standorten mit verfügbaren Reststoffströmen und eingeschränkten Alternativen zur Energieversorgung.

Bewilligungsfreier Betrieb ist unter gewissen Voraussetzungen möglich

Erste rechtliche Abklärungen deuten darauf hin, dass Mikro-Biogasanlagen unter bestimmten Bedingungen ohne Baubewilligung realisiert werden können. Zusammen mit den gewonnenen Praxiserfahrungen wurden gute Voraussetzungen für zukünftige Demonstrations- und Umsetzungsprojekte in der Schweiz geschaffen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht beim Energiebedarf und bei alpinen Anwendungen

Die Resultate zeigen Chancen, aber auch Grenzen der Technologie auf. Künftige Entwicklungen sollten insbesondere den Eigenenergiebedarf reduzieren, die Anlagentechnik hinsichtlich Heizung, Dämmung und Durchmischung weiter optimieren und die Praxistauglichkeit in alpinen sowie anderen dezentralen Anwendungen vertieft untersuchen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Kernbotschaften «Take-Home Messages»	6
Abbildungsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	11
1.1 Kontext und Motivation.....	11
1.2 Projektziele.....	12
2 Literaturübersicht	14
2.1 Definition und Kriterien «Mikro-Biogasanlage»	14
2.2 Potenziale und Anwendungen	16
2.3 Lücken in der bisherigen Forschung	17
3 Material und Methoden	19
3.1 Standortwahl	19
3.2 Systembeschreibung.....	19
3.2.1 Eingesetztes Biogasanlagen-System “(B)calm”	19
3.3 Anlagenplanung	20
3.4 Anlagendokumentation	21
3.5 Anlagenbau	21
3.5.1 Biogasanlage	21
3.5.2 Technischer Ausbau der Biogasanlage	22
3.5.3 Verbesserungsmassnahmen.....	24
3.6 Messtechnik und Automatisierung	28
4 Ergebnisse und Diskussion	30
4.1 Übersicht Phasen des Anlagenbetriebs.....	30
4.1.1 Warm-Inbetriebnahme (Tag 0-30)	30
4.1.2 Neu-Inokulation (Tag 31-84).....	30
4.1.3 Umstellung auf Fütterung mit Küchen- und Gartenabfällen (Tag 85-150)	31
4.1.4 Normale Fütterung (151-273)	31
4.1.5 Keine Heizung (274-365).....	31
4.2 Jahresverlauf Fütterungsmengen, Raumbelastung und Verweilzeit	31
4.3 Jahresverlauf Temperatur	33
4.4 Jahresverlauf pH-Wert	35
4.5 Jahresverlauf Redox-Potenzial	36
4.6 Jahresverlauf FOS, TAC und FOS/TAC-Verhältnis	37
4.7 Jahresverlauf des Drucks.....	38
4.8 Jahresverlauf der Gasproduktion	39
4.9 Jahresverlauf der Gasqualität	40
4.10 Jahresverlauf des Energieertrags und der Leistung	41



4.11	Laborversuch Temperatur und Zerkleinerungsgrad	43
4.12	Gärprodukt-Management	44
5	Studien	46
5.1	Rechtliche Situation bezüglich Mikro-Biogasanlagen	46
5.2	Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen	48
5.3	Mikro-Biogasanlagen auf Alpwirtschaften	50
5.4	Mikro-Biogasanlagen für Berggasthäuser	51
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	52
6.1	Schlussfolgerungen	52
6.2	Ausblick	56
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	58
8	Publikationen und andere Kommunikation	59
8.1	Workshop «Installation der Mikro-Biogasanlage»	59
8.2	Dissemination	59
8.2.1	Kommunikation des Projekts	59
8.2.2	Kommunikation der Ergebnisse	60
	Literaturverzeichnis	61
	Anhang	62



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung von Fermenter und Gasspeichersack (B)calm	20
Abbildung 2:	Komponenten des Systems (B)calm von Fermenter inkl. Ein- und Austrag	20
Abbildung 3:	Grundriss- und Schnitte BGA	22
Abbildung 4:	Erster Aufbau Mikro-Biogasanlage	22
Abbildung 5:	Zweiter Aufbau Mikro-Biogasanlage	23
Abbildung 6:	Stabilisierung des Gewächshauses mit einer Dachlattenkonstruktion	24
Abbildung 7:	Heizkabel am Substrataustrag	25
Abbildung 8:	Installierte Druckregulierung und zweite Wassertasse	26
Abbildung 9:	Industrieller Küchenmixer Cutter ECO 12 Liter	26
Abbildung 10:	Titratoren FOS/TAC 2000	27
Abbildung 11:	Rezirkulationspumpe am Substrataustrag	27
Abbildung 12:	Biogaskocher zur Erwärmung von Wasser	28
Abbildung 13:	Übersicht und Position der Messungen auf der MiBAS-Anlage	28
Abbildung 14:	Innenansicht der Steuerzentrale mit dem Schaltschrank	29
Abbildung 15:	Verlauf der Fütterungsmengen über einjährige Messkampagne	32
Abbildung 16:	Verweilzeit und organische Raumbelastung der einzelnen Betriebsphasen	33
Abbildung 17:	Temperaturverläufe über die einjährige Messkampagne	34
Abbildung 18:	Verlauf der Umgebungs- und Gasraum-Temperatur im Jahresverlauf	34
Abbildung 19:	Wärmebildaufnahmen (unten) des Folienfermenter-Systems (oben)	35
Abbildung 20:	Verlauf des pH-Werts	36
Abbildung 21:	Verlauf des Redox-Potenzials	37
Abbildung 22:	Verlauf des FOS- und TAC-Werts und des FOS/TAC-Verhältnisses	38
Abbildung 23:	Verlauf des Umgebungs- und Gasdrucks	39
Abbildung 24:	Verlauf der Gasproduktion und -rate sowie spezifische Gasproduktionsrate	40
Abbildung 25:	Verlauf der Gasqualität über einjährige Messkampagne	41
Abbildung 26:	Verlauf des Energieertrags, Leistung und spezifischer Energieausbeute	42
Abbildung 27:	Verlauf des Energiebedarfs (Heizung) und Energieproduktion (Biogas) sowie die benötigte Heizleistung bzw. produzierte Leistung (Biogas)	43



Abkürzungsverzeichnis

ALPGRIDS	Alpine Mikrogrids
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Kanton Zürich)
BFE	Bundesamt für Energie
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMP	Biomethanpotenzial
BR	Organische Raumbelastung
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
FOS	Flüchtige organische Säuren
FOS/TAC	Verhältnis von flüchtigen, organischen Säuren (FOS) zur Pufferkapazität (TAC)
FS	Frischsubstanz
HRT	Hydraulische Verweilzeit
IBC	<i>engl. Intermediate Bulk Container</i>
KREIS-Haus	Klima und ressourcen-effizientes Suffizienz-Haus
oTS	organischer Trockensubstanzgehalt
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
REPIC	<i>engl. Renewable Energy, Energy and Resource Efficiency Promotion in International Cooperation</i>
RMP	Restmethanpotenzial
SAC	Schweizer Alpen-Club
SRT	Schlammverweilzeit
SVGW	Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
TAC	<i>engl. Total Anorganic Carbon</i> (Pufferkapazität)
TS	Trockensubstanzgehalt



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

In den letzten Jahren hat die Forschung zu Mikro-Biogasanlagen zunehmend an Bedeutung gewonnen, insbesondere im Kontext der Energiewende. Solche Anlagen bieten eine dezentrale Lösung zur Energieerzeugung, die insbesondere in ländlichen und abgelegenen Gebieten von grossem Nutzen ist. Obwohl sie vielversprechend sind, gibt es bislang nur wenige Daten zum Betrieb solcher häuslichen oder landwirtschaftlichen Anlagen unter den spezifischen klimatischen Bedingungen Mitteleuropas.

Mikro-Biogasanlagen erzeugen erneuerbare Energie aus organischen Abfällen wie Küchen-, Rüst- und Gartenabfällen sowie aus Hofdüngern wie Gülle und Mist. Solche Mikro-Biogasanlagen fördern die Diversifizierung regenerativer Energiequellen. Sie reduzieren die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und bieten besonders in Regionen mit eingeschränktem Zugang zum Energienetz eine alternative, erneuerbare Energiequelle. Zusätzlich zur Energieproduktion kann die vergorene Biomasse als kostengünstiger, organischer Dünger eingesetzt werden. Das Biogaspotenzial von Hofdüngern ist in der Schweiz erheblich, der allergrösste Anteil wird energetisch nicht genutzt. Auch der Anteil von häuslicher Biomasse, die mit dem Restmüll entsorgt wird, ist in der Schweiz noch immer hoch. Bei einer Vergärung dieser Biomassen an der Quelle könnten nicht nur Ressourcen eingespart werden, sondern auch Strom- oder Wärmeeigenbedarf beispielsweise von Landwirtschafts- und Gastbetrieben sowie von privaten Haushalten mit erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden.

Die Forschungslücken betreffend häuslichen und landwirtschaftlichen Mikro-Biogasanlagen sind erheblich. Es fehlen umfassende Daten zur Leistungsfähigkeit solcher Systeme unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, wie sie beispielsweise in der Schweiz herrschen. Zwar existieren theoretische Annahmen zur Menge der verwertbaren organischen Abfälle und Hofdünger und dem daraus resultierenden Biogaspotenzial, die Verwertung dieser Potenziale in Mikro-Biogasanlagen in der Praxis steht jedoch noch ganz am Anfang. Die Marktakzeptanz sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen sind bislang nur unzureichend untersucht, was die Etablierung von solchen Mikro-Biogasanlagen in der Schweiz erschwert.

Mikro-Biogasanlagen besitzen ein erhebliches Potenzial, einen substanziellen Beitrag zur Energiewende zu leisten insbesondere, wenn es sich um den Ersatz von fossilen Energieträgern mittels dezentraler Ansätze geht. Zugleich besteht Bedarf an technischer Weiterentwicklung, an wissenschaftlicher Forschung sowie an systematisch erhobenen Betriebserfahrungen, um die Robustheit und gesellschaftliche Akzeptanz dieser Technologie zu erhöhen sowie den Bekanntheitsgrad zu steigern und die Implementierung in der Schweiz und im mitteleuropäischen Raum langfristig zu fördern.

Das Projekt umfasst die Implementierung einer Mikro-Biogasanlage im Schweizer Mittelland im Kontext von Eigenenergieversorgungsmaßnahmen als Antwort auf aktuelle Energie- und Umweltprobleme. Angesichts unsicher werdender Energieversorgung durch konventionelle Energieträger, steigender Energiepreise und der Dringlichkeit, die Emission klimawirksamer Gase zu reduzieren, rücken nachhaltige Energiequellen und Themen wie Abfallmanagement, Kreislaufschliessung und Nährstoffe in den Fokus. Das Konzept der Mikro-Biogasanlagen bietet vielversprechende Optionen, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Das Interesse an Mikro-Biogasanlagen nimmt derzeit sowohl in Deutschland, Österreich als auch in der Schweiz deutlich zu. Die Verwendung der produzierten Produkte (erneuerbare Energie, organischer Dünger) wird breit diskutiert.

Obwohl bereits viele Mikro-Biogasanlagen in wärmeren Klimaregionen wie Afrika, Asien und Südamerika im Einsatz sind, funktionieren gemäss Expertenberichten mehr als 95 % aller Anlagen nicht oder nur unzureichend. Trotz tausendfacher Verwendung gibt es kaum valide wissenschaftliche Untersuchungen, welche die relevanten Betriebsparameter einer Anlage diskutieren und deren Wirtschaftlichkeit aufzeigen. Informationen zur Bewilligungspraxis in der Schweiz sind nicht verfügbar.



Der Forschungs- und Erprobungsbedarf für die Schweiz ergibt sich aus der bisher kaum existenten Anwendung von Mikro-Biogasanlagen hierzulande, sicherlich auch aufgrund der lokalen klimatischen Verhältnisse und der unklaren Bewilligungspraxis. Obwohl das Grundkonzept weltweit etabliert ist, sind spezifische Anpassungen an den Schweizer Standort (z.B. Sommer- vs. Winterbetrieb und die lokalen Energiebedürfnisse) erforderlich, damit das produzierte Biogas bedarfsgerecht produziert und genutzt werden kann. Zudem besteht eine wissenschaftliche Lücke in Bezug auf eine robuste Anlagentechnologie, effiziente Betriebsstrategien und die Integrationsmöglichkeiten in bestehende Energieinfrastrukturen. Als Grundlage dafür werden zuverlässige Mess- und Betriebsdaten benötigt.

Dieses Projekt zielt darauf ab, Lösungen für oben beschriebene Herausforderungen für die Schweiz zu liefern. Durch systematische Untersuchungen des Anlagenbetriebs unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie Substratzusammensetzung, Prozessführung und Betriebsstrategien werden optimale Bedingungen und zuverlässige Leistungsdaten ermittelt. Im Rahmen dieses Projektes werden Grundlagendaten für den Betrieb einer mittelgrossen Mikro-Biogasanlage erhoben. Die Anlage liefert, während dem Messbetrieb im Jahresverlauf, Messdaten, um deren Leistung zu ermitteln und Anhaltspunkte für einen effektiven Betrieb zu gewinnen. Die gesammelten Daten sollen künftig bei der Planung und Umsetzung von dezentralen Mikro-Biogasanlagen an Standorten wie Kleinstwohnformen (Tiny-Houses) und grössere Überbauungen, Alpwirtschaften, SAC-Hütten und anderen Berggasthäusern genutzt werden, wobei anhand der in diesem Projekt gewonnenen Daten eine erste Potenzialabschätzung für die erwähnten Anwendungsfälle gemacht wird.

Die daraus abgeleiteten Ergebnisse können Regierungen, Behörden, Wohngemeinschaften und Unternehmen bei der Bewertung potenzieller Anwendungsfälle von Mikro-Biogasanlagen unterstützen. Die Studie zeigt auf, unter welchen technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen Mikro-Biogasanlagen zur lokalen Verwertung organischer Reststoffe sowie zur dezentralen Bereitstellung erneuerbarer Energie beitragen können. Gleichzeitig werden bestehende Herausforderungen und Grenzen der Technologie aufgezeigt. Damit leistet die Studie einen Beitrag zur Beurteilung des Potenzials von Mikro-Biogasanlagen im Kontext einer nachhaltigen Energie- und Kreislaufwirtschaft.

1.2 Projektziele

Im Rahmen einer zweijährigen Studie, welche eine einjährige Messkampagne beinhaltet, werden Betriebsdaten für eine Mikro-Biogasanlage erhoben. Dieser simple Anlagentyp wird schon in zahlreichen klimatisch wärmeren Regionen auf der Welt eingesetzt, deren Betriebsdaten aber bisher hauptsächlich aufgrund fehlender Messtechnik kaum wissenschaftlich beschrieben wurden. Insbesondere für den Betrieb im mitteleuropäischen Raum fehlen eine solide Datenbasis, daran angepasste Anlagentechnik sowie praktische Erfahrungen im Betrieb. Mit dem Aufbau und dem Testbetrieb einer solchen Anlage auf dem Gelände des Vereins Synergy Village wird diese Lücke geschlossen. Hierfür wird eine Anlage der (B)energy verwendet, einem Unternehmen, das sich auf den Bau von ebensolchen Mikro-Biogasanlagen in klimatisch wärmeren Regionen spezialisiert hat. Die bestehende Anlage wird dafür durch die ZHAW mit adäquater Messtechnik sowie mit einem Heiz- und Dämmsystem ausgestattet und über 365 Tage unter den schweizerischen Klimabedingungen des Mittellandes in Zusammenarbeit mit dem Verein Synergy Village betrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden innerhalb des Projektes in einem zweiten Schritt zur Potenzialabschätzung für Kleinwohnformen an dezentralen Standorten sowie für Anwendungen im alpinen Raum verwendet. Im Rahmen dieses Projekts werden neben der Erhebung von Betriebsdaten, dem Gewinn von Praxiserfahrungen unter schweizerischen Klimabedingungen auch die Klärung von genehmigungsrechtlichen Fragestellungen sowie wirtschaftliche Aspekte solcher Anlagen untersucht.

Im Forschungsprojekt werden folgende Fragen behandelt:



- Welche Energiemengen können mit der Mikro-Biogasanlage erzeugt werden und welcher Bedarf lässt sich damit decken?
- Kann mit den zugeführten Einsatzstoffmengen ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden?
- Wie reagiert die Anlage auf mengenmässige Schwankungen im Inputmaterial?
- Wie gestalten sich die Energieertragsdaten im Jahresverlauf?
- Welche technischen Anpassungen an der Biogasanlage braucht es, um einen stabilen Anlagenbetrieb unter den klimatischen Bedingungen der Schweiz zu gewährleisten?
- Welche Arbeitsaufwände und Kosten entstehen für das erzeugte Gas?
- Braucht es für Mikro-Biogasanlagen eine Genehmigung und wenn ja, welche Auflagen müssen in diesem Fall erfüllt werden?
- Gärprodukt-Management: Welche Flächen werden benötigt, um die Gärprodukte als organischer Dünger auszubringen? Gibt es rechtliche Einschränkungen für Gärproduktverwendung in urbanen oder alpinen Gebieten? Wie wird das Gärgut im Winter gelagert?

Das Ziel ist es, erstmalig Betriebs- und Messdaten einer häuslichen Mikro-Biogasanlage über ein gesamtes Betriebsjahr zu erheben. Dabei werden über das Versuchsjahr hinweg folgende Messparameter erfasst und berechnet:

- Einsatzstoffe: Menge, Trockensubstanzgehalt (TS), organischer Trockensubstanzgehalt (oTS), Biomethanpotenzial (BMP)
- Zulauf: pH-Wert, Redox-Potenzial, Temperatur, Leitfähigkeit
- Auslauf: Düngemittelmengen und -qualität (N, P, K, TS, oTS), pH-Wert, Temperatur und Leitfähigkeit, Restmethanpotential (RMP)
- Biogas: Chemische Zusammensetzung (CH₄, CO₂, H₂S, O₂), energetische Nutzungsdaten und Verwertungsmöglichkeiten
- Prozessstabilität: organische Raumbelastung (BR), hydraulische Verweilzeit (HRT), FOS/TAC-Verhältnis, TS
- Umgebungsbedingungen: Boden- und Lufttemperatur
- Anlagenbetrieb: Energieverbrauch- und kosten, Arbeitsaufwand

Zusätzlich dazu werden genehmigungsrechtliche Fragen geklärt sowie die Wirtschaftlichkeit (Investitions- und Energiegestehungskosten) entsprechender Anlagentypen abgeschätzt.



2 Literaturübersicht

Das Projekt MiBAS befasst sich mit der Implementierung von Mikro-Biogasanlagen im mitteleuropäischen Raum, insbesondere unter den klimatischen und geografischen Bedingungen der Schweiz. Die Forschung zu diesen Mikro-Biogasanlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie ein hohes Potenzial für die dezentrale und nachhaltige Energieversorgung insbesondere in entlegenen und schwer zugänglichen Regionen bietet, wie etwa den Schweizer Alpen. Eine zentrale Komponente des Projekts ist eine einjährige Messkampagne, die dazu dient, belastbare Daten zur Leistung der Anlagen im jahreszeitlich stark schwankenden Alpenklima zu erheben. Die nachfolgende Literaturübersicht gibt dabei den aktuellen Stand der Eingrenzung von «Mikro-Biogasanlagen» wieder, beschreibt Potenziale und Anwendungen und Lücken in der aktuellen Forschung.

2.1 Definition und Kriterien «Mikro-Biogasanlage»

Eine klare Definition von «Mikro-Biogasanlagen» gibt es in der Schweiz nicht. Der Ausdruck «Mikro» suggeriert, dass der Begriff über die «Grösse» des Systems definiert werden soll oder kann. Dazu bietet es sich an, eine Definition auf Grundlage von folgenden Anlagen- bzw. Betriebsdaten vorzunehmen:

- Fermentervolumen: das Betriebsvolumen des Fermenters;
- Biogas-Speichervolumen: die maximale Kapazität des Gasspeichers;
- Räumliche Ausdehnung: die flächen- oder volumenbezogene Ausdehnung des Fermentersystems (inkl. oder exkl. periphere Anlagenteile wie Substrat-Vorbehandlung, Gärgut-Nachbehandlung, Biogas-Speicher, Biogas-Verwertung etc.);
- Energetische Leistung: die maximale Leistungsfähigkeit des Systems bezüglich der Biogas- bzw. Energieproduktion;
- Substratdurchsatz: der Mengenfluss der verarbeiteten Einsatzstoffe;

Für die Systemdefinition, nicht aber die Grösse der Anlage ebenso relevant sind zusätzlich folgende Aspekte:

- die Art und Kategorisierung der Einsatzstoffe (Substratqualität);
- der Verwendungszweck des Biogases (Nutzung zur Wärme- oder Stromgewinnung oder zu Mobilitätszwecken).

Die Abgrenzung von Mikro-Biogasanlagen gegenüber konventionellen landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist nicht eindeutig definiert und erfolgt häufig über Fermentervolumen, Anlagendurchsatz oder installierte Leistung. Selbst eine der kleinsten bekannten landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz verfügt über ein Fermentervolumen von rund 200 m³ und eine elektrische Leistung von 16 kW (Schürch-Wyss and Schürch-Wyss, 2025). Mikro-Biogasanlagen sind daher nicht als verkleinerte landwirtschaftliche Biogasanlagen zu verstehen, sondern als eigenständiger Anlagentyp zur dezentralen Verwertung vergleichsweise kleiner Mengen organischer Reststoffe direkt am Entstehungsort.

Die Grössenkriterien werden nachfolgend für Mikro-Biogasanlagen gemäss der Norm für häusliche Biogasanlagen (SN EN ISO 23590, 2021) spezifiziert. Inwiefern die Begriffe «Mikro-Biogasanlage» und «häusliche Biogasanlage» jedoch als Synonym verwenden können oder müssen, ist nicht eindeutig. Gemäss Definition in der entsprechenden Norm wird der Begriff «häuslich» sehr unspezifisch angewendet, zumal bei den möglichen Einsatzstoffen beispielsweise auch Hofdünger und Klärschlamm erwähnt werden.

- Das maximale Fermenter-Nutzvolumen eines häuslichen Biogasanlagensystems wird in der Norm nicht definiert. Eine Grössenordnung kann jedoch aus der definierten, maximalen



jährlichen Energieproduktion von 100 MWh pro Jahr abgeleitet werden. Aus dieser ergibt sich je nach Substratqualität (Wasseranteil), hydraulischer Verweilzeit und organischer Raumbelastung ein ungefähres Fermenter-Nutzvolumen von 18 - 21 m³.

- Die maximale jährliche Energieproduktion von 100 MWh entspricht einer durchschnittlichen Leistung von 11.4 kW bzw. einer Produktion von 1.14 m³_{STD} Methan pro Stunde. Die entsprechende Mikro-Biogasanlage darf also maximal rund 2'000 L Biogas pro Stunde produzieren.
- Vorschriften für einen maximalen Substratdurchsatz sind in der entsprechenden Norm nicht definiert. Leitet man einen solchen aus dem Fermenter-Nutzvolumen her, müsste eine minimale, hydraulische Verweilzeit (HRT) festgelegt werden. Die Norm für häusliche Biogasanlagen definiert als minimale Schlammverweilzeit (SRT) aus prozessbiologischen Überlegungen 20 Tage. Bei Systemen ohne Biomasserückhalt sind die HRT und SRT identisch, falls HRT und SRT entkoppelt werden, beispielsweise durch ein Biomasserückhaltesystem, ist biologisch keine Mindestverweilzeit notwendig. Tieferer HRT sind aus ökologischer Sicht vor allem bei sehr schnell und gut abbaubaren Substraten sinnvoll (hoher Abbaugrad), sowie beim Einsatz von Rindergülle oder Rindermist, da dieser bereits anaerob aktiv ist und sich damit jede weitere anaerobe Verweilzeit auch aus klimaspezifischer Sicht lohnen würde. Der maximale Durchsatz einer Mikro-Biogasanlage beträgt für häusliche Biogasanlagen mit 20 m³ Fermenter-Nutzvolumen und bei 20 Tagen HRT genau 1'000 L d⁻¹, bzw. rund 365 Tonnen pro Jahr.
- Die maximale Kapazität des Biogasspeichers, damit keine feuerpolizeiliche Bewilligung für das Lagern von brennbaren Gasen eingeholt werden muss, sind 50 kg. Daraus abgeleitet ist ein Biogas-Speichervolumen von maximal 100-120 m³ bewilligungsfrei möglich.
- Wird die Mikro-Biogasanlage im Freien aufgestellt, und unterschreitet ihre räumliche Ausdehnung eine maximale Fläche und Höhe (lokal geltende Kriterien für Bauten), wird für dieses Kriterium keine Baubewilligung benötigt. Zusätzlich spielt es dabei eine Rolle, ob das System auf einem Fundament aufgestellt wird bzw. im Boden verankert wird und ob es «mobil» ist bzw. ob es innert weniger Stunden zurückgebaut werden kann.
- Wird die Anlage hingegen in einem bestehenden Gebäude oder Unterstand, in der Garage, überdacht, in einem Gartenhäuschen, in einem Gewächshaus etc. aufgestellt wird ist zu klären, ob Massnahmen bezüglich Brand- und Explosionsschutz getroffen werden müssen.
- Falls das Biogas nicht zum Zwecke des Kochens eingesetzt wird, müssen lokal weitere Abklärungen (Einspeisekriterien, Steuern etc.) gemacht werden.

Für den Betrieb einer Mikro-Biogasanlage, die Speisereste und andere hygienisch kritische Substrate verarbeiten, ist es allenfalls sinnvoll oder – je nach Anlagentyp und Verwendungszweck des Gärguts - sogar notwendig, dass sie über Hygienisierungsmassnahmen verfügt. Hier ist es angebracht, mit den lokalen Behörden bzw. dem kantonalen Veterinärdienst Kontakt aufzunehmen.

Bei der Verwendung des Gärguts sind Empfehlungen zur Anwendung von Gärgut als organischer Dünger zu berücksichtigen.

Eine Mikro-Biogasanlage – im Sinne dieser Studie – ist im Idealfall ...

- ... so klein, dass sie mit möglichst wenig administrativem Aufwand (Baubewilligung etc.) aufgestellt und betrieben werden kann,
- ... technisch so einfach und robust konstruiert, dass sie mit einem Minimum an Sicherheitseinrichtungen und EMSR-Technik auskommt und
- ... so sicher konstruiert sein, dass eine Aufstellung an einem energetisch und witterungstechnisch günstigen Ort möglich ist.



2.2 Potenziale und Anwendungen

Energie

Mikro-Biogasanlagen ermöglichen die Erzeugung erneuerbarer Energie aus organischen Abfällen und landwirtschaftlichen Reststoffen. In der Schweiz und weltweit können diese Anlagen zur lokalen Kraftstoff-, Strom- und Wärmeerzeugung beitragen. Sie fördern die Diversifizierung der regenerativen Energiequellen und mindern die Abhängigkeit von konventionellen, insbesondere fossilen Energieträgern. Besonders in Regionen mit eingeschränktem Zugang zum Stromnetz bieten sie eine zuverlässige Energiequelle.

Im Anwendungsbeispiel des Projekts MiBAS kann diese erneuerbare Energie beispielsweise als erneuerbares Gas zum Kochen oder Grillieren genutzt werden. Dies kann selbst mit einfachster Infrastruktur umgesetzt werden, einem Gasbrenner mit dem für Biogas geeigneten Gas-Luft-Gemisch. Weiter kann das Gas auch für ein Warmwasser- bzw. Heizsystem genutzt werden, um Räume und auch die Anlage selbst zu beheizen. Für die Einbindung in ein modernes Gasheizsystem (Erdgasnetz) müsste das Gas zuerst aufbereitet werden, d.h. der Methangehalt von ca. 60 % auf über 96 % erhöht und das CO₂ abgeschieden werden (SVGW, 2016), dies ist für mit solchen Mikro-Anlagen produzierte Kleinstmengen nicht realistisch bzw. wirtschaftlich. Auch die Nutzung des Rohbiogases als Kraftstoff würde einen unverhältnismässig grossen Aufwand bedeuten.

Zusätzlich zur Erzeugung eines erneuerbaren Energieträgers produzieren die Anlagen hochwertigen organischen Dünger, der die Bodenqualität und die Ernteerträge verbessert.

Private Haushalte und Gastronomie

Im Bereich des nachhaltigen Wohnens zeigen Mikro-Biogasanlagen innovative Ansätze, insbesondere als Erweiterung für Kleinstwohnformen aber auch für touristische und gastronomische Einrichtungen. Sie können nicht nur zur Energieversorgung beitragen, sondern auch Lösungen für umweltfreundliche Abfallentsorgung bieten, indem sie organisches Material wie Küchenabfälle vor Ort in nutzbare Energie umwandeln. Dies trägt zur Autarkie von Haushalten und zur Förderung sozialer Resilienz bei.

Landwirtschaft

In der Landwirtschaft haben Mikro-Biogasanlagen vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Neben der Energieproduktion kann der erzeugte Dünger die Wirtschaftlichkeit der Betriebe steigern. Die Nutzung von Hofdünger (Gülle und Mist) birgt ein erhebliches Biogaspotenzial, das zur Deckung des Eigenenergiebedarfs der Landwirtschaftsbetriebe verwendet werden kann. Die Vergärung von Hofdüngern reduziert Methanemissionen, reduziert damit die Emissionen klimawirksamer Gase und unterstützt so eine nachhaltige Landwirtschaft. (Angelidaki and Ellegaard, 2003)

In der Schweiz sind insbesondere für grosse landwirtschaftliche Betriebe bereits einige industrielle landwirtschaftliche Biogasanlagen im Einsatz. Mikro-Biogasanlagen könnten besonders bei kleinen Betrieben eine wertvolle Ergänzung bringen dort, wo es finanziell oder ökologisch nicht lohnend ist, eine grosstechnische Anlage zu bauen, oder dort, wo die Wege zu weit sind, um eine andere Anlage mitzubenutzen. (Angelidaki and Ellegaard, 2003)

Gesellschaft und Markt

Neben der technischen Entwicklung der Anlagen sollte auch das Bewusstsein für die Vorteile von Mikro-Biogasanlagen als dezentrale Energiequelle gestärkt werden, was die Entstehung lokaler Energiegemeinschaften fördern kann. Indem das Wissen und Erfahrungswerte zur praktischen Anwendung von Mikro-Biogasanlagen bereitgestellt wird, unterstützt es Gemeinden dabei, ihre Energieversorgung autonomer und resilienter zu gestalten. Dies kann die regionale Wirtschaft stärken und die Beziehungen zwischen Energieerzeugern und -verbrauchern intensivieren. (Steiner, 2014)



Die Marktchancen für Produkte und Dienstleistungen im Zusammenhang mit Mikro-Biogasanlagen sind vielversprechend. Die Nachfrage nach erneuerbaren Energien und nachhaltigen Abfalllösungen, die besonders in den letzten zehn Jahren gewachsen ist, bietet Potenzial für optimierte Anlagen-Designs und Prozessführungsstrategien. Insbesondere für Einzelhaushalte sind international bereits standardisierte, einfach zu installierende Mikro-Biogasanlagen verfügbar. Diese sind jedoch noch nicht in der Schweiz etabliert. Hersteller wie Puxin, HomeBiogas und (B)energy bieten Systeme an, die Energie zum Kochen, zur Heizung von Räumen oder zur Warmwasserherstellung produzieren, jedoch fehlen wissenschaftliche Daten zur Leistungsfähigkeit solcher Systeme unter Schweizer Bedingungen. (HomeBiogas, 2024)

2.3 Lücken in der bisherigen Forschung

Trotz der umfangreichen Forschung zu Biogasanlagen im Allgemeinen bestehen noch erhebliche Lücken und Herausforderungen, die es zu adressieren gilt. Diese Lücken bieten eine Motivation für zukünftige Forschungen, um das volle Potenzial dieser Technologie auszuschöpfen.

Energieerzeugung

Weltweit sind knapp 50 Millionen Mikro-Biogasanlagen in Betrieb. Davon entfallen rund 42 Millionen auf China und weitere 4.9 Millionen auf Indien; zusätzlich wurden schätzungsweise etwa 900.000 Biogasanlagen im übrigen Asien, in Afrika und in Südamerika installiert (NDRC, 2017; REN21, 2018; SNV, 2021).

Obwohl diese Anlagen bereits vielfach in verschiedenen Weltregionen im Einsatz sind, fehlt es an umfassenden Daten zur Funktionsweise und Effizienz solcher Anlagen unter wechselnden klimatischen Bedingungen, insbesondere für das mitteleuropäische Klima. Die Schweiz, mit ihrem kalten Winter und gemässigten Sommer, stellt spezielle Anforderungen an das Design und die Betriebsführung von Mikro-Biogasanlagen. MiBAS untersucht die Effizienz dieser Anlagen im schweizerischen Klima und testet, inwieweit Booster-Systeme, wie sie etwa von HomeBiogas angeboten werden, die Energieproduktion bei niedrigen Temperaturen unterstützen. Das Projekt soll klären, ob der Energieoutput signifikant höher ist als der Energieinput, der für die Beheizung und Vorbereitung der organischen Abfälle erforderlich ist. Der Nachweis eines ganzjährig stabilen und wirtschaftlich tragfähigen Betriebs ist ein zentrales Ziel der einjährigen Messkampagne, die zur Optimierung der Energieproduktion und Effizienz der Anlagen beitragen soll. (Angelidaki and Ellegaard, 2003; HomeBiogas, 2024)

Abfallmanagement

Die Nutzung von Mikro-Biogasanlagen zur Verwertung organischer Reststoffe stellt ein vielversprechendes Anwendungsfeld dar. Während für landwirtschaftliche und industrielle Biogasanlagen umfangreiche Erkenntnisse zur Substratverwertung und zum Nährstoffkreislauf vorliegen, bestehen für Mikro-Biogasanlagen im Küchen- und Kleinbetriebsbereich weiterhin Wissenslücken. Insbesondere fehlen belastbare Erkenntnisse zur Verwertung typischer Küchen- und Gartenabfälle in Mikro-Biogasanlagen unter realen Betriebsbedingungen sowie zu deren Beitrag zur lokalen Schliessung von Nährstoff- und Kohlenstoffkreisläufen, einschliesslich der nachhaltigen Nutzung der anfallenden Gärreste. Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich, um das Potenzial dieser Systeme für eine dezentrale Kreislaufwirtschaft unter schweizerischen Rahmenbedingungen besser zu quantifizieren.

Dezentrale Versorgung und Energieautarkie

Die Vorteile der dezentralen Energieversorgung durch Mikro-Biogasanlagen sind bekannt, jedoch gibt es nur wenige Untersuchungen zur tatsächlichen Energieunabhängigkeit (Heizenergie, Speicherung, ganzjährige Verfügbarkeit etc.), die damit erreicht werden kann. Besonders in entlegenen Gebieten und Alpbetrieben der Schweiz könnte dies eine bedeutende Rolle spielen. Ziel ist es, die langfristige Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der dezentralen Energieversorgung für abgelegene Betriebe in der



Schweiz zu prüfen und eine verlässliche Grundlage für den Einsatz solcher Anlagen in Gebieten mit eingeschränkter Energieversorgung zu schaffen. (Weiland, 2009)

Marktakzeptanz und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Etablierung von Mikro-Biogasanlagen hängt stark von der Marktakzeptanz und den rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Obwohl das Potenzial erkannt wird, gibt es noch keine einheitlichen Richtlinien und Regelungen, die den Ausbau fördern. Die Zusammenarbeit zwischen Forschung, Regierung, Politik, Industrie und Technologieentwicklung ist entscheidend, um massgeschneiderte Lösungen bereitzustellen und die Marktakzeptanz zu erhöhen. (Bundesamt für Energie BFE, 2023)

Technologische Weiterentwicklung

Die technologische Weiterentwicklung von Mikro-Biogasanlagen, insbesondere für kältere Klimazonen, ist entscheidend für die Verbreitung in der Schweiz. Viele der derzeit verfügbaren Systeme sind für mildere Klimabedingungen ausgelegt. Es fehlen Nachweise und die Datengrundlage, wie solche Systeme im europäischen Klima funktionieren, wo man zusätzlich Heiz- und Isolationssysteme beachten muss. Hierbei ist ein zusätzlich relevanter Faktor, wie stark das Gärgut mit Wasser verdünnt werden muss, um die Anlage mechanisch optimal zu betreiben. Die Wasserzugabe beeinflusst die Wärmebilanz der Anlage entscheidend.

Nachhaltigkeit und Umweltschutz

Mikro-Biogasanlagen haben das Potenzial, fossile Energieträger zu ersetzen, Treibhausgasemissionen zu reduzieren und lokale Nährstoffkreisläufe zu schliessen. Gleichzeitig sind mit ihrem Einsatz auch potenzielle Umweltrisiken verbunden, die bislang nur unzureichend untersucht wurden. Dazu zählen insbesondere Methanverluste durch Leckagen, die aufgrund der hohen Klimawirksamkeit von Methan die Umweltbilanz einer Anlage erheblich beeinflussen können. Darüber hinaus können Prozessstörungen oder eine unvollständige Vergärung, insbesondere bei nicht professionell betriebenen Anlagen, die Effizienz der Biogasproduktion vermindern. Ebenfalls noch unzureichend geklärt sind die Auswirkungen des zusätzlichen Energiebedarfs für Heizung und Betriebstechnik auf die Gesamtenergiebilanz sowie Umweltaspekte im Zusammenhang mit Lagerung, Handhabung und Verwertung der anfallenden Gärreste. Für Mikro-Biogasanlagen unter schweizerischen Klimabedingungen fehlen hierzu bislang belastbare Langzeitdaten. Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich, um sowohl die ökologischen Chancen als auch die potenziellen Risiken dieser Technologie umfassend bewerten zu können.

Gesellschaftliche und wirtschaftliche Auswirkungen

Die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Einführung von Mikro-Biogasanlagen sind in der Schweiz weitgehend unerforscht. Es fehlen empirische Daten zur tatsächlichen Umsetzung und den langfristigen Effekten auf die Gesellschaft. Der Bedarf für Möglichkeiten zur Dezentralisierung der Gasbereitstellung für Koch-, Heiz- oder auch Mobilitätszwecke ist nicht abschliessend geklärt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Mikro-Biogasanlagen ein vielversprechendes Potenzial für die dezentrale Energieerzeugung und nachhaltige Abfallverwertung bieten. Dennoch gibt es zahlreiche Forschungsfelder, die weiter untersucht werden müssen, um die Effizienz, Nachhaltigkeit und Akzeptanz dieser Technologie zu fördern. Die Schliessung der bestehenden Wissenslücken und die Entwicklung angepasster Lösungen für verschiedene klimatische und geographische Bedingungen sind essenziell, um die breite Anwendung von Mikro-Biogasanlagen zu ermöglichen und ihren Beitrag zur Energiewende zu maximieren.



3 Material und Methoden

3.1 Standortwahl

Die Forschungs- und Demonstrationsanlage wurde auf dem Gelände des Vereins Synergy Village in Feldbach (ZH) errichtet. Die Standortwahl erfolgte primär aufgrund der vorhandenen Infrastruktur, der guten Zugänglichkeit sowie der Möglichkeit, die Anlage über einen Zeitraum von zwölf Monaten unter realen schweizerischen Klimabedingungen wissenschaftlich zu betreiben und kontinuierlich durch Mitarbeitende der ZHAW zu überwachen. Der Standort bot die notwendigen Voraussetzungen für den Einsatz und die Einbindung umfangreicher Mess- und Datenerfassungstechnik sowie für die Durchführung von Wartungs-, Probenahme- und Optimierungsarbeiten während der gesamten Messkampagne.

Der Standort repräsentiert das Schweizer Mittelland als einen bedeutenden Teil der potenziellen Anwendungsgebiete für Mikro-Biogasanlagen und eignet sich daher als Ausgangspunkt für die erstmalige Erhebung belastbarer Betriebsdaten unter mitteleuropäischen Bedingungen.

Ziel der Standortwahl war in einem ersten Schritt nicht die direkte Untersuchung des Anlagenbetriebs bei sehr anspruchsvollen, alpinen Einsatzbedingungen, wie sie in Alpwirtschaften und Berggasthäusern herrschen, sondern die Schaffung einer wissenschaftlich fundierten Datengrundlage zum Betrieb einer Mikro-Biogasanlage unter moderaten, schweizerischen Klimaverhältnissen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Beurteilung weiterer Anwendungsfelder.

Aufgrund des im Projekt eingesetzten experimentellen Heiz- und Dämmsystems können jedoch keine belastbaren Aussagen zum Wärmeeigenbedarf oder zur energetischen Gesamtbilanz an anderen Standorten abgeleitet werden. Insbesondere ist eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf alpine Regionen oder andere klimatische Bedingungen nicht möglich, sodass hierfür zusätzliche Untersuchungen erforderlich sind.

3.2 Systembeschreibung

3.2.1 Eingesetztes Biogasanlagen-System “(B)calm”

Das von der ZHAW in diesem Projekt eingesetzte Mikro-Biogassystem von (B)energy GmbH ist eine einfache Lösung zur nachhaltigen Energieproduktion aus organischen Abfällen. Die Firma (B)energy ist bekannt für ihre innovativen Biogaslösungen, die weltweit angeboten werden.

Die Mikro-Biogasanlage von (B)energy ist modular aufgebaut und lässt sich leicht an unterschiedliche Anforderungen und Grössenordnungen anpassen. Sie bietet eine benutzerfreundliche Technologie zur Erzeugung von Biogas aus organischen Materialien. Neben Küchen- und Gartenabfällen können auch landwirtschaftliche Reststoffe und Hofdünger wie Rindergülle oder Rinderfestmist eingesetzt werden. Das System ist darauf ausgelegt, zuverlässig erneuerbare Energie bereitzustellen und gleichzeitig die Umweltbelastung durch Abfallverwertung zu reduzieren.

(B)energy legt grossen Wert auf die einfache Handhabung und Wartung ihrer Anlagen, um eine zuverlässige Nutzung der erzeugten Energie zu gewährleisten. Ihre Produkte sind darauf ausgelegt, den lokalen Energiebedarf nachhaltig zu decken und bieten eine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Brennstoffen.

In diesem Projekt wird das System (B)calm eingesetzt, das in der kleinsten verfügbaren Grösse über ein Fermenter-Nutzvolumen von rund 2 m³ verfügt und zum Zeitpunkt der Durchführung die kleinste von (B)energy verfügbaren und vertriebenen Fermentergrösse darstellte (Abbildung 1, Abbildung 2). Ergänzend kommen ein Biogaskocher sowie verschiedene Gasspeichersäcke von (B)energy zum Einsatz.

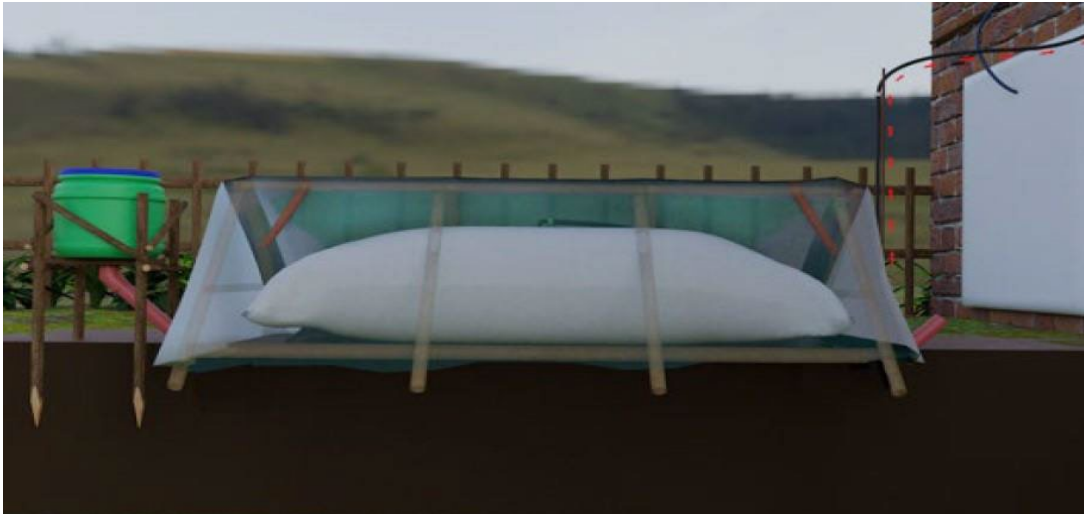


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Fermenter und Gasspeichersack (B)calm
(B)energy operations UG, 2021)

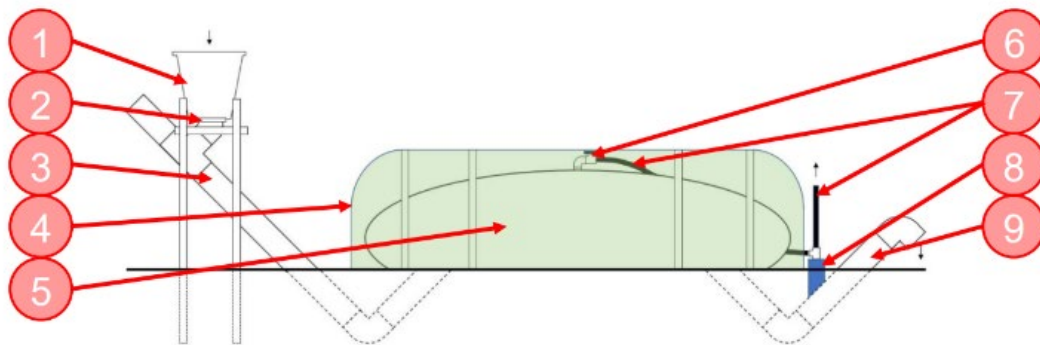


Abbildung 2: Komponenten des Systems (B)calm von Fermenter inkl. Ein- und Austrag
(B)energy operations UG, 2021)
1 Eimer, 2 Flansch, 3 Einlassrohr, 4 Wetterschutz, 5 Gassack, 6 Absperrhahn, 7 Biogasleitung,
8 Überdrucksicherung, 9 Abflussrohr

3.3 Anlagenplanung

Vor Baubeginn wurde die Ausführungsplanung abgeschlossen. Dazu gehörten Pläne und Schemata, die für die Realisierung des Anlagensystems erforderlich waren, wie z. B. Mengen und Qualität von Baumaterialien. Wichtige Planunterlagen (Engeli, 2012) sind im Folgenden aufgelistet:

- Grundrisse, Schnitte, Aufstellungspläne, Rohrleitungspläne (Isometrien)
- Grund- und Verfahrensfliessbilder, R&I-Schemata
- Werkleitungspläne
- Elektroschemata

Da in diesem Projekt die Wärme vor Ort über eine elektrische Heizung bereitgestellt wurde und die Baustelle in einem überschaubaren Umfang blieb, wurde auf die Rohrleitungspläne verzichtet.

Regelmässige und sorgfältige Abnahmen stellten die Bauqualität sicher:

- Trockenabnahmen: Visuelle Prüfungen sämtlicher Bauelemente, Verrohrungen und Montagen
- Nassabnahmen: Dichtigkeitsprüfungen an Behältern und Rohrleitungen



Um auch im Normalbetrieb die Leistung und Sicherheit der Anlage prüfen zu können, wurden Test- und Wartungsintervalle geplant (Steiner, 2014). Im Fall dieser Anlage wurde die Überwachung bereits durch die hohe Abdeckung der Anlage mit Messsystemen gewährleistet, sodass Fehler früh erkannt und behoben werden konnten.

Bei dieser Anlage wurde die gesamte Anlagenplanung und -dokumentation in einem sogenannten «Betriebshandbuch» zusammengefasst. Dadurch sollte das Handeln bei Störungen vereinfacht werden. Im Ordner wurden ausserdem projektspezifische Kontakte und Anlaufstellen sowie Betriebsanleitungen und Sicherheitsdatenblätter abgelegt.

3.4 Anlagendokumentation

Eine Dokumentation der Anlage wurde erstellt, um die spätere Wartung und Reparaturen zu erleichtern. Sie enthielt:

- Betriebsanleitung (Checkliste)
- Anlagen- und Verfahrensbeschreibung mit entsprechenden Schemata
- Risikoanalyse
- Baupläne und Aufstellungspläne
- R&I-Schemata
- Technische Datenblätter und Leistungsangaben von relevanten Anlagenkomponenten
- Sicherheitskonzept mit Gefahrenanalyse

Das Betriebshandbuch umfasst Vorgaben zur Inbetriebnahme und Ausserbetriebnahme, Störungsbehebung und Schulung.

Zur Erstellung der Schemata wurde grundsätzlich nach den Normen DIN EN ISO 10628 und ISO 14617 vorgegangen. Leichte Anpassungen gegenüber den Normen an die Ansprüche der AnlagenbauerInnen wurden vorgenommen. Dies dient dem vereinfachten Verständnis und der Handhabung aller Beteiligten.

Als besondere Herausforderung galt es in diesem Projekt die für die wissenschaftliche Datenauswertung zusätzliche Messtechnik der Biogasanlage in die Steuerung des KREIS-Hauses (Kleinstwohn-form) zu integrieren.

3.5 Anlagenbau

3.5.1 Biogasanlage

Für die Installation der Peripherie wurden die von den Herstellern zur Verfügung gestellten Grundriss- und Schnittpläne herangezogen. In Abbildung 3 sind der Grundriss für die Biogasanlage und deren Schnitt abgebildet.

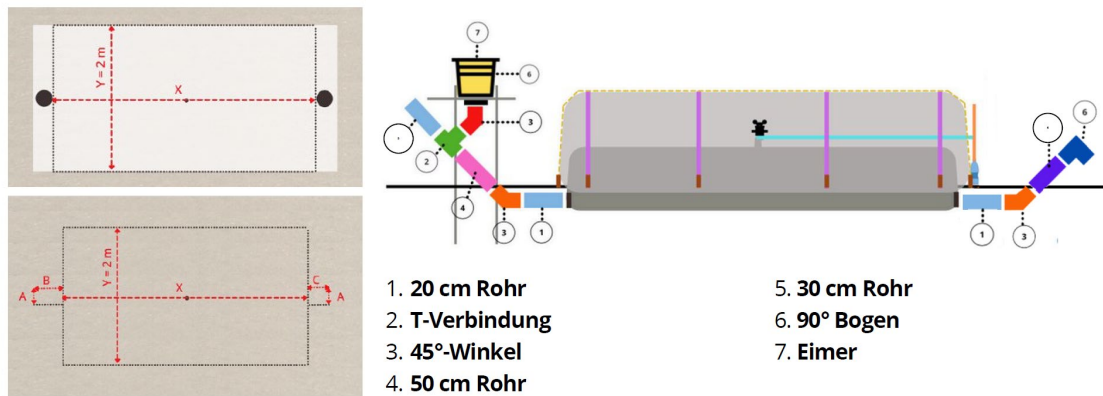


Abbildung 3: Grundriss- und Schnitte BGA
(B)energy operations UG, 2021)

Der erste Aufbau der Anlage wurde Ende Mai 2024 zusammen mit der Firma (B)energy in einem Biogasworkshop durchgeführt. Die Anlage wurde dabei vorerst so aufgebaut, wie dies normalerweise in wärmeren Regionen gemacht wird.

Hierfür wurde zunächst ein Loch mit ca. 2.5 m Breite x 3.5 m Länge und 30-40 cm Tiefe ausgehoben und der Boden gedämmt. Darauf wurde dann der Folienfermenter installiert und die Ein- und Austräge installiert (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Erster Aufbau Mikro-Biogasanlage
Am Ende des Workshops war der Fermentereintrag (rechts), sowie auch der Fermenteraustrag (links) fertiggestellt. Auch die Kondensatfalle und Überdrucksicherung des Biogassystems wurde angebracht (rechts unten).

Zwei Wochen nach dem Workshop und viel Regen, wurde das Konzept noch einmal überarbeitet und die Anlage von Grund auf neu aufgebaut, um einen wissenschaftlichen Betrieb der Anlage auch bei Schweizer Verhältnissen gewährleisten zu können.

Weitere Informationen, inklusive Fotodokumentation des Workshops «Installation der Mikro-Biogasanlage» befinden sich im separaten Dokument «Anhang Schlussbericht deutsch» unter Anhang A1 und A2.

3.5.2 Technischer Ausbau der Biogasanlage

Nach den ersten Arbeiten während des Workshops wurden umfangreichere bauliche Umgebungsarbeiten, Arbeiten zur Erschliessung der Infrastruktur, sowie zum Aufbau der Biogasanlage



inkl. Substratvorbehandlung und Gärgutentnahme sowie zur Installation der EMSR-Technik durchgeführt.

Es wurden folgende Hauptkomponenten aufgestellt:

- Substratvorbehandlung (up-stream): Küchenabfall-Zerkleinerer, Spülbecken
- Infrastruktur, Baumaterial und Bauteile: Dämmmaterial, Bodenschutzfolie, Behälter für Substrat, Gewächshaus / Überdachung, Holzhütte für Schaltschrank, Behälter für Gärgut, elektrischer Anschluss (Stromversorgung, Stromzähler), Internet/Telefonnetz
- Mikro-Biogasanlage (Vergärung): Folienfermenter mit Zu- und Ablauf, Anschlussflansche für die Messtechnik, Überdruckventile, Gasspeichersäcke, elektrische Heizung (600 W) und Kocher
- EMSR-Technik: pH/Redox-Sonden (pH, Redox), Temperatursensoren (T), Drucksensoren (P), Luftfeuchtigkeitsmessgerät, Messumformer, Gasmengenmessgerät, Steuerung mit Verbindung zum KREIS-Haus und installierter Logger-Software etc.



Abbildung 5: Zweiter Aufbau Mikro-Biogasanlage

Aushub, Isolation und Heizkabel (links oben), Fermenteraustrag (rechts oben), Schaltschrank (links unten), Gewächshaus und Holzhütte für Schaltschrank (rechts unten)



3.5.3 Verbesserungsmassnahmen

Bauten und Infrastruktur

Auf Grundlage der durchgeführten Risikoanalyse (separates Dokument «Anhang_Schlussbericht_deutsch» unter Anhang A3) wurden Massnahmen zur Erhöhung der Anlagen- bzw. Betriebssicherheit definiert. Unter anderem wurde dabei die Situation bezüglich Zugänglichkeit der einzelnen Anlagenteile verbessert und ein grösseres, robusteres Gewächshaus aufgebaut. Weil auch dieses der winterlichen Schneelast nicht Stand hielt, wurde es zusätzlich verstärkt (siehe Abbildung 6). Des Weiteren wurde das Gärgut-Austragssystem angepasst sowie die periphere Infrastruktur beispielsweise für die Substratvorbehandlung, für die Probenahme, sowie für die FOS/TAC-Analyse ausgebaut. Ein zusätzlicher Zähler für die Stromverbrauchs- und Leistungsmessung wurde angeschlossen.



Abbildung 6: Stabilisierung des Gewächshauses mit einer Dachlattenkonstruktion

Heizung und Dämmung

Das Heizsystem wurde im Rahmen des Projekts ausschliesslich elektrisch betrieben und bezog seine Energie aus dem öffentlichen Stromnetz, um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Eine Beheizung mittels des erzeugten Biogases oder mittels Photovoltaik wurde aus technischen Gründen sowie aufgrund der verfügbaren Projektmittel nicht umgesetzt. Für praktische Anwendungen empfehlen Hersteller und Projektpartner jedoch die Nutzung von Photovoltaikstrom, vorzugsweise aus überschüssiger Eigenproduktion. Die Kombination von Mikro-Biogasanlage, Photovoltaik und Batteriespeicher kann den Fremdenergiebedarf deutlich reduzieren und die Energieautarkie erhöhen. Die gewählte Betriebsweise ist insbesondere bei der Bewertung der Gesamtenergiebilanz sowie der Übertragbarkeit auf netzferne oder alpine Standorte zu berücksichtigen. Die Auslegung und Bewertung entsprechender autarker Energiesysteme war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung und sollte in zukünftigen Forschungs- und Demonstrationsprojekten vertieft untersucht werden.



Zusätzlich zum elektrischen Heizband unter dem Fermenter mit 660 W wurde von der Substrat-Eintragsseite her ein 150 Watt starker Aquariumheizstab (Thermostat) in das Fermenterinnere eingefügt. Um das Elektrokabel zu schützen, wurde dieses im Eintragsrohr mittels eines Leerrohrs eingeführt. Wenige Tage nach der Installation wurde dieser jedoch beschädigt, vermutlich aufgrund von mechanischen Einwirkungen beim Eintragen von Substrat und/oder bei der Probenahme.

Ein Heizkabel mit einer maximalen Leistung von 1'200 Watt wurde beschafft und von der Substrataustragsseite her in den Folienfermenter verlegt (siehe Abbildung 7). Es diente nach der Installation und Abschaltung der beiden anderen Heizelemente als einzige Heizung. Zur Verbesserung der Fermenterdämmung sowie zum besseren Schutz der Fermenterfolie vor witterungsbedingten Einflüssen wurde ein schwarzes Flies auf dem Folienfermenter angebracht.



Abbildung 7: Heizkabel am Substrataustrag

Überdrucksystem

Zwischen der Gasmengenmessung und dem ersten Gasspeicher wurde eine Druckregulierung (Überdruckablass als Wassertasse mit Tauchrohr ausgeführt) installiert, um den Gasdruck im Fermenter konstant zu halten. Dies war notwendig zum Schutz der Messtechnik im Fermenter. Verbunden mit dem ersten und zweiten Gasspeicher wurde eine zusätzliche Überdrucksicherung installiert, um den maximalen Druck im Gasspeichersystem einzustellen. Es hat sich gezeigt, dass 4 mbar als Vordruck für den Biogasbrenner mehr als ausreichend sind (siehe Abbildung 8). Der benötigte Überdruck für den Brenner wurde mittels Sperrholzplatte auf dem 2 m³ grossen Gasspeichersack gewährleistet.



Abbildung 8: Installierte Druckregulierung und zweite Wassertasse

Substratzerkleinerung

Als Versuchsvarianten wurden zwei Substratzerkleinerungsmaschinen installiert. Nebst einem Spülbecken-Mazerator (Insinkerator) wurde ein industrieller Küchenmixer angeschafft (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Industrieller Küchenmixer Cutter ECO 12 Liter

Für die Substratzwischenlagerung (Rinderfestmist, Rindergülle etc.) wurden vier 60-Liter-Weithalsfässer zur Verfügung gestellt. Somit nahm die Anlagenfütterung während der Inbetriebnahmephase weniger Zeit in Anspruch. Aufgrund der Animpfung und Fütterung der Anlage mit Rindergülle wurden zusätzlich zwei IBC-Container mit je 1'000 L Inhalt organisiert. Dies ermöglichte eine einfachere Handhabung von Substrat und Gärgut, falls umgepumpt oder die Anlage entleert bzw. teilentleert werden musste.



Betriebsüberwachung und -analyse

Zur mikrobiologischen Betriebskontrolle wurde punktuell die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren (FOS, Summenparameter) und der Pufferkapazität (TAC, Summenparameter) sowie der pH-Wert händisch (offline) analysiert. Diese Parameter dienen zusammen mit dem daraus ermittelten FOS/TAC-Verhältnis der biologischen Überwachung des Vergärungsprozesses. Die grafische Oberfläche der Messwertanzeige des FOS/TAC-Analysegeräts (Abbildung 10) wurde um eine Datenexport-Funktion erweitert.

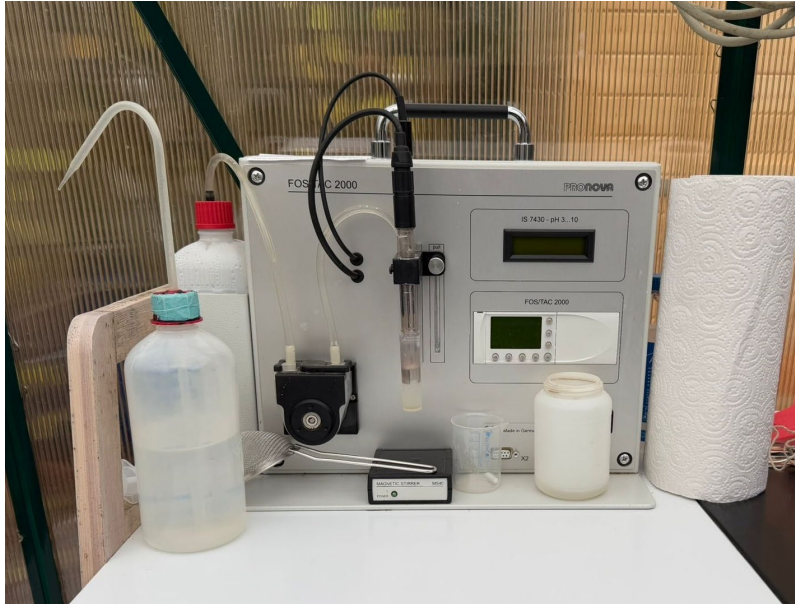


Abbildung 10: Titrator FOS/TAC 2000

Rezirkulation

Für einen Versuch zur besseren Durchmischung des Fermenterinhalts und Verringerung der Temperaturgradienten wurde eine Kreislaufrführung des Gärguts ermöglicht. Dazu war eine Substrataustrags- bzw. Rezirkulationspumpe, zusätzliches Schlauchmaterial und einige Verbindungsstücke notwendig (Abbildung 11).



Abbildung 11: Rezirkulationspumpe am Substrataustrag



Biogaskocher

Die Prüfung der Funktionstüchtigkeit des Biogaskochers erfolgte nach der Warm-Inbetriebnahme, sobald brennbares Biogas zur Verfügung stand. Hierfür wurde das Gasventil vom Gasspeicher zum Biogaskocher geöffnet und der Kocher in Betrieb gesetzt (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Biogaskocher zur Erwärmung von Wasser

3.6 Messtechnik und Automatisierung

Datenerfassung

Abbildung 13 zeigt schematisch die Position der Messtellen und Messgrößen auf der Anlage.

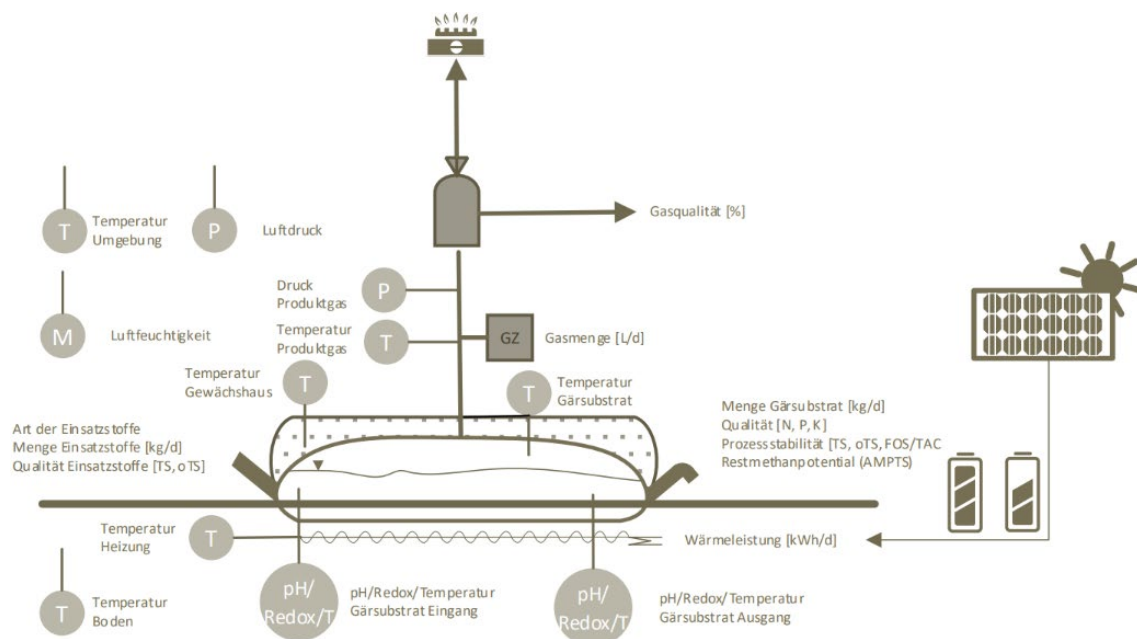


Abbildung 13: Übersicht und Position der Messungen auf der MiBAS-Anlage



Zur wissenschaftlichen Datenerfassung wurden zahlreiche Messeinheiten am Reaktor und der Peripherie für Online-Messungen installiert (pH-Wert, Redox-Potenzial, Temperatur, Biogas-Durchflussmessung etc.). Zusätzlich wurden relevante Messgrößen protokolliert (Art und Menge der Einsatzstoffe etc.), Proben offline und im Labor analysiert (Biogasqualität, TS, oTS, FOS/TAC, BMP, RMP etc.), um verschiedene Betriebskenngrößen offline zu bestimmen. Diese Daten dienten dazu, den Biogasbildungsprozess zu quantifizieren, zu analysieren und zu optimieren, sowie eine Massen- und Energiebilanz zu erstellen.

Automatisierung

Die Automatisierung der Anlage erfolgte durch eine Steuerung mit einem Raspberry Pi (siehe Abbildung 14). Dieser kostengünstige Kleincomputer ermöglicht die Verarbeitung von analogen und digitalen Signalen, die in einer Datenbank gespeichert werden können. Ausserdem können damit Prozessgrößen geregelt werden. Die Firma KUNBUS hat einen speziell für den industriellen Einsatz entwickelten Raspberry Pi, den sogenannten Revolution Pi, konzipiert. Dieser kann auf einer Hutschiene montiert und mit verschiedenen Analog- und Digitalmodulen erweitert werden. Die Automatisierungslogik wird über die Software Node-RED implementiert, während das Node-RED Dashboard als Benutzeroberfläche dient. Nach der Verarbeitung wurden die Daten in einer Influx-Datenbank gespeichert, die bereits vom Synergy Village im KREIS Haus implementiert war (siehe Abbildung 14).

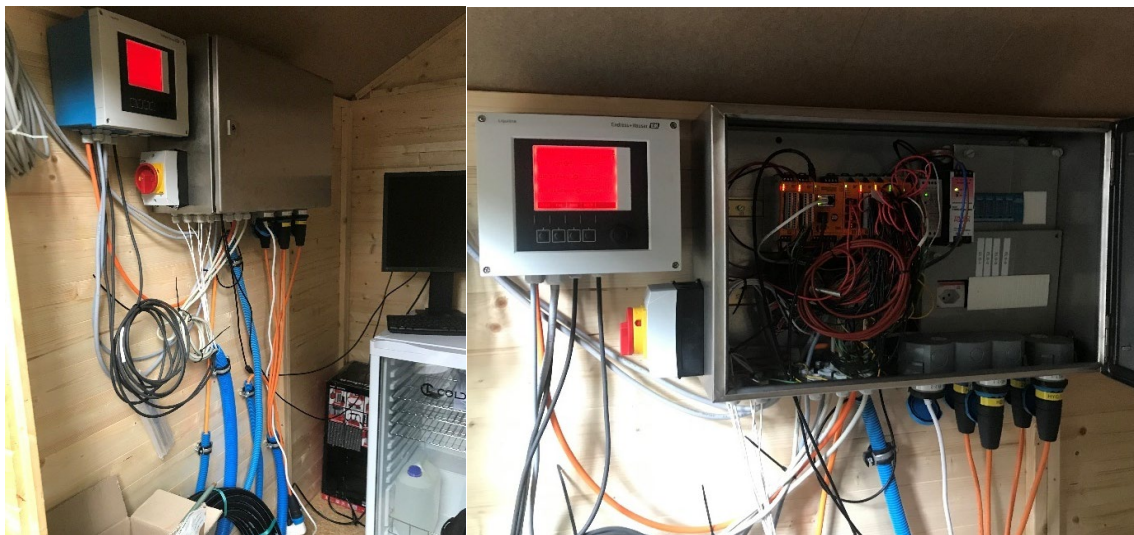


Abbildung 14: Innenansicht der Steuerzentrale mit dem Schaltschrank

Die einzige aktiv geregelte Messgröße war die Fermentertemperatur, die durch Ein- und Ausschalten der Fermenterheizung reguliert wurde. Für diese Aufgabe wurde ein klassischer PID-Regler eingesetzt, der über das Node-RED Dashboard aktiviert werden und über den auch die gewünschte Temperatur eingestellt werden konnte. Die Betriebsweise der Heizung wurde während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich optimiert.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Übersicht Phasen des Anlagenbetriebs

Die nachfolgenden Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der einjährigen Messkampagne 2024/2025, die nach der Kaltinbetriebnahme und dem Dichtigkeitstests im September 2024 mit der Warm-Inbetriebnahme am 01.10.2024 startete.

Tabelle 1: **Übersicht des Anlagenbetriebs über die einjährige Messkampagne**
Warm-Inbetriebnahme mit flüssigem Gärgut
Neu-Inokulation mit Rindergülle und Rinderfestmist
Umstellung der Fütterung auf Küchen- und Gartenabfälle (Substrat)
Realbetrieb: Fütterung durch das Team der Synergy Village
Betrieb ohne Heizung: Testphase des Betriebs ohne Erwärmung des Fermenterinhalts

Phase	Datum	Tag	Dauer [d]	Heizung	Fütterung			
					Gülle	Festmist	Gärgut	Substrat
Warm-Inbetriebnahme	01.10.2024-31.10.2024	0-30	31	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Neu-Inokulation	01.11.2024-24.12.2024	31-84	54	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Umstellung Fütterung	25.12.2024-28.02.2025	85-150	66	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Real-Betrieb	01.03.2025-01.07.2025	151-273	123	Ja	Teilweise	Nein	Nein	Ja
ohne Heizung	02.07.2025-01.10.2025	274-365	92	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja

4.1.1 Warm-Inbetriebnahme (Tag 0-30)

Für die Kalt-Inbetriebnahme wurde der Fermenter mit 1'900 Liter Wasser gefüllt. Für die Warm-Inbetriebnahme am 01.10.2024 (Tag 0) wurde der Fermenter mit flüssigem Gärgut (Presswasser der Axpo Biomasse AG, Anlage Jona) befüllt, welches als Inokulum diente. Die Fütterung des Fermenters mit Küchen- und Gartenabfällen wurde anschliessend mit stufenweiser Erhöhung der Fütterungsmenge realisiert. Die Messdaten dazu sind der Abbildung 15 zu entnehmen.

4.1.2 Neu-Inokulation (Tag 31-84)

Aufgrund der tiefen Gärtemperaturen während des Anfahrbetriebs konnte der Vergärungsprozess mit dem thermophilen Inokulum (flüssiges Gärgut) nur ungenügend aktiviert werden. Nach ersten Fütterungsversuchen mit Küchenabfällen sank der pH-Wert in kritische Bereiche unter pH 7.0. Dies deutete darauf hin, dass sich die methanogenen Archaeen nicht genügend aktiv am anaeroben Abbau der Säuren beteiligen konnten, was zur Akkumulation von flüchtigen organischen Säuren (FOS) führte und das pH-Puffersystem aufbrauchte.

Als Massnahme zur Aktivierung der Methanbildung und Erhöhung der Pufferkapazität wurden am 01.11.2024 (Tag 31) rund 1'000 L Rindergülle dem Fermenter zugeführt und anschliessend drei Mal pro Woche eine Fütterung mit je 5 kg Rinder-Festmist und 10 L Rindergülle durchgeführt. Zu Versuchszwecken wurde der Reaktorinhalt am 13.11.2024 (Tag 43), 15.11.2024 (Tag 45), 20.11.2024 (Tag 50) und 06.12.2024 (Tag 66) rezirkuliert. Messdaten zu dieser Phase sind ebenfalls der Abbildung 15 zu entnehmen.



Während dieser Phase wurde das unterdimensionierte Heizungssystem durch ein leistungsstärkeres Heizsystem ersetzt.

4.1.3 Umstellung auf Fütterung mit Küchen- und Gartenabfällen (Tag 85-150)

Am 08.01.2025 (Tag 100) wurde auf eine sukzessive Fütterung mit Küchen- und Gartenabfällen umgestellt. Dazu wurde die Menge an Rindergülle von anfangs 15 kg pro Fütterung auf 0 kg reduziert und parallel dazu die Menge von Küchen- und Gartenabfällen von 0 kg auf 15 kg pro Fütterung erhöht. (siehe Abbildung 15). Während dieser Umstellungsphase wurde darauf geachtet, dass der Fermenter regelmässig montags, mittwochs und freitags gefüttert wurde. Die Messdaten dazu sind wiederum der Abbildung 15 zu entnehmen.

4.1.4 Normale Fütterung (151-273)

Nach der Umstellung auf den Regelbetrieb mit Küchen- und Gartenabfällen wurde die Anlage an das Betriebsteam des Synergy Village übergeben und auf «Realbetrieb» gewechselt. D.h. es wurden keine Vorgaben mehr zum Fütterungsintervall oder Fütterungsmenge gemacht und der Fermenter je nach Bedarf und Anfall von Küchen- und Gartenabfällen gefüttert. Ausserdem wurden über diesen Zeitraum noch kleinere Mengen von Rindergülle bei der Fütterung hinzugegeben. Eine Messdatenübersicht findet sich in Abbildung 15.

4.1.5 Keine Heizung (274-365)

Um auch den Betrieb ohne eine Heizung zu untersuchen, wurde am 02.07.2025 die Heizung ausgeschaltet. Die Fütterung wurde dabei weitestgehend gleich gehalten wie in der Periode zuvor, jedoch ohne kleinere Zugaben von Rindergülle (siehe Abbildung 15).

4.2 Jahresverlauf Fütterungsmengen, Raumbelastung und Verweilzeit

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 15) zeigt Fütterungsmengen der eingesetzten Inokula und Substrate im Jahresverlauf. Insgesamt wurden im Jahresverlauf 434 kg Rindergülle, 25 kg Flüssiges Gärgut, 87 kg Rinderfestmist, 613 kg Substrat und 261 kg Wasser der Anlage zugeführt, ohne die beiden Inokulationen. Die jährliche Gesamtfütterungsmenge entspricht 1'420 kg. Im Durchschnitt wurden täglich 3.88 ± 6.63 kg dem Fermenter zugeführt.

Daraus ergibt sich, bezogen auf das Fermentervolumen von 2'000 L, eine mittlere hydraulische Verweilzeit von 495 Tagen. Dies bedeutet, dass dem Substrat ausreichend Zeit zur Verfügung stand, um weitgehend abgebaut und in Biogas umgewandelt zu werden. Während der verschiedenen Betriebsphasen schwankte die mittlere hydraulische Verweilzeit zwischen 330 und 1'289 Tagen (siehe Abbildung 16).

Unter der Annahme, dass der überwiegende Teil der biologisch abbaubaren organischen Substanz innerhalb einer hydraulischen Verweilzeit von etwa 30 Tagen umgesetzt wird, wie dies für gut abbaubare Küchenabfälle unter mesophilen Bedingungen häufig angenommen wird, wäre für die eingesetzte Substratmenge ein um den Faktor 16.5 kleineres Fermentervolumen ausreichend gewesen. Dies entspricht einem erforderlichen Volumen von lediglich rund 120 L. Aufgrund des grossen Fermentervolumens lag die organische Raumbelastung im Mittel bei lediglich 0.236 ± 0.390 kg oTS $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$. Im Verlauf der einjährigen Messkampagne schwankte sie, abhängig von der Art des eingesetzten Substrats sowie der zugeführten Menge, zwischen 0.086 und 0.314 kg oTS $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$.

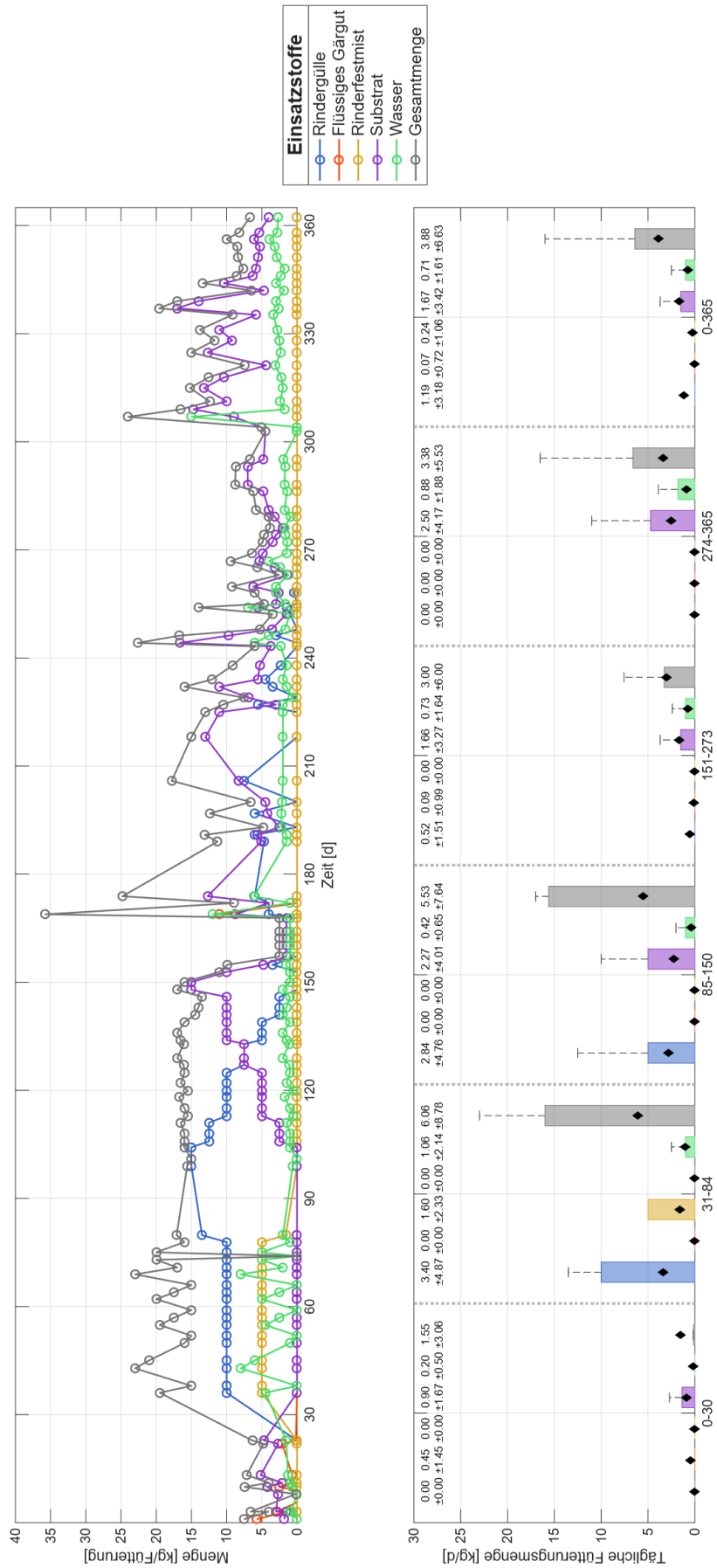


Abbildung 15: Verlauf der Fütterungsmengen über einjährige Messkampagne

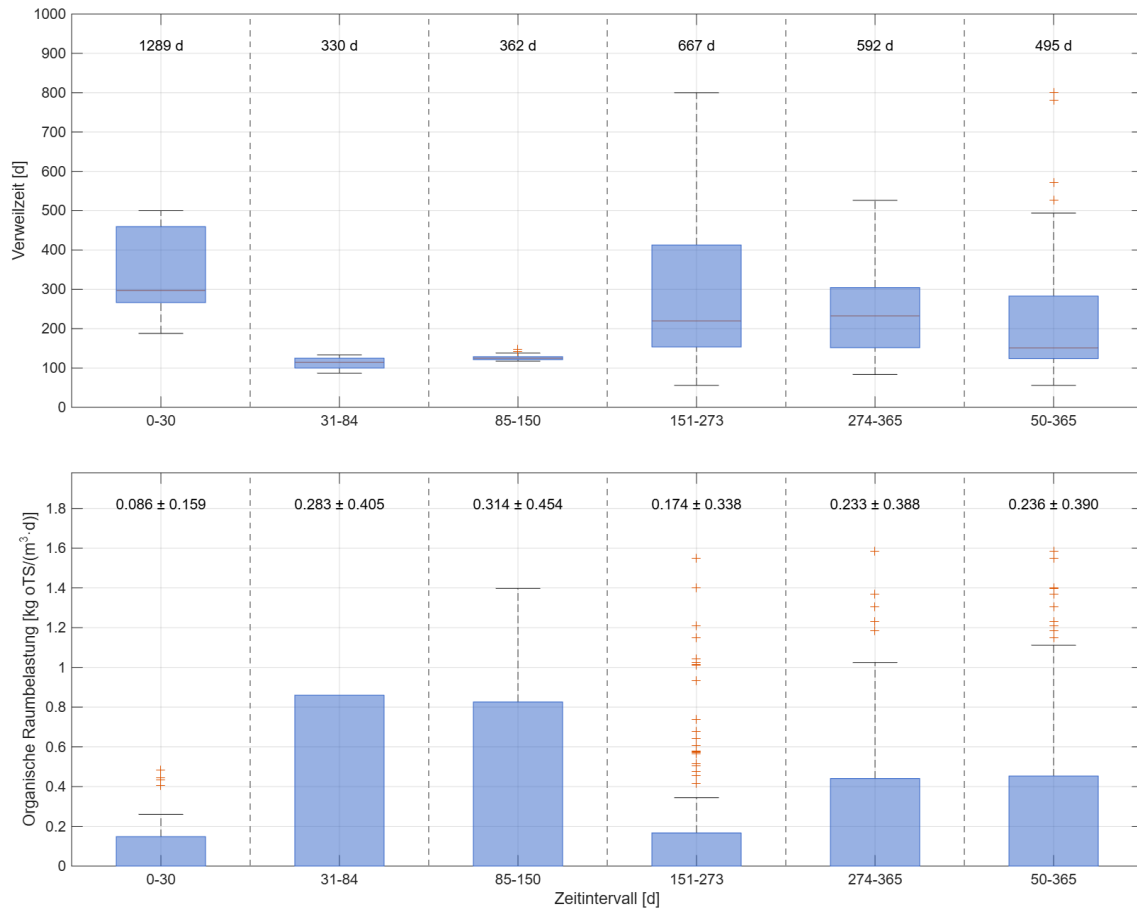


Abbildung 16: Verweilzeit und organische Raumbelastung der einzelnen Betriebsphasen

4.3 Jahresverlauf Temperatur

In der nachfolgenden Abbildung 17 ist der Verlauf der Temperaturen der Umgebung, der Heizung, des Fermenter Gasraums, des Fermenters vorne und des Fermenters hinten über die einjährige Messkampagne abgebildet.

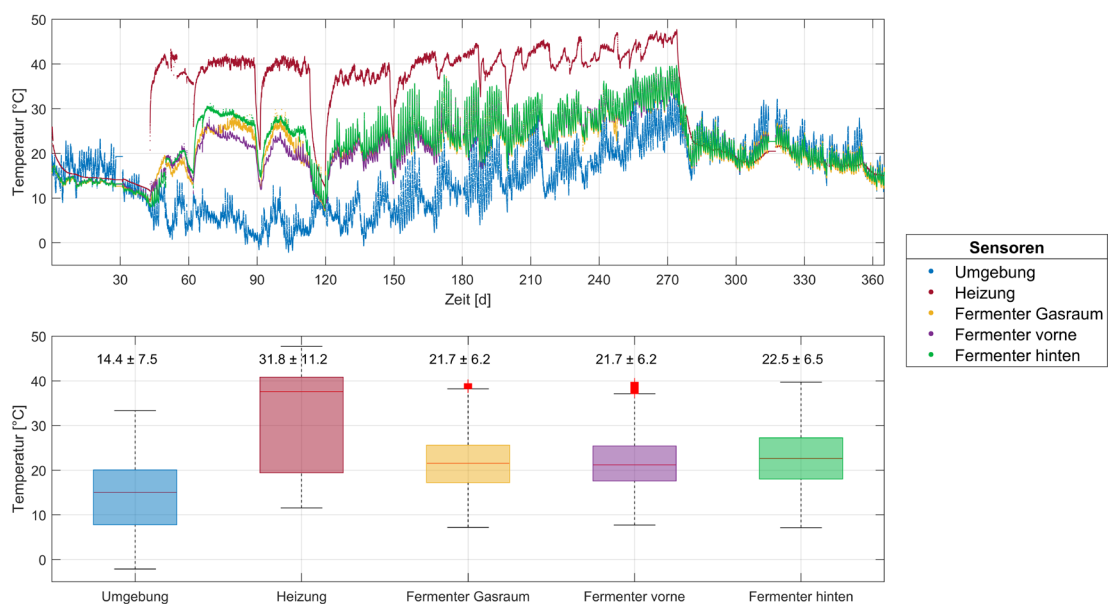




Abbildung 17: Temperaturverläufe über die einjährige Messkampagne

Messstellen: Umgebung, Heizung, Fermenter Gasraum, Fermenter vorne, Fermenter hinten

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Umgebungstemperatur mit der Tages- und Jahreszeit stark schwankt. In den ersten 40 Tagen verlaufen alle Temperaturen auf einem ähnlichen Temperaturniveau, da zu diesem Zeitpunkt die Heizung noch nicht ausreichend war, um den Fermenter zu erwärmen.

Mit der Installation der leistungsstärkeren Heizung konnte die Temperatur bei der Heizung (am Fermenterboden) zumeist konstant bei 40°C gehalten werden. Dementsprechend stiegen auch die Temperaturen im Fermenter vorne und hinten und im Gasraum an, erreichten aber nie das Temperaturniveau wie am Fermenterboden. Dies liegt hauptsächlich an der Positionierung des Wärmebands bzw. Wärmetauschers auf dem Fermenterboden sowie der fehlenden Durchmischungsmöglichkeit des Systems. Ohne entsprechende Rührtechnik kommt es zwangsweise zu einer Temperaturschichtung im Fermenter.

In Abbildung 18 ist der Verlauf der Temperaturen der Umgebung und des Fermenter-Gasraums abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Temperaturen am Anfang der einjährigen Messkampagne (0-30) auf einem ähnlich niedrigen Temperaturniveau liegen und dann mit dem Aktivieren der Heizung und kälteren Umgebungstemperaturen immer weiter voneinander abweichen. Mit dem Anstieg der Umgebungstemperaturen im Sommer und dem Deaktivieren der Heizung (am Tag 273) liegen die beiden Temperaturen wieder in einem ähnlichen Bereich.

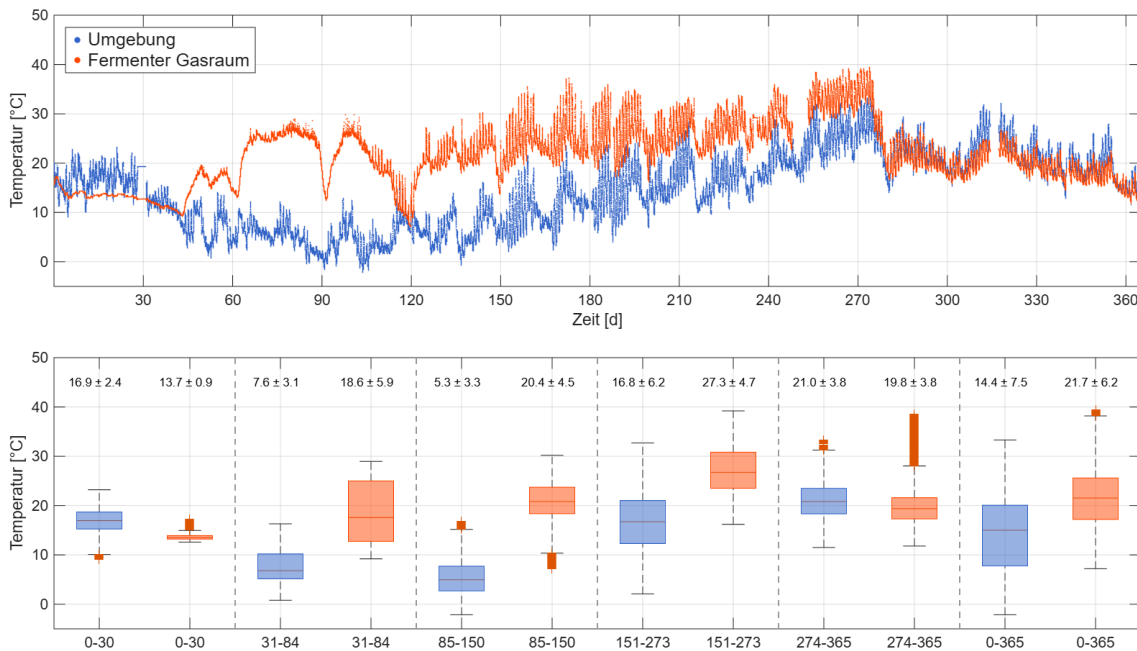


Abbildung 18: Verlauf der Umgebungs- und Gasraum-Temperatur im Jahresverlauf

Am 08.04.2025, 19.09.2025 und 26.10.2025 wurden Wärmebildaufnahmen des Fermentersystems aufgenommen (siehe Abbildung 19). Man sieht dabei im April bei laufender Heizung grössere Temperaturunterschiede zwischen Fermenter und Umgebung im Gewächshaus als im September und Ende Oktober beim Betrieb ohne Heizung.

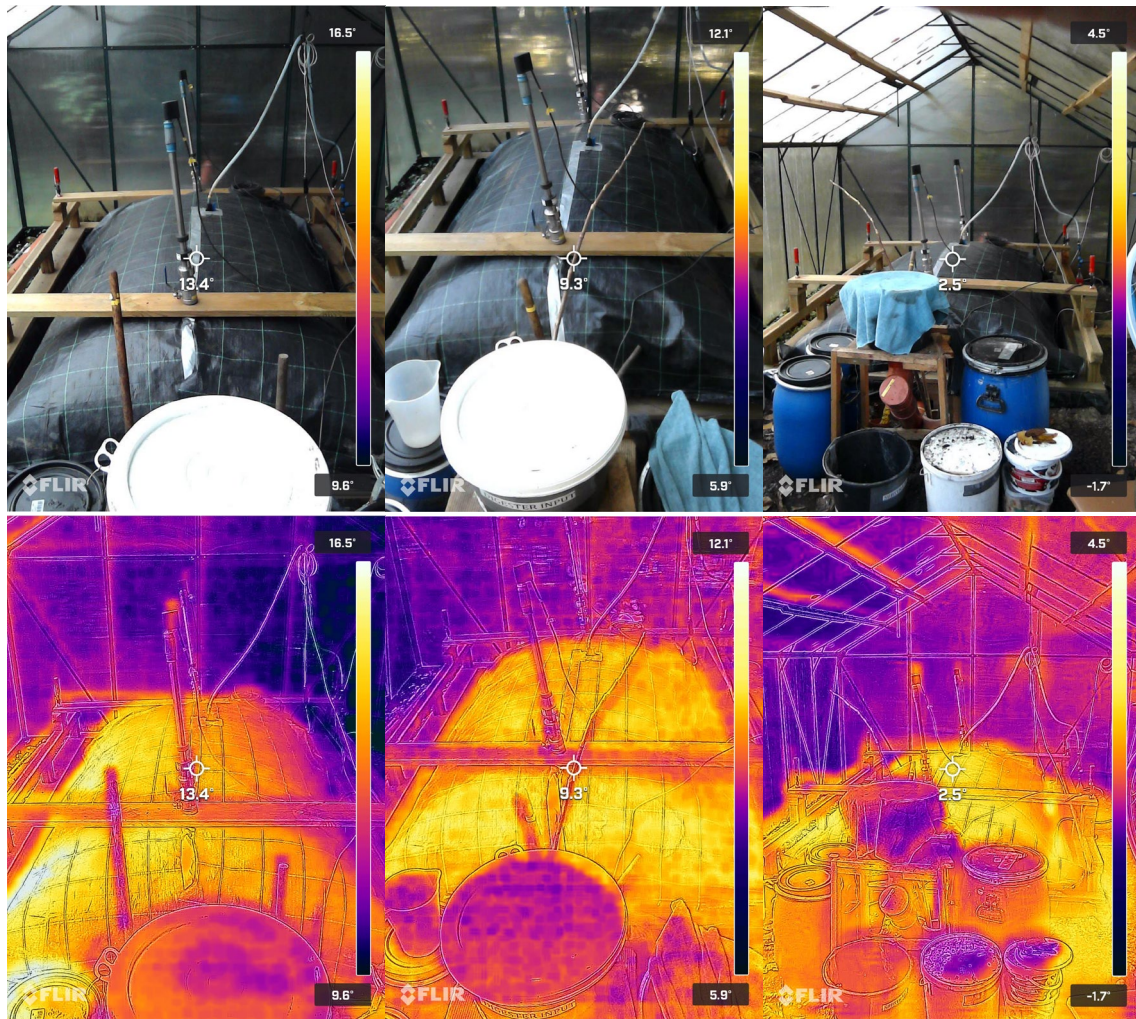


Abbildung 19: Wärmebildaufnahmen (unten) des Folienfermenter-Systems (oben)
08.04.2025 (links), 19.09.2025 (Mitte), 26.10.2025 (nach dem Versuchsende, rechts)

4.4 Jahresverlauf pH-Wert

Wie aus der Abbildung 20 ersichtlich, nahm der pH-Wert in den ersten zwei Wochen – bei punktuellen Fütterungen mit Küchenabfällen – kontinuierlich ab. Der Anfangswert von ca. pH 8.0 senkte sich innert zwei Wochen auf kritische Werte zwischen pH 6.5 und pH 7.0.

Durch die Neuinokulation an Tag 31 und der Aktivierung der Heizung, konnte der pH-Wert im Fermenter stabilisiert werden. Dieser pendelte sich vorne bei 6.85 ± 0.24 und hinten bei 6.86 ± 0.13 ein. Dieses Niveau konnte gehalten werden bis ca. Tag 230, obwohl der Reaktor nicht durchmischt wurde. Ab diesem Zeitpunkt ging der pH-Wert vorne am Fermenter langsam runter und erreichte nach der Abschaltung der Heizung am Tag 273 einen tiefen mittleren pH-Wert von 5.97 ± 0.49 . Der pH-Wert hinten im Fermenter blieb hingegen auf einem stabilen Niveau von 6.88 ± 0.06 , was darauf hindeutet, dass sich aufgrund einer fehlenden Durchmischung des Fermenters im vorderen Bereich hydrolytische und säurebildende Prozesse etablierten und sich die Methanbildung auf den hinteren Bereich des Fermenters konzentrierte. Der tiefere pH-Wert vorne im Reaktor hatte aufgrund des grossen Fermentervolumens und der langen Verweilzeit keinen messbaren Einfluss auf die Gasqualität.

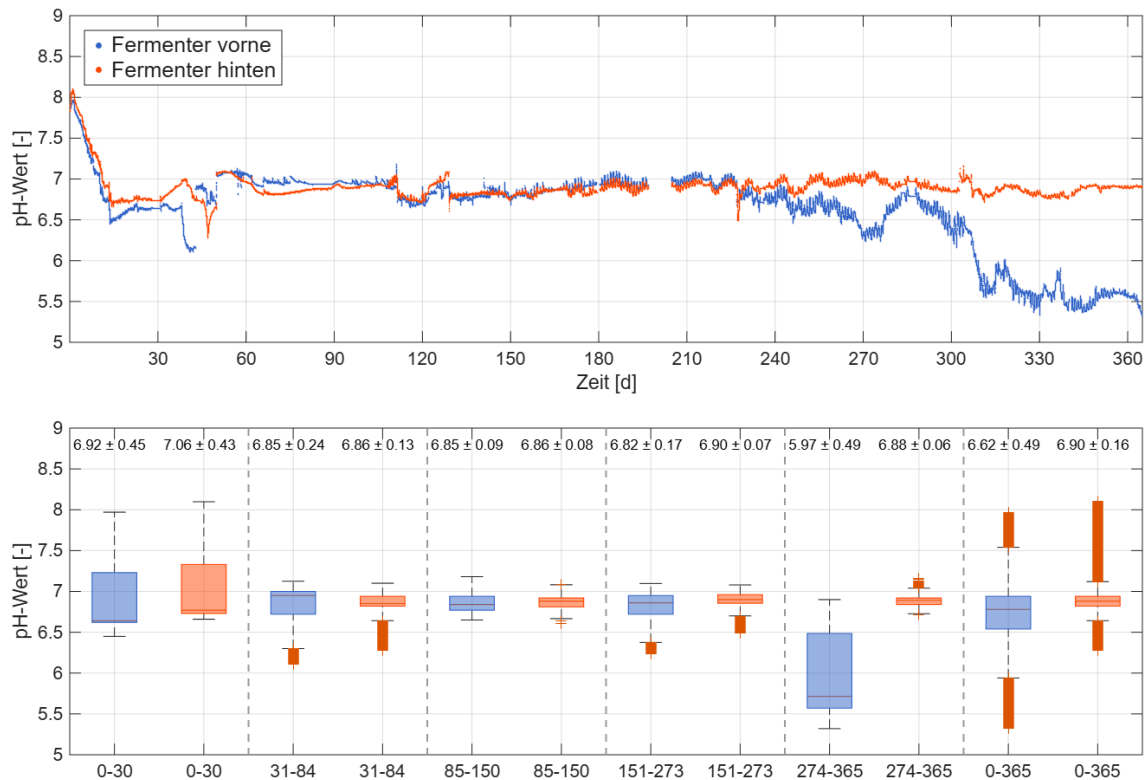


Abbildung 20: Verlauf des pH-Werts

4.5 Jahresverlauf Redox-Potenzial

In Abbildung 21 ist der Verlauf des Redox-Potenzials im vorderen und hinteren Teil des Fermenters über ein Jahr abgebildet. Das Redox-Potenzial zeigt an, ob man sich in einer oxidierenden oder reduzierenden Milieuumgebung befindet. Im anaeroben Fermentersystem ist daher ein entsprechend tiefes bzw. negatives Redox-Potenzial zu erwarten. Zu Beginn der Messkampagne ist das Redox-Potenzial noch positiv, da sich höhere Konzentrationen an Sauerstoff im System befinden. Mit dem zunehmenden anaeroben Abbau und der Bildung von CH_4 und CO_2 wird der molekulare Sauerstoff abgebaut, das Redox-Potenzial geht in den negativen Bereich über.

Grössere Schwankungen kurz nach der Neu-Inokulation am Tag 31 sind vor allem auf Zirkulationsversuche des Reaktorinhalts am 13.11.2024 (Tag 43), 15.11.2024 (Tag 45), 20.11.2024 (Tag 50) und 06.12.2024 (Tag 66) zurückzuführen, bei welchen mithilfe einer Tauchpumpe im Austrag Material von hinten nach vorne gefördert wurde und vermutlich zu einem zusätzlichen Eintrag von Sauerstoff führte.

Im späteren Verlauf der Messkampagne stabilisierte sich das Redox-Potenzial vorne und hinten weitestgehend, während das Redox-Potenzial erwartungsgemäss vorne im Fermenter leicht höher war als hinten, da mit der Fütterung vorne sauerstoffreiches Substrat in das System eingetragen wurde.

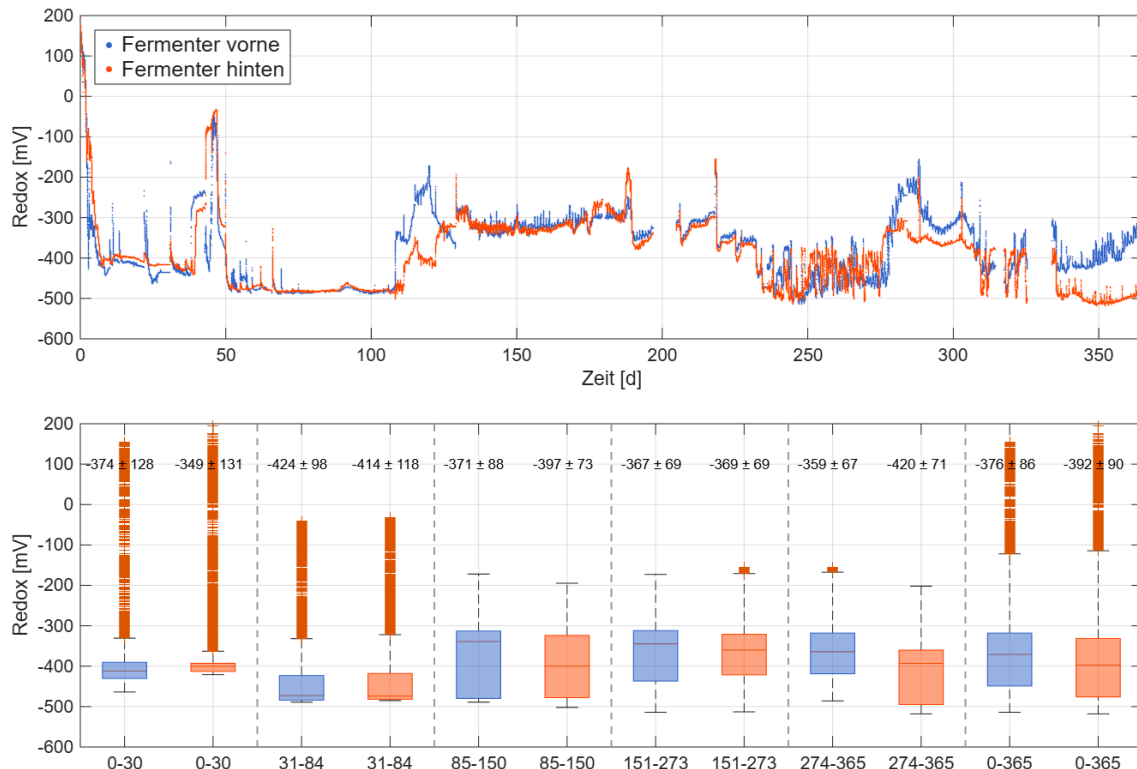


Abbildung 21: Verlauf des Redox-Potenzials

4.6 Jahresverlauf FOS, TAC und FOS/TAC-Verhältnis

Während der Messkampagne wurden in regelmässigen Abständen Fermenterproben am Ein- und Austrag entnommen und titriert, um die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren (FOS), die Pufferkapazität als Summenparameter des totalen anorganischen Carbonatpuffers (TAC) sowie das daraus resultierende FOS/TAC-Verhältnis zu bestimmen.

Die Bestimmung des FOS/TAC-Verhältnisses stellt für Betreiber von Biogasanlagen eine etablierte und vergleichsweise einfache Methode dar, um den biologischen Zustand des Vergärungsprozesses zu beurteilen. Dabei werden die flüchtigen organischen Säuren (FOS), welche als Zwischenprodukte des mikrobiellen Abbaus entstehen, der Pufferkapazität des Carbonat- und Hydrogencarbonatsystems (TAC) gegenübergestellt. Je niedriger die FOS-Konzentration und je höher die TAC-Konzentration, desto stabiler verläuft in der Regel der Prozess. FOS/TAC-Werte zwischen 0.3-0.4 gelten als optimal. Werte über 0.7 weisen häufig auf eine Störung der Methanbildung hin, beispielsweise infolge einer Überfütterung des Fermenters.

Die FOS-Konzentration lag während der gesamten Betriebszeit im Bereich von 0.5 g L^{-1} bis 4.5 g L^{-1} . Zu Beginn der Messkampagne zeigte sie zunächst eine abnehmende Tendenz, stieg jedoch mit fortschreitender Betriebsdauer wieder leicht an (siehe Abbildung 22). Die TAC-Konzentration bewegte sich zwischen 3.0 g L^{-1} und 8.0 g L^{-1} . Das daraus berechnete FOS/TAC-Verhältnis betrug im Bereich des Fermentereintrags durchschnittlich 0.42 ± 0.25 , während es im Fermenteraustrag durchschnittlich bei 0.21 ± 0.09 lag.

Ab Tag 230 wurden ausschliesslich Proben aus dem Fermenteraustrag entnommen und später im Labor analysiert. Dabei lagen die FOS-Konzentrationen zwischen 0.6 g L^{-1} bis 1.5 g L^{-1} und die TAC-Konzentration zwischen 3.2 g L^{-1} bis 6.4 g L^{-1} . Das daraus resultierende FOS/TAC-Verhältnis bewegte sich zwischen 0.12 bis 0.27.



Die Ergebnisse zeigen, dass im Fermenteraustrag durch die lange Verweilzeit des Substrats und die geringe Durchmischung konstant niedrige FOS/TAC-Verhältnisse von durchschnittlich 0.21 ± 0.09 erreicht wurden. Dies deutet darauf hin, dass die gebildeten kurzkettigen Fettsäuren weitgehend abgebaut wurden. Im Bereich des Fermentereintrags war die Streuung der FOS/TAC-Werte deutlich grösser, was auf Unterschiede in der Zusammensetzung und Menge der eingesetzten Substrate zurückzuführen ist. Dennoch lag das mittlere FOS/TAC-Verhältnis mit 0.42 ± 0.25 auch hier innerhalb eines für stabile Biogasprozesse typischen Bereichs.

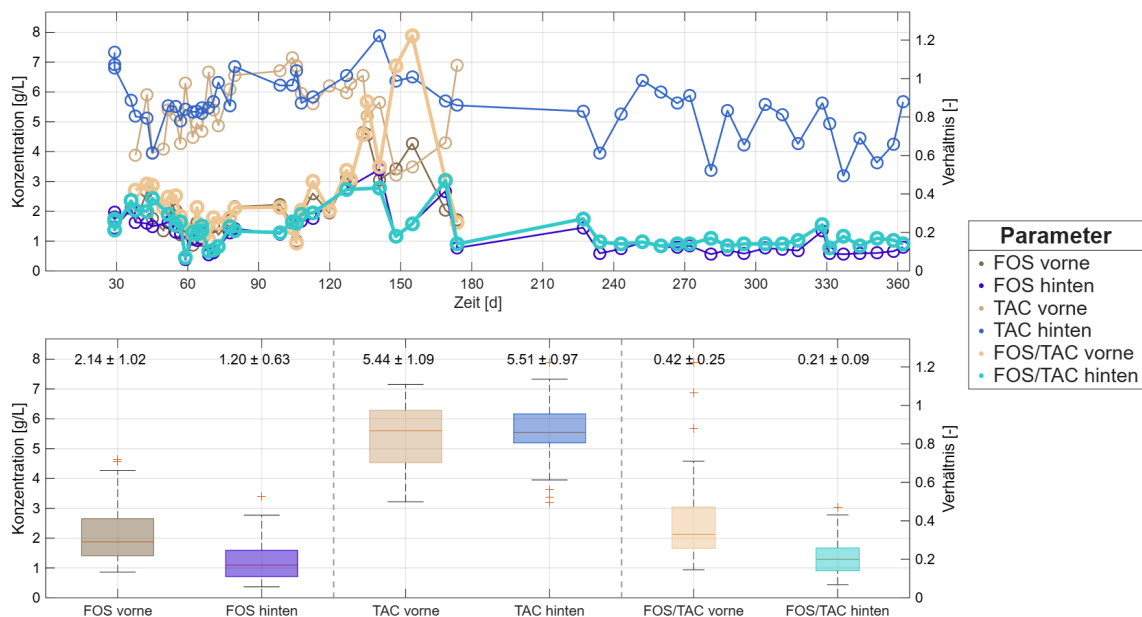


Abbildung 22: Verlauf des FOS- und TAC-Werts und des FOS/TAC-Verhältnisses

4.7 Jahresverlauf des Drucks

In den herkömmlichen Mikro-Biogasanlagen ohne Messtechnik kann das erzeugte Biogas direkt in den Gasspeicher strömen, wodurch sich im System kaum ein Überdruck aufbaut. Mit der Installation von Messtechnik, beispielsweise eines Gasmengenmessers, muss jedoch ein geringer Überdruck im System vorhanden sein. Dieser stellt sicher, dass das Gas auch dann in die vorgesehene Richtung durch die Messinstrumente strömt, wenn beispielsweise der Gasspeicher bereits vollständig gefüllt ist. Zur Absicherung des Systems wurde zusätzlich eine Überdrucksicherung in Form einer Gaswaschflasche installiert. Der zulässige Überdruck wurde dabei über die Füllhöhe auf ± 25 mbar eingestellt.

Bevor das produzierte Biogas in den Gasspeicher gelangt, muss es ein installiertes Wasserschloss passieren. Dadurch wird ein Rückströmen des Gases verhindert.

Im Rahmen der Kaltinbetriebnahme wurde das System mittels Druckluft unter einen leichten Überdruck gesetzt, um die Gasdichtigkeit des Fermenters sowie der Gasleitungen zu überprüfen. Auf diese Weise konnten mögliche Leckagen frühzeitig erkannt und behoben werden. Durch die kontinuierliche Messung des Umgebungsdrucks sowie des Drucks im Fermentersystem und die daraus berechnete Druckdifferenz kann die Gasdichtigkeit während des laufenden Betriebs überwacht werden.

Zu Beginn der Messkampagne lagen Umgebungsdruck (Luftdruck) und Gasdruck vor der Gasmengenmessung auf einem nahezu identischen Niveau; die Druckdifferenz betrug lediglich ± 3.5 mbar (siehe Abbildung 23). Erst nach der Neuinokulation (Tag 31) stellte sich im Fermenter ein Überdruck von etwa 9 bis 10 mbar gegenüber dem Umgebungsdruck ein. Dieser stieg im Verlauf der



Sommermonate auf bis zu 16 mbar an und sank gegen Ende der Messkampagne wieder auf rund 9 mbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Fermentersystem einschliesslich der Gasleitungen während der gesamten Messkampagne stets einen Überdruck gegenüber dem Umgebungsdruck aufwies. Dies bestätigt die Gasdichtigkeit des Systems und deutet darauf hin, dass keine relevanten Gasverluste durch Leckagen auftraten.



Abbildung 23: Verlauf des Umgebungs- und Gasdrucks

4.8 Jahresverlauf der Gasproduktion

In Abbildung 24 ist der Verlauf der Gasproduktion und Gasproduktionsrate über die einjährige Messkampagne abgebildet. Nach der Warm-Inbetriebnahme wurde zunächst keine Gasproduktion gemessen. Zunächst musste im Reaktor genug Druck aufgebaut werden. Kurz nach der Neuinokulation konnte dann das erste Biogas mithilfe des Gasmengenmessers gemessen werden. Bis zum Ende der Messkampagne konnte eine Gesamtbio gasmenge von 34.03 m³ bzw. Gesamtbio methane menge von 21.5 m³ erfasst werden. Die Biogasmenge, die eventuell über die Überdrucksicherung abgeblasen wurde, weil der Gasspeicher zu voll war bzw. nicht rechtzeitig geleert wurde, ist in dieser Menge nicht enthalten.



Bei der Gasproduktionsrate ist zu erkennen, dass bei der Fütterung mit Küchen- und Gartenabfällen tendenziell mehr Gas produziert wird. So liegt die mittlere Gasproduktionsrate bei der normalen Fütterung (Tag 151-273) und eingeschalteter Heizung bei $0.19 \pm 0.24 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. In der anschliessenden Phase mit abgeschalteter Heizung (Tag 274-365) sinkt dieser Wert auf $0.09 \pm 0.30 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

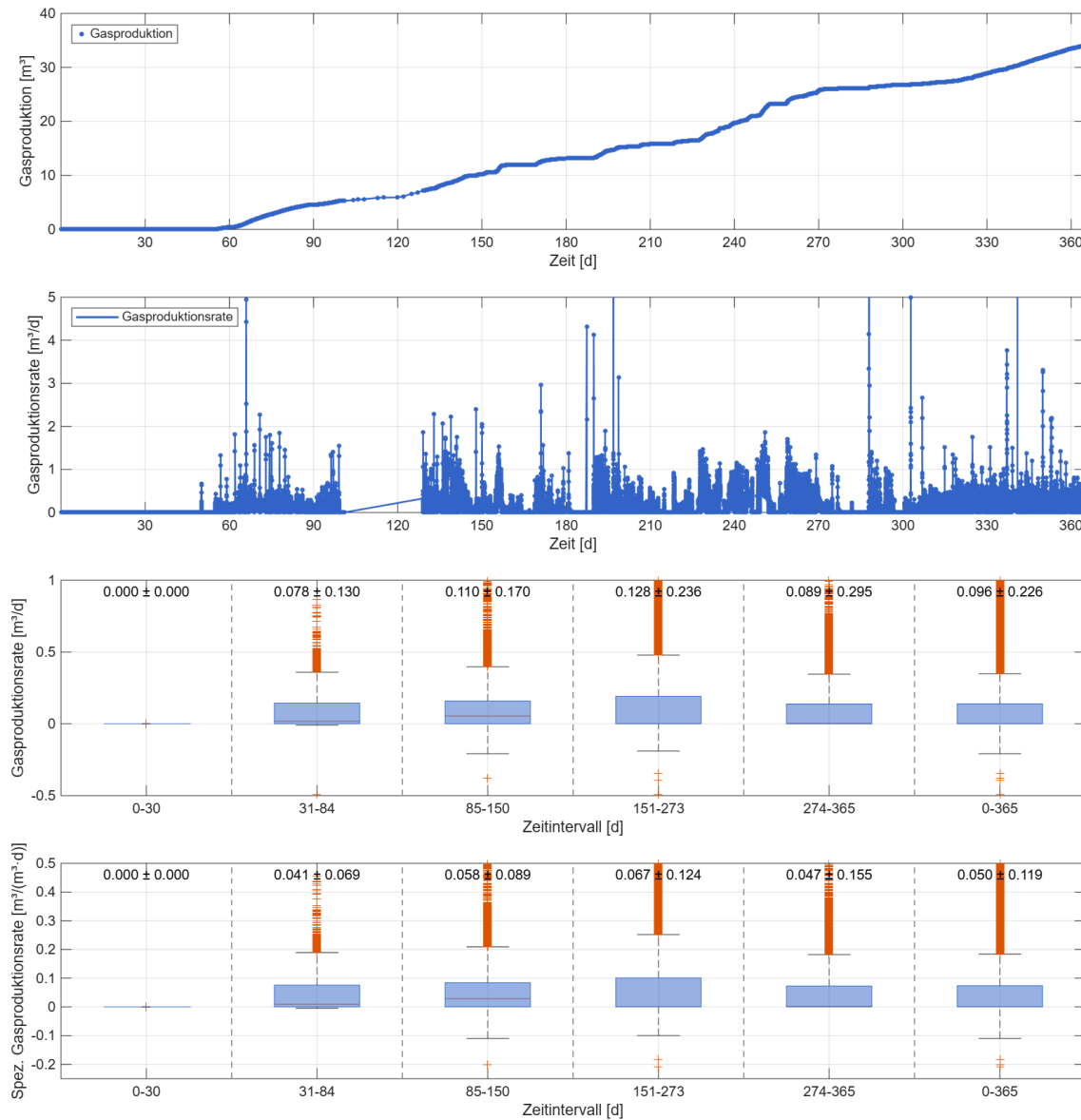


Abbildung 24: Verlauf der Gasproduktion und -rate sowie spezifische Gasproduktionsrate

Bezieht man die Gasproduktionsrate auf das Fermentervolumen, ergibt sich eine spezifische Gasproduktionsrate von durchschnittlich $0.05 \pm 0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Über den Jahresverlauf schwankt dieser zwischen 0.04 und $0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, abhängig vom eingesetzten Substrat und -menge sowie dem Status der Heizung.

4.9 Jahresverlauf der Gasqualität

In Abbildung 25 ist der Verlauf der Gasqualität über die einjährige Messkampagne abgebildet. Zu Beginn der Messkampagne wurde CH_4 noch kontinuierlich gemessen, bis der Sensor von einem manuellen Messgerät ersetzt wurde, welches neben CH_4 auch CO_2 , H_2 , O_2 und H_2S messen konnte. Während der Warm-Inbetriebnahme (Tag 0-30) steigt der CH_4 -Gehalt langsam stetig an und erreicht nach der



Neuinokulation bereits CH_4 -Gehalte von über 60%. Der CH_4 -Gehalt bleibt über den weiteren Verlauf der Messkampagne auf ähnlichem Niveau und erreicht im Mittel 63.2 ± 3.1 %.

Der CO_2 - und H_2 -Gehalt pendelt sich im Verlauf bei 40.1 ± 3.7 % bzw. 0.8 ± 1.0 % ein. Die gemessene Konzentration von H_2S liegt im Mittel bei 82.3 ± 132.7 ppm. Aus diesem Grund ist auch zwischen dem Gasspeicher und dem Gaskocher zusätzlich ein Entschwefelungsfilter verbaut, um das H_2S aus dem Gas zu entfernen.

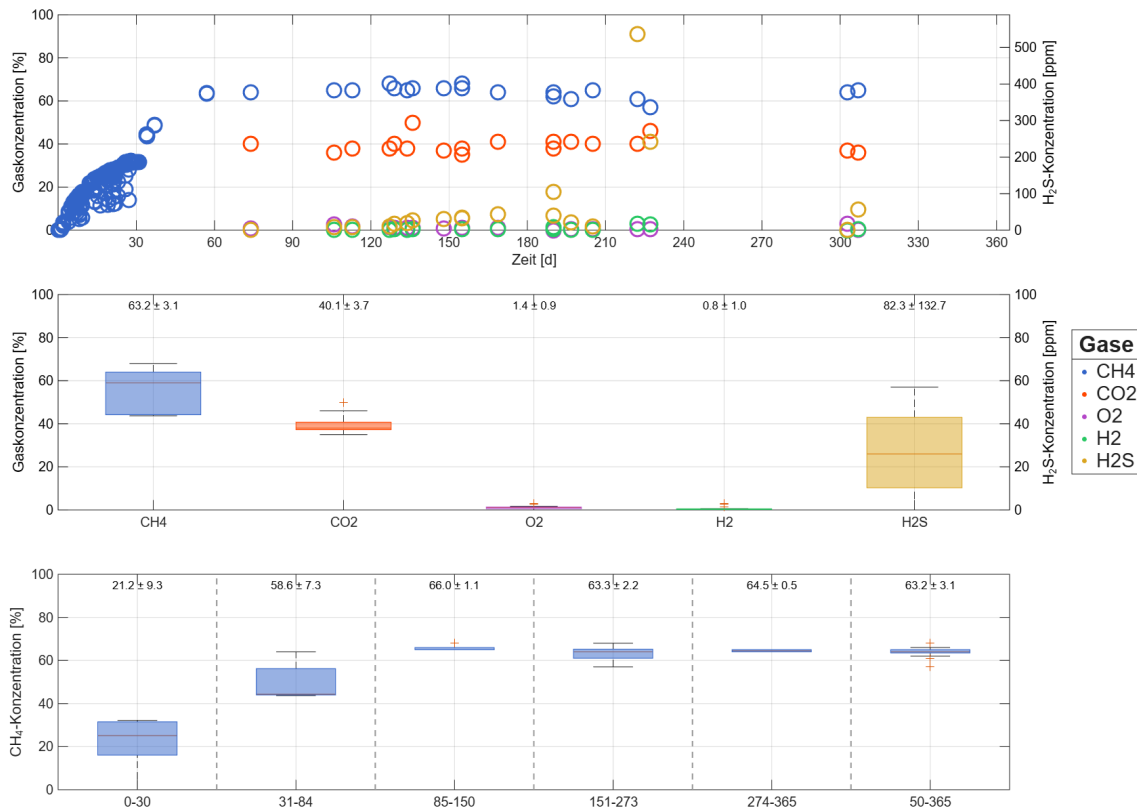


Abbildung 25: Verlauf der Gasqualität über einjährige Messkampagne

4.10 Jahresverlauf des Energieertrags und der Leistung

Nachfolgende Abbildung 26 zeigt den Energieertrag sowie die daraus resultierende Leistung und die spezifische Energieausbeute des erzeugten Biogases für die einzelnen Betriebsphasen. Über den gesamten Versuchszeitraum hinweg wurde im Mittel Biogas mit einem Energieinhalt von 0.68 ± 1.40 kWh d^{-1} produziert, was einer durchschnittlichen Leistung von 28 ± 58 W entspricht. Während der Phase mit regulärer Substratzufuhr und eingeschalteter Heizung (Tag 151 bis 273) betrug der Energieertrag durchschnittlich 0.78 ± 1.44 kWh d^{-1} . Dies entspricht einer mittleren Leistung von 32 ± 60 W. In der anschliessenden Betriebsphase mit abgeschalteter Heizung (Tag 274 bis 365) verringerte sich der Energieertrag auf 0.58 ± 1.90 kWh d^{-1} , was einer mittleren Leistung von 24 ± 79 W entspricht.

Die spezifische Energieausbeute lag im Durchschnitt bei 0.122 kWh kg^{-1} Substrat und schwankte über die einzelnen Betriebsphasen zwischen 0.081 und 0.257 kWh kg^{-1} Substrat.

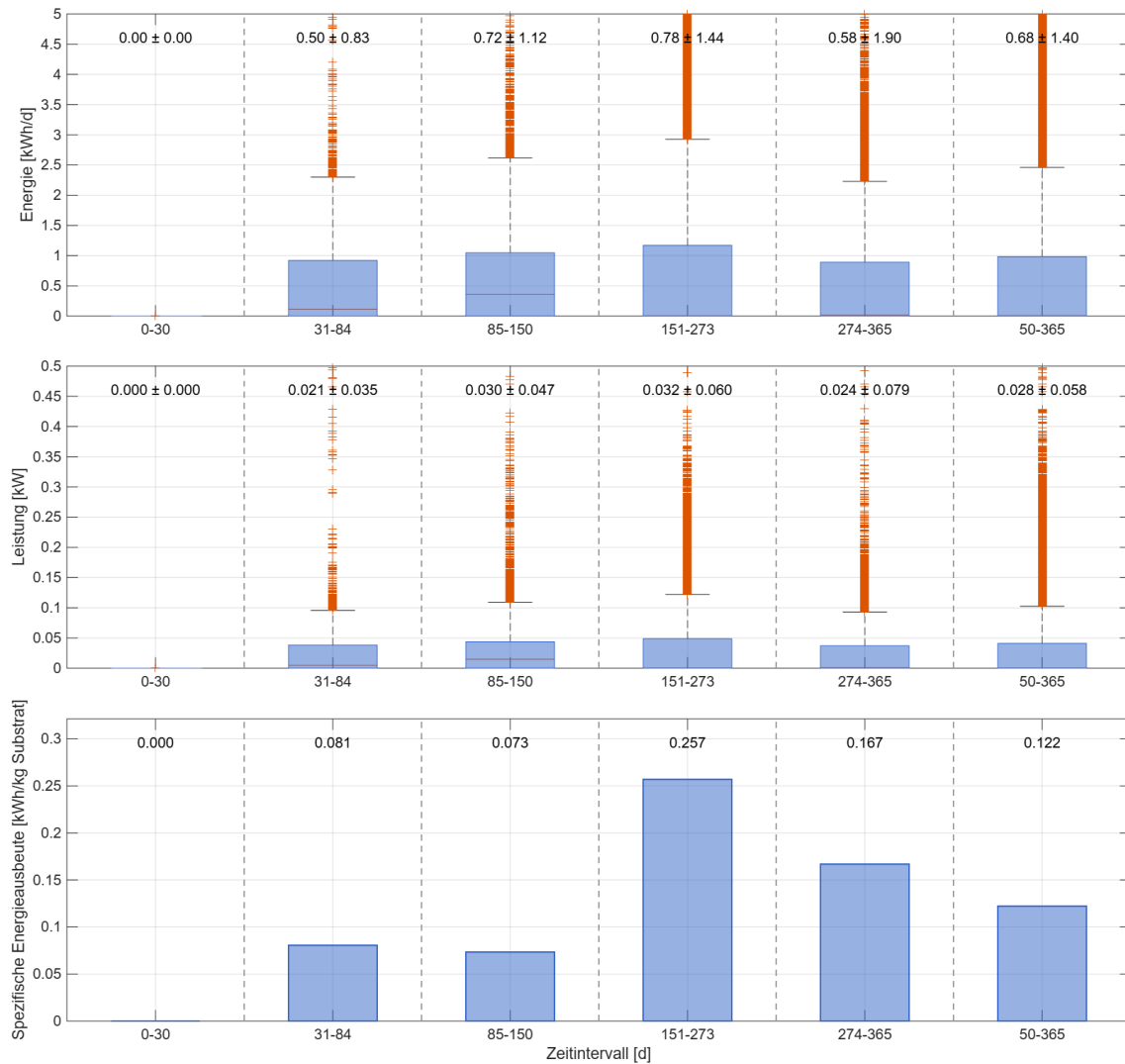


Abbildung 26: Verlauf des Energieertrags, Leistung und spezifischer Energieausbeute

Die Abbildung 27 zeigt den Verlauf des Energiebedarfs (Heizung) und der Energieproduktion (Biogas) sowie die benötigte Heizleistung bzw. produzierte Leistung (Biogas). Über den gesamten Versuchszeitraum hinweg wurden 3'200 kWh für die bestehende Mikro-Biogasanlage für die Fermenterheizung benötigt. Wenn man die Anlagengrösse auf eine Verweilzeit von 30 Tagen ausgelegt hätte, wären gemäss Abschätzungen ca. 500 kWh ausreichend. Eine überschlägige Abschätzung deutet darauf hin, dass sich der Heizenergiebedarf durch eine deutlich kleinere Anlage sowie zusätzliche Dämmmassnahmen auf etwa 170 kWh pro Jahr reduzieren lassen könnte. Dieser Wert wurde im Rahmen des Projekts jedoch nicht experimentell verifiziert. D.h. die benötigte Heizleistung würde von 0.418 kW auf 0.022 kW gesenkt werden und könnte in Summe von dem erzeugten Biogas gedeckt werden.

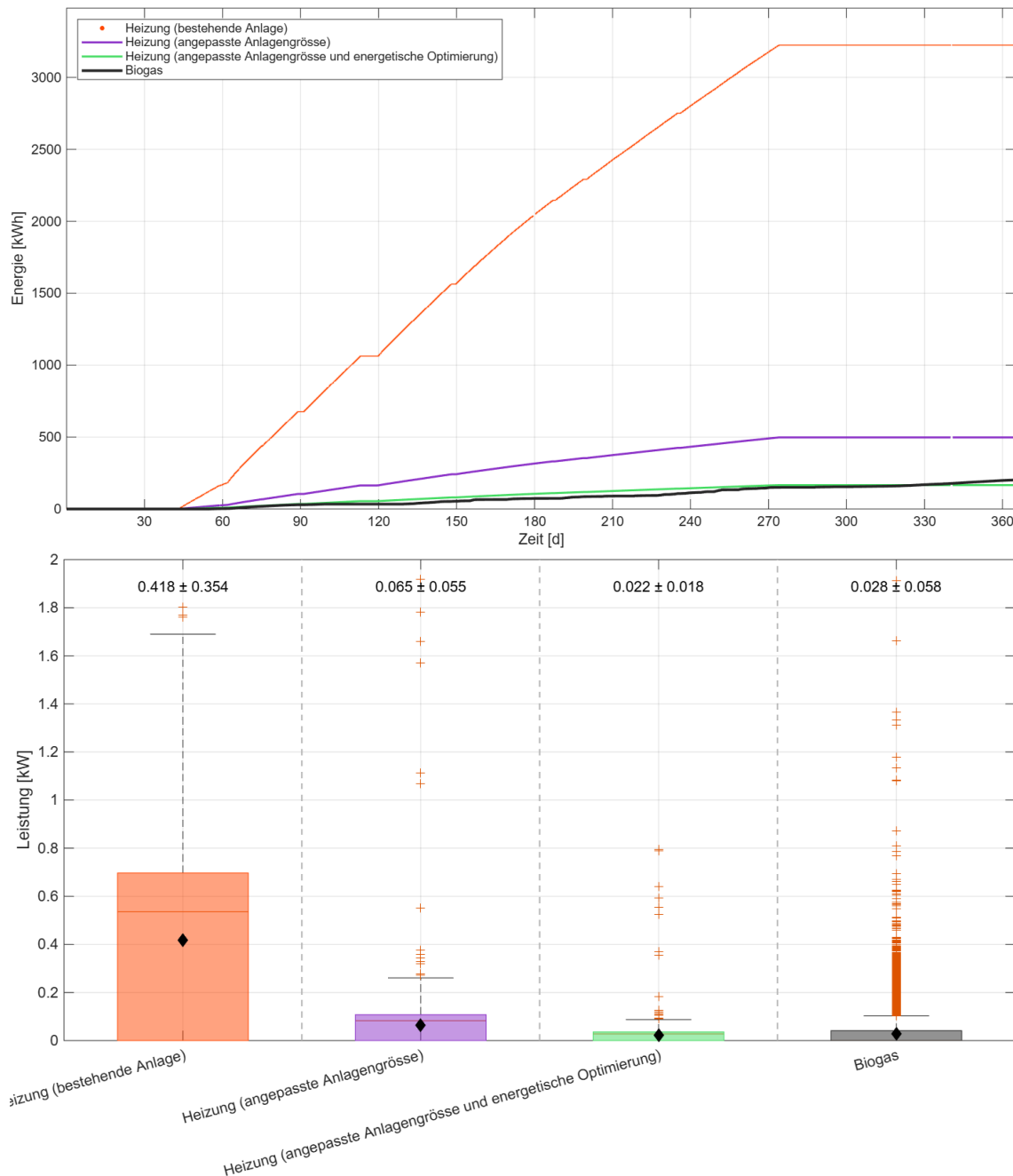


Abbildung 27: Verlauf des Energiebedarfs (Heizung) und Energieproduktion (Biogas) sowie die benötigte Heizleistung bzw. produzierte Leistung (Biogas)

4.11 Laborversuch Temperatur und Zerkleinerungsgrad

Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit wurde das biologische Methanpotenzial (BMP) von drei typischen Küchenabfällen (Karotten-, Kartoffeln- und Zwiebelschalen) im Laborversuch bestimmt. Hierzu wurden standardisierte Batch-Versuche im AMPTS-Versuchssystem durchgeführt, wobei die Einflüsse unterschiedlicher Prozesstemperaturen (20 °C, 32 °C und 37 °C) sowie des Substratzerkleinerungsgrades (leicht vs. stark zerkleinert) analysiert wurden.



Die Ergebnisse zeigten, dass die Temperatur einen deutlichen Einfluss auf Methanausbeute und Reaktionsgeschwindigkeit hatte. Unter mesophilen Bedingungen (32 °C und 37 °C) erfolgte die Methanbildung deutlich schneller und bei Versuchsabbruch vollständiger als unter psychrophilen Bedingungen (20 °C), bei denen die Umsetzung verzögert und die Methanausbeute am Ende der Versuche geringer war. Der Zerkleinerungsgrad wirkte sich hingegen nur geringfügig aus, wobei leicht zerkleinertes Substrat tendenziell sogar schneller abgebaut wurde, als das stark zerkleinerte.

Die Ergebnisse bestätigen die Eignung biogener Küchenreste für die Biogasproduktion. Für einen effizienten Betrieb bei typischen hydraulischen Verweilzeiten müssen sowohl die entsprechenden Prozessparameter als auch der Gesamtenergiebedarf der Anlage berücksichtigt werden.

Weitere Informationen zu «Einfluss der Temperatur und Zerkleinerungsgrad auf die Biogasausbeute» befinden sich im separaten Dokument «Anhang Schlussbericht deutsch» unter Anhang A4.

4.12 Gärprodukt-Management

Um die entstandenen Gärprodukte zu charakterisieren, wurde am 14.04.2026 eine Gärgut-Probe beim Ausgang des Fermenters und vom IBC-Container (welcher als Gärgutlager für den gesamten Projektverlauf diente) gezogen. Die Proben wurden von der Brandt Technik GmbH (Schupfart, Schweiz) analysiert und die Resultate sind in Tabelle 2 dargestellt. Dabei zeigte sich, dass das Gärgut im IBC-Container deutlich tiefere Werte für die TS, FOS, TAC und NPK-Nährstoffe bezogen auf die Frischsubstanz (FS) vorwies. Dies liegt vermutlich daran, dass im Verlauf des Projekts (und bei der Neu-Inokulation) grosse Mengen an Rindergülle gefüttert wurden und ein grosser Teil nach der Fermentation bereits wieder in dem IBC-Container landete. Im Gegensatz dazu wurden im späteren Verlauf des Projekts bedeutend mehr Küchen- und Gartenabfälle gefüttert, welche deutlich mehr Feststoffe und NPK-Nährstoffe enthalten. Dies spiegelt sich womöglich in der Probe aus dem Ausgang des Fermenters wider, da diese Probe zu einem späten Zeitpunkt entnommen wurde.

Tabelle 2: Produkteigenschaften der analysierten Gärprodukte

Probenahme	TS	oTS/TS	pH	FOS	TAC	FOS/TAC	TN	NH ₄ -N	P	K
[Einheit]	[%]	[%]	[-]	[mg L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]	[-]	[g L ⁻¹ FS]	[g L ⁻¹ FS]	[g L ⁻¹ FS]	[g L ⁻¹ FS]
Fermenter	1.8	56	7.7	1'078	7'094	0.15	2.05	1.10	0.31	2.88
IBC-Container	0.4	50	7.9	434	2'233	0.19	<0.50	0.26	0.05	1.06

Bei einem Fermenternutzvolumen von 2 m³ und einer durchschnittlichen HRT von 495 Tagen, ergibt sich eine jährliche Gärgut-Produktion von ca. 1'420 L. Wird davon ausgegangen, dass das Gärgut mindestens 2-mal pro Jahr als Düngermittel ausgetragen wird, eignet sich ein IBC-Container mit einem Volumen von 1 m³ als Gärgutlager. Bei dem gemessenen Bereich der Stickstoffkonzentration von 0.50 – 2.05 g N L⁻¹ FS (siehe Tabelle 2) ergibt sich eine gesamte Menge von 0.71 – 2.91 kg Stickstoff pro Jahr, siehe Berechnung Tabelle 3. Geht man davon aus, dass herkömmliches Grünland eine Stickstoffmenge von 0.01 kg N m⁻² benötigt, kann mit dem produzierten Gärgut eine Fläche von 710 – 2'911 m² pro Jahr gedüngt werden. Dies entspricht einer Fläche von knapp 3 Tennisfeldern (3 × 261 m²) bis zu knapp einem halben Fussballfeld (3'570 m²).

Gemäss Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung darf innerhalb von 3 Jahren maximal eine Menge von 200 m³ an flüssigem Gärgut auf landwirtschaftlichen Flächen ausgetragen werden und der Nährstoffbedarf der Pflanzen nicht überschritten werden (ChemRRV, 2026). Diese Menge überschreitet die in Tabelle 3 berechnete Menge pro Grünlandfläche bei weitem, was zeigt, dass das entstehende Gärgut auch auf deutlich kleineren Flächen, z.B. im Sinne einer intensiveren landwirtschaftlichen Nutzung, ausgetragen werden kann.



Tabelle 3: Berechnung der Düngerproduktion und möglichen Austragung

Düngerproduktion Jahresmenge Output	1'420	[L a ⁻¹]
Vorgeschlagenes Volumen des Düngerlagers	1'000	[L]
Speicherkapazität Düngerlager	257	[d]
Stickstoffkonzentration im Output	0.50–2.05	[g N L ⁻¹ FS]
Stickstoffmenge im Output	0.71–2.91	[kg a ⁻¹]
Stickstoffbedarf Grünland	0.01	[kg N m ⁻²]
Flächenbedarf für die Düngerproduktion	710–2'911	[m ² a ⁻¹]

Auf welchen Flächen (Weideland, Ackerbau, etc.) das flüssige Gärgut und generell Dünger ausgetragen werden können, hängt von den Vorschriften des Orts und Kantons ab, unabhängig davon ob es sich um ein urbanes oder alpines Gebiet handelt, siehe Beispiel Kanton Bern (Fachstelle Alpwirtschaft, Kanton Bern, 2020). Zudem dürfen flüssige Dünger (dazu zählt auch Gärgut) nur ausgetragen werden, wenn die Pflanzen und der Boden aufnahmefähig sind. Dies ist nicht der Fall bei gefrorenem Boden, Schneebedeckung, Trockenheit oder vollständiger Wassersättigung. Da erstere beide Zustände (vor allem in höher gelegenen Regionen) mehrheitlich im Winter auftreten, ist in diesem Zeitraum das Ausbringen des Gärguts verboten. Daher ist es wichtig, dass ein ausreichend grosses Gärgut-Lager vorhanden ist, um diesen Zeitraum zu überbrücken. Weiterführend muss das Lagergefäss im Winter dem Einfrieren des Inhaltes widerstehen können oder alternativ das Einfrieren des Inhaltes verhindert werden.



5 Studien

5.1 Rechtliche Situation bezüglich Mikro-Biogasanlagen

Diese Studie untersuchte die rechtlichen Rahmenbedingungen, Sicherheitsanforderungen und technischen Vorgaben für den Einsatz von Mikro-Biogasanlagen im privaten Umfeld. Solche häuslichen Biogas-Systeme dienen der Vergärung von Küchen- und Gartenabfällen zur Erzeugung von Biogas, typischerweise für Kochzwecke und sind in der Schweiz bislang nicht verbreitet.

Rechtliche Situation

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Abklärungen deuten darauf hin, dass Mikro-Biogasanlagen unter bestimmten Voraussetzungen bewilligungsfrei installiert und betrieben werden können. Dabei wurden insbesondere folgende Kriterien als relevant identifiziert:

- Aufstellung im Freien (Aussenaufstellung)
- Nutzung des Biogases ausschliesslich im Freien (z.B. zum Kochen oder Grillieren)
- Fermentervolumen bis maximal ca. 21 m³
- Biogas-Speichervolumen bis maximal ca. 100 m³
- Überdachung oder Gewächshaus mit maximaler Grundfläche von 6 m² und Höhe von 2.5 m

Werden diese Voraussetzungen eingehalten, bestehen nach den vorliegenden Abklärungen grundsätzlich keine offensichtlichen baurechtlichen Hindernisse für den Betrieb einer Mikro-Biogasanlage. Die Norm SN EN ISO 23590 sowie die Aufstellung- und Betriebsanleitungen der Hersteller definieren die entsprechenden Sicherheits- und Konstruktionsanforderungen. Es bestehen Einschränkungen für die Innenaufstellung von Mikro-Biogasanlagen, die beispielsweise einen minimalen Luftwechsel des Aufstellungsraumes definieren.

Die Einschätzung zur Bewilligungsfreiheit basiert auf ersten Abklärungen und kann nicht pauschal auf alle Gemeinden und Kantone übertragen werden. Vor einer Installation sollten die geltenden Anforderungen daher mit den zuständigen Behörden abgeklärt werden. Für Innenaufstellungen, die Nutzung des Biogases zu Heiz- oder Mobilitätszwecken sowie die gewerbliche Verwertung des Gärguts sind zusätzliche rechtliche und technische Abklärungen erforderlich. Beim Einsatz hygienekritischer Substrate, beispielsweise Speiseresten oder Gastronomieabfällen, können zudem weitergehende Hygienisierungsmaßnahmen notwendig sein.

Sicherheitsanforderungen

- Erstellung einer Risikoanalyse zu Substraten, Biogas und Anlagenkomponenten
- Explosions-, Brand- und Erstickungsgefahr werden aufgrund der sehr kleinen Gasvolumina und niedriger Betriebsdrücke als gering eingestuft
- Überdrucksicherung bei ca. 8-10 mbar, automatischer Gasablass
- Mindestabstände: 5 m zu Zündquellen, Rauchverbot im Umkreis von 3 m
- Einhaltung baurechtlicher Abstände (1 m zur Grundstücksgrenze, 3.5 m zu Wegen, 6 m zu Strassen)

Technische Anforderungen

- Pflichtkomponenten: Fermenter, Biogasspeicher, H₂S-Filter, Überdruckventil, Absperrventil
- Konstruktion muss luftdicht, druckbeständig und verformungsresistent sein



- Installations-, Betriebs- und Wartungshandbuch sowie Schulungsprogramm sind vorgeschrieben

Einsatzstoffe und Hygiene

- Zulässig sind organische Materialien wie Hofdünger, landwirtschaftliche Reststoffe, Küchen- und Lebensmittelabfälle sowie Grüngut
- Hygienisierungsanforderungen insbesondere für Speisereste sind für die mesophile Vergärung nicht eindeutig definiert. Eine zusätzliche thermische Behandlung (Pasteurisation) der kritischen Ausgangssubstrate oder eine thermophile Nachkompostierung des Gärguts wird je nach Verwendungszweck empfohlen.

Fazit

Mikro-Biogasanlagen sind für die energetische Nutzung von Küchen- und Gartenabfällen sowie Hofdünger geeignet und können zur energetischen Eigenversorgung mit erneuerbaren Energiequellen beitragen. Für einen sicheren und rechtskonformen Betrieb sind die Einhaltung der Norm SN EN ISO 23590, die Vorgaben der Hersteller sowie die Berücksichtigung von Hygienierisiken entscheidend. Die Studie zeigt, dass ein bewilligungsfreier Betrieb unter bestimmten Bedingungen möglich ist, jedoch weitere Abklärungen für alternative Nutzungen zur Verbrennung im Freien und bei Innenaufstellungen erforderlich sind.

Weitere Informationen zur Studie über die Genehmigung und Zulassung, Sicherheitsstandards, technische Anforderungen sowie Einsatzstoffe und Hygiene von Mikro-Biogasanlagen befinden sich im separaten Dokument «Anhang Schlussbericht deutsch» unter Anhang A5.



5.2 Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen

Diese Studie untersucht die Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen in der Schweiz als eine vielversprechende Lösung zur dezentralen Energieerzeugung und nachhaltigen Verwertung organischer Reststoffe. Während Mikro-Biogasanlagen in verschiedenen Regionen der Welt bereits erfolgreich eingesetzt werden, bestehen für den europäischen Raum aufgrund klimatischer, geographischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen noch Unsicherheiten hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Rentabilität. Der Fokus liegt auf der Analyse von Investitionskosten, Kapitalabschreibung, Betriebsaufwand, Energieproduktion und Energiegestehungskosten verschiedener Mikro-Biogasantypen.

Im Rahmen der Studie wurden vier unterschiedliche Anlagenkonzepte betrachtet, die sich insbesondere hinsichtlich des Ausgangssubstrats unterscheiden: Eine kleine Haushaltsanlage («Tiny») mit Grundsubstrat Haushaltsabfälle, eine gemeinschaftliche Anlage für Wohnsiedlungen («MiBAS»), die mit Haushalts- und Gartenabfällen betrieben wird, eine Anlage für Gastronomiebetriebe («Gastro») zur Verarbeitung von Rüstabfällen und Speiseresten sowie eine landwirtschaftliche Anlage für Alpbetriebe («Alp»), deren Hauptsubstrat aus Hofdüngern (Mist und Gülle) besteht. Die Investitionskosten reichen dabei von knapp 4'000 CHF für die Haushaltsanlage «Tiny» bis zu maximal 75'000 CHF für die landwirtschaftliche Variante «Alp». Neben den Investitionskosten wurden unter anderem jährliche Betriebs- und Unterhaltsaufwendungen, Abschreibungszeiträume sowie die erzielbaren Energieerträge berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Anlagentypen. Die jährliche Energieproduktion reicht von 374 kWh bei der Anlage «Tiny» bis zu 57'416 kWh bei der Anlage «Alp». Die berechneten Energiegestehungskosten liegen zwischen 0.09 CHF kWh⁻¹ für die Anlage «MiBAS» und 0.65 CHF kWh⁻¹ für die Anlage «Tiny». Die Analysen zeigen, dass insbesondere die Anlagenkonzepte «MiBAS» und «Alp» bei geeigneten Rahmenbedingungen erneuerbare Wärmeenergie zu konkurrenzfähigen Kosten bereitstellen können. Die ausgewiesenen Energiegestehungskosten sind jedoch als orientierende Abschätzung zu verstehen, da insbesondere der tatsächliche Eigenenergiebedarf für die Fermenterheizung stark von Auslegung, Standort und Betriebsweise abhängt. Zusätzliche wirtschaftliche Potenziale können sich durch eine optimierte Wärmeversorgung sowie durch die Nutzung lokal verfügbarer erneuerbarer Energiequellen, insbesondere von überschüssigem Photovoltaikstrom für Hilfsaggregate und Heizung, ergeben.

Mikro-Biogasanlagen können neben anderen erneuerbaren Energiequellen zur Energieautarkie und zur Reduktion fossiler Energieträger beitragen. Ihr strategischer Mehrwert liegt dabei weniger in ihrem absoluten Beitrag zur nationalen Energieproduktion als vielmehr in der Erschliessung bislang ungenutzter dezentraler Biomassepotenziale. Insbesondere in abgelegenen Regionen, auf Alpen, in Berggasthäusern sowie in Gemeinschaftseinrichtungen, Gastronomiebetrieben oder landwirtschaftlichen Betrieben ermöglichen sie die Verwertung organischer Reststoffe direkt am Entstehungsort. Dadurch können Transportaufwand und die damit verbundenen Emissionen reduziert sowie regionale Stoff- und Energiekreisläufe gestärkt werden. Mikro-Biogasanlagen stellen somit eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden zentralen Verwertungssystemen dar.

Die vorliegende Studie zeigt jedoch auch, dass die Wirtschaftlichkeit stark von der Anlagengrösse, dem technischen Ausbaugrad, der Nutzung der erzeugten Wärme sowie standortspezifischen Rahmenbedingungen abhängt. Darüber hinaus wird die Wirtschaftlichkeit nicht allein durch die produzierte Gasmenge bestimmt, sondern auch davon, ob und wie das erzeugte Biogas tatsächlich genutzt werden kann. Anwendungen wie Kochen, Grillieren oder die saisonale Nutzung in Freizeit- und Gartenbereichen können meist mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand realisiert werden. Eine Nutzung für die Warmwasserbereitung oder Raumheizung erfordert hingegen in der Regel zusätzliche gasbetriebene Geräte sowie deren Einbindung in bestehende Haustechnik- oder Energiesysteme. Die damit verbundenen Investitionskosten, baulichen Anpassungen und regulatorischen Anforderungen können die Wirtschaftlichkeit zusätzlich beeinflussen und sollten bei der Bewertung konkreter Anwendungsfälle berücksichtigt werden.



Weitere praktische Erfahrungen und Demonstrationsprojekte sind erforderlich, um eine fundiertere Datengrundlage für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen in der Schweiz und im europäischen Raum zu schaffen.

Weitere Informationen zu dieser Studie «Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen» befinden sich im separaten Dokument «Anhang Schlussbericht deutsch» unter Anhang A6.



5.3 Mikro-Biogasanlagen auf Alpwirtschaften

Diese Studie untersucht das Potenzial von Mikro-Biogasanlagen für Alpwirtschaften in der Schweiz als eine vielversprechende Lösung zur nachhaltigen Energieerzeugung und Bewirtschaftung der anfallenden Gülle. Der Fokus liegt auf der Analyse der saisonalen Menge an Gülle, weiteren organischen Stoffströmen und der Energiebedarfe, die für den Betrieb der Alpwirtschaften charakteristisch sind.

Im Jahr 2024 wurden in der Schweiz 6'586 Alpwirtschaften verzeichnet (auch als Sömmerungsbetriebe bezeichnet). Ziel einer Alpwirtschaft ist es, Tiere in alpinen Regionen auf Alpweiden zu halten, um hochwertige tierische Produkte (z.B. Alpkäse) herzustellen und das natürliche Futter der Alpweiden saisonal zu nutzen. Die sogenannte Sömmerung (Tierhaltung der Alpwirtschaften) findet in den Sommermonaten statt, wobei 2024 insgesamt 312'553 Grossvieh-Einheiten für 100 Tage gesömmert wurden. Während ein Teil der Ausscheidungen der gesömmerten Tiere auf den Alpweiden landet, fällt dennoch ein beachtlicher Teil innerhalb der Stall-Infrastrukturen an und wird in den meisten Fällen in Güllegruben gesammelt. Falls der Betrieb zu klein oder zu abgelegen ist, um die Gülle für die Düngung in das Tal zu transportieren, wird sie direkt auf umliegende Felder ausgetragen. Neben tierischen Ausscheidungen gelangen bei Alpwirtschaften auch oftmals das Schwarzwasser der Mitarbeiter und die Molke der Käse-Produktion in eine Güllegrube.

Um fossile Brennstoffe zu ersetzen und die CO₂-Emissionen zu reduzieren, können Mikro-Biogasanlagen neben Solar-, Wind- und Wasserkraft eine sinnvolle Ergänzung zur Energieversorgung von Alpwirtschaften darstellen. Vor allem bei Betrieben mit Produktionsprozessen (z.B. Käsereien) reichen bisherige Quellen an erneuerbaren Energien oftmals nicht für den Energiebedarf aus, weshalb nach wie vor die Anwendung von fossilen Brennstoffen verbreitet ist. Da die Alpwirtschaften nur für einen Teil des Jahres genutzt werden (beispielsweise 100 Tage), stellt die Saisonalität allerdings eine Herausforderung für den kontinuierlichen Betrieb von Biogasanlagen dar, da sie auf eine konstante Zufuhr von organischem Material angewiesen sind.

Eine erste Potentialabschätzung zeigt, dass die jährlich anfallende Menge an Gülle der Güllegruben aller Alpwirtschaften hochgerechnet 167'050 m³ beträgt. Bei vollständiger Verwertung durch Biogasanlagen würde dies, zusätzlich mit Molke und Schwarzwasser der Mitarbeiter als weitere organische Stoffströme, eine Biogasproduktion von rund 6'406'893 m³ ermöglichen, was einer Energieerzeugung von etwa 37'337'633 kWh entspricht. Pro Alpwirtschaft ergibt sich somit abzüglich des Eigenverbrauchs der Mikro-Biogasanlage (für den Betrieb und genug hohe Betriebstemperaturen) im Durchschnitt ein jährliches Potenzial von etwa 3'968 kWh. Dieses Energiepotenzial könnte die autarke und nachhaltige Energieversorgung der Alpwirtschaften bedeutend unterstützen, da vor allem für Prozesse wie die Käse-Produktion beträchtliche Mengen an Energie benötigt werden.

Weitere Informationen zu dieser Studie «Mikro-Biogasanlagen auf Alpwirtschaften» befinden sich im separaten Dokument «Anhang Schlussbericht deutsch» unter Anhang A7.



5.4 Mikro-Biogasanlagen für Berggasthäuser

Diese Studie untersucht das Potenzial von Mikro-Biogasanlagen in Schweizer Berggasthäusern als eine vielversprechende Lösung zur nachhaltigen Energieerzeugung und Abfallbewirtschaftung. Während Solar-, Wind- und Wasserkraft in alpinen Regionen bereits weit verbreitet sind, sind Biogasanlagen in diesen Gebieten noch nicht etabliert. Ein spezieller Fokus liegt auf der Analyse der saisonalen Abfallmengen und der Energiebedarfe von SAC-Hütten, die für deren Betrieb charakteristisch sind.

In den Sommermonaten entstehen durch den Tourismus relevante Mengen an biogenen Abfällen (Rüst- und Speisereste, allenfalls Hofdünger), während die Hütten in den Wintermonaten entweder nur minimal besetzt oder geschlossen sind, weshalb saisonal stark schwankende organische Abfallmengen zu erwarten sind. Ausnahme bilden hier Hütten, die zum Beispiel in Skigebieten stehen, sowie solche, die im Ganzjahresbetrieb bewirtet werden. Die Saisonalität stellt auf jeden Fall eine Herausforderung für den kontinuierlichen Betrieb einer Biogasanlage dar, da eine konstante Zufuhr von organischem Material von Vorteil ist.

Eine erste Potentialabschätzung zeigt, dass die jährlich anfallenden Küchenabfälle auf alle SAC-Hütten hochgerechnet eine Biogasproduktion von rund 20'000 m³ ermöglichen könnten, was einer Energieerzeugung von etwa 120'000 kWh entspricht. Pro Hütte ergibt sich damit im Durchschnitt ein jährliches Potenzial von etwa 1'000 kWh, also knapp 100 Watt Jahresdurchschnittsleistung. Dieses Energiepotenzial könnte die autarke Energieversorgung in Berghütten massgebend unterstützen, indem Wärmeenergie zum Kochen, für Heisswasser oder zu Heizzwecken produziert werden kann. Eine Kochstelle mit 2 mal 1'500 W könnte damit etwa 330 Jahresstunden betrieben werden.

Die Arbeit bietet einen Vergleich mit den Alpenländern Österreich, Deutschland, Frankreich und Italien, in denen erneuerbare Energien in Bergregionen auf unterschiedliche Weise gefördert und genutzt werden. Genauso wie in der Schweiz hat die Nutzung von Biogas im landwirtschaftlichen Kontext in Österreich und Deutschland eine lange Tradition. Es fehlt jedoch auch hier an weitreichenden Umsetzungen in Bergregionen. Frankreich und Italien haben durch Projekte wie LIFE SUSTAINHUTS (SustainHuts, 2016) und ALPGRIDS (Viénot, 2022) erste Schritte unternommen, Biogas als Teil eines hybriden Energiesystems in Berggebieten zu integrieren. Diese Länder setzen vermehrt auf Mikronetze, um verschiedene erneuerbare Energiequellen wie Solarenergie, Biomasse und Biogas miteinander zu kombinieren und so autarke Energiesysteme für abgelegene Regionen zu schaffen.

In der Schweiz wird das Potenzial von Biogas in Kleinanwendungen für alpine Regionen bisher nicht erforscht und gefördert. Die Projekte in Frankreich und Italien zeigen, dass Biogas in Kombination mit anderen erneuerbaren Energiequellen wie Solar- und Wasserkraft eine sinnvolle Ergänzung zur Energieversorgung in Berghütten darstellen kann, da sie fossile Brennstoffe ersetzen können und durch die lokale Verwertung von organischen Abfällen CO₂-Emissionen reduziert werden. In diesen Projekten werden technologische Herausforderungen, wie die Anpassung der Anlagen an die kalten Wintermonate, sowie die wirtschaftliche Tragbarkeit und regulatorische Rahmenbedingungen beleuchtet. Empfehlungen werden gegeben, wie die Schweiz von den Erfahrungen der Nachbarländer profitieren könnte, um Biogasanlagen in abgelegenen alpinen Gebieten erfolgreich zu integrieren.

Weitere Informationen zu dieser Studie «Mikro-Biogasanlagen für Berggasthäuser» befinden sich im separaten Dokument «Anhang_Schlussbericht_deutsch» unter Anhang A8.



6 Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser zweijährigen Studie, die eine einjährige Messkampagne umfasste, konnten die für dieses Projekt gesetzten Ziele zum allergrössten Teil erfolgreich erreicht werden. Für eine Mikro-Biogasanlage wurden umfassende Betriebsdaten erhoben, die eine bislang fehlende wissenschaftliche Grundlage für diesen Anlagentyp im mitteleuropäischen Raum schaffen. Während solche einfachen Systeme bereits in vielen klimatisch wärmeren Regionen genutzt werden, lagen bisher kaum belastbare Daten vor, da geeignete Messtechnik meist fehlte. Durch den kontinuierlichen Betrieb unter realen Bedingungen im Schweizer Mittelland steht nun erstmals eine detaillierte Datengrundlage zur Verfügung, ergänzt durch fundierte Praxiserfahrungen im Umgang mit einer Mikro-Biogasanlage in einem kühleren Klima.

Die auf dem Gelände des Vereins Synergy Village installierte Anlage des Herstellers (B)energy, die von der ZHAW für Forschungszwecke mit aufwändiger Messtechnik sowie einem Heiz- und Dämmsystem erweitert wurde, konnte über 365 Tage betrieben werden. Die erfassten Messdaten liefern wertvolle Erkenntnisse zum thermischen Verhalten, zur Gasproduktion und zur Systemstabilität unter schweizerischen Witterungsbedingungen. Gleichzeitig konnten technische Anpassungen und Optimierungsmöglichkeiten identifiziert und getestet werden, die für einen zuverlässigen Betrieb in mitteleuropäischen Klimazonen erforderlich sind.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde im zweiten Projektabschnitt anhand von Studien eine fundierte Potenzialabschätzung für den Einsatz von Mikro-Biogasanlagen für Kleinwohnformen und Haushalte sowie für Anwendungen im alpinen Raum erarbeitet. Neben der technischen Leistungsfähigkeit wurden dabei auch genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen und wirtschaftliche Aspekte analysiert. Damit liefert die Studie eine umfassende Bewertung mehrerer «Mikro-Biogas»-Anlagentypen und zeigt praxisnahe Perspektiven für den zukünftigen Einsatz in der Schweiz auf.

Energieproduktion und Versorgungspotenziale

Welche Energiemengen können mit der Mikro-Biogasanlage erzeugt werden und welcher Bedarf lässt sich damit decken?

Die einjährige Messkampagne ergab eine Gesamtproduktion von 34 m³ Biogas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 63 %. Dies entspricht einer Energieproduktion von 215 kWh bzw. 28 Watt aus täglich ca. 1.7 kg Küchen- und Gartenabfällen und 1.2 kg Rindergülle. Die mittlere Gasproduktionsrate lag bei 128 L d⁻¹ (mit Heizung) und 89 L d⁻¹ (ohne Heizung). Bei einer Brennerleistung von 1'500 Watt wurde täglich Energie für fast 30 Minuten Kochzeit produziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anlage während des Versuchs nur gering ausgelastet war. Die gemessenen Energieerträge sind deshalb primär als Ergebnis der gewählten Versuchsbedingungen zu verstehen. Die durchgeführten Potenzialanalysen deuten darauf hin, dass bei höherer Auslastung und optimierter Betriebsweise deutlich höhere Energieerträge erzielt werden können.

Theoretisch liefert eine kleine Mikro-Biogasanlage «Tiny» für einen 4-Personen-Haushalt aus 1 kg Speise- und Rüstabfällen ca. 374 kWh pro Jahr, also ausreichend Kochenergie für täglich etwa 41 Minuten Kochbetrieb bei Volllast-Betrieb ($T > 32^{\circ}\text{C}$, $\text{HRT} = 67 \text{ d}$, $\text{RB} = 4.2 \text{ kg oTS m}^{-3}\text{d}^{-1}$).

Die Systeme «MiBAS» und «Gastro» mit 1'900 L Fermenter-Nutzvolumen würden bei einem analogen Volllast-Betrieb jährlich gut 10 Tonnen Substrat verarbeiten können, woraus gut 10'000 kWh Energie produziert werden könnte. Das wären 1'200 Watt durchschnittliche Leistung und im Vergleich zum wissenschaftlich begleiteten Jahresbetrieb etwa dem 43-fachen des im Versuch gemessenen Energieertrags.



Der Mikro-Biogas-Anlagentyp „Alp“ könnte aus Hofdüngern von 25 GVE Milchkühen und einem Weidegang-Verlust von 50 % mit einem Fermenter-Nutzvolumen von 25 m³ etwa 57'000 kWh Jahresenergie produzieren, was einer Durchschnittsleistung von 6.6 kW entspricht, womit je nach Betrieb sowohl Energie zum Kochen, sowie Warmwasser- und Heizbedarf gedeckt werden könnten.

Stabilität des Anlagenbetriebs

Kann mit den zugeführten Einsatzstoffmengen ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden?

Ein stabiler, mikrobiologischer Anlagenbetrieb ist unter bestimmten Bedingungen gut realisierbar. Der Betrieb des Mikro-Biogassystems stellte sich als grundsätzlich sehr stabil heraus. Förderlich war dabei primär die sehr hohe hydraulische Verweilzeit (HRT = 495 d). Die hohe Stabilität wurde durch tiefe FOS/TAC-Werte (0.25-0.42) und pH-Werte (6.8-6.9) bestätigt.

Schwankungen im Inputmaterial

Wie reagiert die Anlage auf mengenmässige Schwankungen im Inputmaterial?

Wie die Auswertung der Betriebsdaten zeigte, erwies sich das Fermentervolumen von 2'000 L für die im Versuch eingesetzten Substratmengen als deutlich überdimensioniert. Die daraus resultierenden langen hydraulischen Verweilzeiten und die geringe organische Raumbelastung führten zu einem sehr stabilen Anlagenbetrieb, sodass weder quantitative noch qualitative Schwankungen des Inputmaterials einen kritischen Einfluss auf die Prozessstabilität hatten. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass für vergleichbare Einsatzstoffmengen ein deutlich kleineres Fermentervolumen von ca. 120 L ausreichend gewesen wäre. Die beobachtete Überdimensionierung stellt keinen Planungsfehler dar, sondern ist darauf zurückzuführen, dass für das Projekt bereits die kleinste verfügbare Fermentergrösse des Herstellers und Projektpartners (B)energy gewählt wurde.

Energieertragsdaten im Jahresverlauf

Wie gestalten sich die Energieertragsdaten im Jahresverlauf?

Die Energieertragsdaten zeigten über den Jahresverlauf einen deutlichen Einfluss der Betriebstemperatur auf die Biogasproduktion. Während der Phase mit regulärer Substratzufuhr und eingeschalteter Heizung (Tag 151 bis 273) wurde mit durchschnittlich $0.78 \pm 1.44 \text{ kWh d}^{-1}$ beziehungsweise $32 \pm 60 \text{ W}$ der höchste Energieertrag erzielt, ohne Berücksichtigung der eingesetzten Energie für die Fermenterheizung. Nach dem Abschalten der Heizung (Tag 274 bis 365) sank der mittlere Energieertrag auf $0.58 \pm 1.90 \text{ kWh d}^{-1}$ beziehungsweise $24 \pm 79 \text{ W}$. Dieser Rückgang deutet auf eine reduzierte biologische Aktivität infolge der niedrigeren Prozesstemperaturen hin. Die spezifische Energieausbeute schwankte im Jahresverlauf zwischen 0.081 und $0.257 \text{ kWh kg}^{-1}$ Substrat und verdeutlicht zusätzlich den Einfluss saisonaler Bedingungen sowie der eingesetzten Substrate auf die Energieproduktion. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine Beheizung des Fermenters zu höheren und stabileren Energieerträgen beiträgt.

Technische Anpassungen für stabilen Betrieb

Welche technischen Anpassungen braucht es für einen stabilen Betrieb unter Schweizer Bedingungen?

Ein stabiler Betrieb konnte bei diesen sehr hohen hydraulischen Verweilzeiten auch bei niedrigen Temperaturen unter 30°C während des Regelbetriebs jederzeit gewährleistet werden.

Aufgrund der verhältnismässig tiefen pH-Werte im vorderen Teil des kaum durchmischten Fermenters ist jedoch anzunehmen, dass bei tieferen Verweilzeiten ein entsprechender Betrieb kritisch sein kann. Um eine leistungsfähige Fermentation zu gewährleisten, sind gemäss Laborversuchen Temperaturen von über 30°C notwendig.

Aus energetischer und ökologischer Sicht ist zur Minimierung des Eigenwärme-Bedarfs des Fermenters ein möglichst geringes Fermentervolumen, also tiefe hydraulische Verweilzeiten, vorteilhaft. Förderlich



dafür wären ausserdem ein Heizsystem mit einem guten Wärmeübergang, eine gute Dämmung insbesondere im Bereich des Gärguts und eine Durchmischung des Fermenterinhalts.

Arbeitsaufwand und Kosten

Welche Arbeitsaufwände und Kosten entstehen für das erzeugte Gas?

Im Rahmen einer Studie wurden auf rein theoretischer Basis die Energiegestehungskosten von vier unterschiedlichen Anlagentypen und -grössen, unter anderem das MiBAS-System bei Volllast berechnet. Die zu erwartenden Investitionskosten liegen je nach Grösse und Ausbaustandard des Anlagensystems bei ca. 4'000 CHF für das System «Tiny» und bei CHF 75'000 für das System «Alp». Mit einem jährlichen Aufwand von 3-9 % der Investitionskosten wurde gerechnet.

Die entsprechenden Energiegestehungskosten liegen gemäss theoretischer Wirtschaftlichkeitsberechnung zwischen 0.09 CHF kWh⁻¹ für das System «MiBAS» und 0.66 CHF kWh⁻¹ für das System «Tiny».

Genehmigungsbedarf

Braucht es eine Genehmigung und welche Auflagen gelten?

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Abklärungen deuten darauf hin, dass Mikro-Biogasanlagen unter bestimmten Voraussetzungen bewilligungsfrei installiert und betrieben werden können. Dabei wurden insbesondere folgende Kriterien als relevant identifiziert:

- Aufstellung im Freien (Aussenaufstellung)
- Nutzung des Biogases ausschliesslich im Freien (z.B. zum Kochen oder Grillieren)
- Fermentervolumen bis maximal ca. 21 m³
- Biogas-Speichervolumen bis maximal ca. 100 m³
- Überdachung oder Gewächshaus mit maximaler Grundfläche von 6 m² und Höhe von 2.5 m

Werden diese Voraussetzungen eingehalten, bestehen nach den vorliegenden Abklärungen grundsätzlich keine offensichtlichen baurechtlichen Hindernisse für den Betrieb einer Mikro-Biogasanlage. Die Norm SN EN ISO 23590 sowie die Aufstellungs- und Betriebsanleitungen der Hersteller definieren die entsprechenden Sicherheits- und Konstruktionsanforderungen.

Die Einschätzung zur Bewilligungsfreiheit basiert auf ersten Abklärungen und kann nicht pauschal auf alle Gemeinden und Kantone übertragen werden. Vor einer Installation sollten die geltenden Anforderungen daher mit den zuständigen Behörden abgeklärt werden. Für Innenaufstellungen, die Nutzung des Biogases zu Heiz- oder Mobilitätszwecken sowie die gewerbliche Verwertung des Gärguts sind zusätzliche rechtliche und technische Abklärungen erforderlich. Beim Einsatz hygienekritischer Substrate, beispielsweise Speiseresten oder Gastronomieabfällen, können zudem weitergehende Hygienisierungsmassnahmen notwendig sein.

Gärprodukt-Management

Welche Flächen werden benötigt, um die Gärprodukte als organischer Dünger auszubringen? Gibt es rechtliche Einschränkungen für Gärproduktverwendung in urbanen oder alpinen Gebieten? Wie wird das Gärgut im Winter gelagert?

Basierend auf dem Stickstoffgehalt der analysierten Gärprodukte wird jährlich eine Grünland-Fläche von 710 – 2'911 m² benötigt, um das gesamte Gärgut als organischen Dünger auszubringen. Generell ist die Erlaubnis für das Ausbringen von Gärgut abhängig von dem Ort/Kanton und nur gestattet, wenn die entsprechenden Pflanzen und der Boden aufnahmefähig sind. Da dies im Winter mehrheitlich nicht der Fall ist, muss ein ausreichend grosses Gärgut-Lager vorhanden sein, um diese Zeit zu überbrücken.



Beitrag des Projekts zur Schliessung bestehender Forschungslücken

Die in Kapitel 2.3 identifizierten Forschungslücken konnten durch das Projekt MiBAS teilweise geschlossen werden. Insbesondere wurden erstmals umfangreiche Betriebsdaten einer Mikro-Biogasanlage unter schweizerischen Klimabedingungen über einen Zeitraum von zwölf Monaten erhoben. Dadurch stehen für den mitteleuropäischen Raum belastbare Daten zur Gasproduktion, Prozessstabilität, Gasqualität sowie zum Einfluss der Temperatur auf den Anlagenbetrieb zur Verfügung. Weiter wurden praktische Erfahrungen hinsichtlich Planung, Bau, Betrieb, Beheizung, Dämmung und Messtechnik einer Mikro-Biogasanlage gesammelt.

Darüber hinaus konnten erste Erkenntnisse zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für Mikro-Biogasanlagen in der Schweiz gewonnen werden. Die Abklärungen zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen ein bewilligungsfreier Betrieb ohne Hygienisierungsstufe möglich sein kann.

Erste Wirtschaftlichkeitsabschätzungen für verschiedene Anlagentypen sowie Potenzialanalysen für Anwendungen in Haushalten, Alpwirtschaften und Berggasthäusern wurden durchgeführt.

Wesentliche Forschungsfragen bleiben offen. Insbesondere konnten im Rahmen dieses Projekts keine belastbaren Aussagen zum tatsächlichen Wärmeeigenbedarf, zur energetischen Gesamtbilanz sowie zur optimalen Auslegung von Heizung, Dämmung und Durchmischung getroffen werden. Aus diesem Grund sind die Wirtschaftlichkeitsberechnung bzw. Energiegestehungskosten nur als eine Grössenordnung zu verstehen.

Ebenso fehlen weiterhin Praxiserfahrungen unter alpinen Einsatzbedingungen sowie Daten zum Langzeitbetrieb von Anlagen mit höherer Auslastung und kürzeren Verweilzeiten.

Fragen zur Umweltbilanz, zu potenziellen Methanverlusten, zur praktischen Arbeitsbelastung für Betreiberinnen und Betreiber, zur Marktakzeptanz sowie zur Einordnung von Mikro-Biogasanlagen im Vergleich zu bestehenden zentralen Verwertungssystemen sind Gegenstand zukünftiger Forschungs- und Demonstrationsprojekte.



6.2 Ausblick

Die Ergebnisse des Projekts MiBAS zeigen, dass Mikro-Biogasanlagen grundsätzlich auch unter Schweizer Klimabedingungen betrieben werden können. Gleichzeitig wurden verschiedene technische, wirtschaftliche und strategische Fragestellungen identifiziert, die im Rahmen zukünftiger Forschungs- und Demonstrationsprojekte vertieft untersucht werden sollten. Die im Projekt gewonnenen Daten bilden hierfür eine wichtige Grundlage. Die dargestellten Erkenntnisse beziehen sich auf die untersuchte Pilotanlage unter den spezifischen Versuchsbedingungen und können nur eingeschränkt auf andere Standorte oder Anwendungsfälle übertragen werden. Weitere Untersuchungen sind deshalb erforderlich, um das Potenzial von Mikro-Biogasanlagen für unterschiedliche Einsatzbereiche fundiert beurteilen zu können. Grundlage dafür bilden die im Projekt gewonnenen Messdaten und Praxiserfahrungen.

Strategische Einordnung von Mikro-Biogasanlagen

Eine zentrale Fragestellung für zukünftige Arbeiten betrifft die strategische Einordnung von Mikro-Biogasanlagen innerhalb der Schweizer Biomasse- und Energiestrategie. Dabei ist insbesondere zu klären, unter welchen technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und logistischen Rahmenbedingungen dezentrale Mikro-Biogasanlagen gegenüber bestehenden zentralen Vergärungsanlagen einen Mehrwert bieten. Während in dicht erschlossenen Regionen des Mittellandes bereits etablierte Sammel- und Verwertungsstrukturen für Bioabfälle bestehen, könnten Mikro-Biogasanlagen insbesondere in abgelegenen Regionen, auf Alpwirtschaften, in Berggasthäusern, bei Kleinstwohnformen oder in gemeinschaftlichen Wohnprojekten Vorteile bieten. Zukünftige Untersuchungen sollten daher verschiedene Verwertungskonzepte sowie unterschiedliche Anlagentypen hinsichtlich Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit, Kreislaufwirtschaft, Resilienz und Klimawirkung systematisch vergleichen.

Markteinführung und Förderinstrumente

Neben technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen sollte künftig auch untersucht werden, welche Rahmenbedingungen die praktische Einführung von Mikro-Biogasanlagen begünstigen können. Da sich die Technologie in der Schweiz noch in einer frühen Entwicklungs- und Markteinführungsphase befindet, könnten Demonstrationsprogramme, Investitionsbeiträge oder andere Fördermassnahmen dazu beitragen, praktische Erfahrungen zu sammeln und Markteintrittsbarrieren zu reduzieren. Gleichzeitig ist zu prüfen, unter welchen Bedingungen sich Mikro-Biogasanlagen auch ohne spezifische Förderinstrumente gegenüber alternativen Verwertungs- und Energielösungen behaupten können.

Vorbehandlung durch Zerkleinerung

Die im Projekt sowie in den begleitenden Laborversuchen gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Substratvorbehandlung einen bedeutenden Einfluss auf die Bedienbarkeit und den biologischen Abbau haben kann. Der tatsächliche Nutzen unterschiedlicher Zerkleinerungsgrade konnte jedoch nicht abschliessend geklärt werden. Künftige Untersuchungen sollten daher systematisch prüfen, wie sich verschiedene Vorbehandlungstechnologien auf Gasbildung, Energieaufwand, Verweilzeit und Betriebsstabilität auswirken. Dabei ist insbesondere zu klären, ob der zusätzliche Energiebedarf der Zerkleinerung durch höhere Gaserträge kompensiert werden kann.

Vorbehandlung durch Hygienisierung

Für den Einsatz von Speiseresten und anderen hygienisch kritischen Substraten bestehen weiterhin offene Fragen hinsichtlich rechtlicher Anforderungen und praktischer Umsetzbarkeit. Zukünftige Projekte sollten untersuchen, welche Hygienisierungsmassnahmen für unterschiedliche Einsatzstoffe und Verwendungszwecke des Gärguts erforderlich sind und wie diese technisch möglichst einfach und energieeffizient umgesetzt werden können. Dabei sind sowohl die hygienische Sicherheit als auch die Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz der Anlage zu berücksichtigen.



Verbesserung der Wärmeübertragung durch Rezirkulation

Die Messkampagne hat gezeigt, dass innerhalb des Fermenters deutliche Temperaturgradienten auftreten können. Aufgrund der fehlenden Durchmischung wurde die eingebrachte Wärme nur unzureichend im gesamten Fermenter verteilt. Erste Versuche mit einer Rezirkulation des Fermenterinhalts weisen darauf hin, dass hier Potenzial zur Verbesserung der Temperaturhomogenität und damit der biologischen Aktivität besteht. Künftige Forschungsarbeiten sollten deshalb untersuchen, wie Rezirkulation- oder Mischsysteme ausgelegt werden müssen, um die Wärmeübertragung zu verbessern, ohne dabei den Energieverbrauch und die technische Komplexität übermässig zu erhöhen.

Erweiterte Nutzungsmöglichkeiten des Biogases

Im Projekt wurde das erzeugte Biogas ausschliesslich für Kochzwecke (Tee) genutzt. Für eine breitere Anwendung von Mikro-Biogasanlagen sind jedoch weitere Nutzungsoptionen von Interesse. Dazu zählen insbesondere die Warmwasserbereitung, die Raumheizung, die Einbindung in hybride Energiesysteme sowie potenzielle Anwendungen im Mobilitätsbereich. Gerade in Kombination mit Photovoltaik, Batteriespeichern oder anderen erneuerbaren Energietechnologien könnten Mikro-Biogasanlagen künftig zur Erhöhung der Energieautarkie beitragen. Für diese Anwendungen sind jedoch zusätzliche technische, wirtschaftliche und regulatorische Abklärungen erforderlich.

Weiterverwendung der Forschungsanlage

Über die eigentliche Forschungsarbeit hinaus besitzt die im Projekt aufgebaute Anlage Potenzial als Demonstrations-, Schulungs- und Ausbildungsplattform. Derzeit werden Möglichkeiten geprüft, die Anlage langfristig an der ZHAW für Lehrveranstaltungen, Workshops, öffentliche Führungen sowie für die Ausbildung von Studierenden weiterzuverwenden. Darüber hinaus könnte sie als Demonstrator für Behörden, Technologieanbieter, landwirtschaftliche Betriebe und weitere Interessierte dienen und damit zur Verbreitung von Wissen und Praxiserfahrungen im Bereich der Mikro-Biogastechnologie beitragen.

Weiterer Forschungsbedarf

Besonderer Forschungsbedarf besteht weiterhin bei der energetischen Gesamtbilanz von Mikro-Biogasanlagen unter Schweizer Bedingungen. Insbesondere der tatsächliche Eigenwärmebedarf sowie die optimale Auslegung von Dämmung, Heizung und Durchmischung konnten im Rahmen dieses Projekts nicht abschliessend beantwortet werden. Ebenso fehlen belastbare Daten für alpine Einsatzbedingungen. Zukünftige Projekte sollten daher verstärkt auf praxisnahe Demonstrationsanlagen mit optimierter Anlagentechnik fokussieren, um die langfristige Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Praxistauglichkeit verschiedener Anlagenkonzepte zu bewerten. Dies würde eine fundierte Grundlage schaffen, um die Rolle von Mikro-Biogasanlagen innerhalb eines nachhaltigen und dezentralen Energiesystems der Schweiz künftig besser einordnen zu können.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projekts erfolgte eine enge und kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Projektpartnern. Zu Projektbeginn wurde ein Workshop zur «Installation der Mikro-Biogasanlage» durchgeführt, der auch externen Interessierten offenstand und den fachlichen Austausch zwischen den Projektpartnern förderte.

Das Projekt wurde auf mehreren Anlässen und internationalen Konferenzen in der Schweiz, Italien, USA und China präsentiert. Dadurch konnte das Netzwerk mit Universitäten sowie Forschungseinrichtungen im In- und Ausland gezielt erweitert und vertieft werden.

Die im Projekt gesammelten Erfahrungen flossen zudem in das REPIC-Projekt «Green Palm Circuits (GPC)» ein, das den Aufbau und den Betrieb einer Mikro-Biogasanlage in Ghana unterstützt. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Schulung und Qualifizierung des lokalen Personals.

Grundlagen der Anlagenplanung und gewisse Betriebsdaten fliessen ebenfalls in ein Projekt der SBB für eine neue Überbauung mit geplanten 850 Wohnungen und Gewerbe ein.

Die Anlage diene ausserdem zur Erhebung von Messdaten durch die ETH, die zukünftig in die Entwicklung von kostengünstigerer Messtechnik fliessen sollen.

Darüber hinaus erfolgte ein fortlaufender Austausch über verschiedene Kommunikationskanäle, unter anderem über den Task 37 der International Energy Agency, eine internationale Arbeitsgruppe, die sich mit der anaeroben Vergärung (AD) von Biomasse-Rohstoffen, einschliesslich landwirtschaftlicher Rückstände, befasst. Über diesen Weg werden die erhobenen Daten auch in einen Report zu Mikro-Biogasanlagen einfließen.



8 Publikationen und andere Kommunikation

8.1 Workshop «Installation der Mikro-Biogasanlage»

Informationen inklusive Fotodokumentation des Workshops «Installation der Mikro-Biogasanlage» im Mai 2024 befinden sich im separaten Dokument «Anhang_Schlussbericht_deutsch» unter Anhang A1.

Ende Mai 2024 organisierte die Firma (B)energy im Synergy Village einen Workshop zur Installation einer Mikro-Biogasanlage. Nach dem Rückschnitt von Gehölzen und dem Aufbau einer temporären Überdachung wurde ein Aushub von ca. 30-40 cm Tiefe für den Fermenter vorbereitet und mit Schutzfolie sowie Perlit-Isolierung ausgekleidet. Die Wärmedämmung erfolgte durch Styroporplatten, bevor die Heizspirale auf dem Boden fixiert und der Folienfermenter samt Rohrleitungen installiert wurde. Anschliessend wurde die Gewächshaushülle mit Tragegestell montiert und verankert, ergänzt durch Kondensatfalle und Überdrucksicherung. Zum Abschluss wurden Gasreinigungseinheit und Messsystem installiert, gefolgt von einer Präsentation und Diskussionsrunde.

8.2 Dissemination

8.2.1 Kommunikation des Projekts

KREIS-Haus-Newsletter

Der KREIS-Haus-Newsletter ist ein Newsletter der ZHAW rund um das Forschungs- und Demonstrationsprojekt KREIS-Haus. Er informiert über Forschungsergebnisse, Veranstaltungen, Workshops, neue Angebote und Entwicklungen des Hauses. Der Newsletter erreicht ca. 1'090 Empfängerinnen und Empfänger aus den Bereichen Forschung, Bildung, Wirtschaft, öffentliche Verwaltung sowie interessierte Privatpersonen.

Zur Verbreitung der Projektergebnisse wurde das MiBAS-Projekt im KREIS-Haus-Newsletter vom 18. Januar 2025 vorgestellt. Dadurch konnten erste Projektergebnisse, Anwendungsbeispiele und Informationen zu Mikro-Biogasanlagen einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Link zum Artikel: <https://mailchi.mp/zhaw/news-aus-dem-kreis-haus-mrz-10963107>

Energieia

Die Zeitschrift Energieia wird vom Bundesamt für Energie (BFE) herausgegeben und richtet sich an Fachleute, politische Entscheidungsträger und interessierte Personen im Bereich der Energiepolitik, Forschung und Innovation. Sie informiert über aktuelle Projekte, Entwicklungen und Strategien zur nachhaltigen Energiezukunft der Schweiz.

Ein Artikel über das Projekt MiBAS in Energieia hob die Relevanz von Mikro-Biogasanlagen als nachhaltige Energielösung hervor. Der Beitrag betonte die Herausforderungen, die mit dem Einsatz dieser Anlagen in der Schweiz verbunden sind, insbesondere aufgrund kühlerer Temperaturen und strenger gesetzlicher Vorgaben. Gleichzeitig wurde das Potenzial für Wissenstransfer zwischen der Schweiz und Ländern des globalen Südens beleuchtet, in denen Mikro-Biogasanlagen aufgrund wärmerer klimatischer Bedingungen bereits erfolgreich genutzt werden.

Der Artikel betont, dass das Projekt MiBAS dazu beiträgt, die Forschung zu Mikro-Biogasanlagen zu vertiefen, um diese Technologie an die spezifischen Anforderungen der Schweiz anzupassen. Dabei wurde auch die Bedeutung von dezentralen Energielösungen in Regionen wie Alpwirtschaften, Berggasthäusern und kleinen Betrieben hervorgehoben. Die Veröffentlichung unterstreicht die Innovationskraft des Projekts und dessen Ziel, nachhaltige Lösungen für Energie und Stoffkreisläufe zu entwickeln.



Bühler, D., Merkle, W., Pütz, K., Rüschi, F. (2024). Workshop «Installation der Mikro-Biogasanlage», 25.05.2024.

Link zum Artikel: <https://energeiaplus.com/2024/06/05/mikro-biogasanlagen-wissenstransfer-mit-entwicklungslandern/>

ZHAW Transfer

Die Zeitschrift Transfer ist das Magazin der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW). Sie erscheint regelmässig und richtet sich sowohl an Fachleute als auch an eine interessierte Öffentlichkeit. Transfer dient als Plattform, um aktuelle Forschungsergebnisse, innovative Projekte und praxisrelevante Themen der ZHAW einer breiten Leserschaft zugänglich zu machen.

Der Artikel mit dem Titel "Mikro-Biogasanlagen: Nachhaltige Energieerzeugung für dezentrale Anwendungen in der Schweiz" wurde von der Fachgruppe Umweltbiotechnologie verfasst. Darin wurde das Projekt grob vorgestellt und allgemein auf die Technologie der Mikro-Biogasanlagen eingegangen. Besonderer Schwerpunkt lag auf den Herausforderungen und Chancen dieser Technologie im Schweizer Kontext, etwa die Anpassung an klimatische Bedingungen, die Effizienzsteigerung und die Integration in bestehende Energiesysteme. Zudem wurden konkrete Einsatzmöglichkeiten, wie in Alpwirtschaften, SAC-Hütten und Berggasthäusern, hervorgehoben.

ZHAW Life Sciences und Facility Management. (2024). TRANSFER : Ausgabe 2/2024. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. <https://doi.org/10.21256/zhaw-11475/31742>

Link zum Magazin: <https://digitalcollection.zhaw.ch/server/api/core/bitstreams/458506ad-7391-4ea1-9dd2-6713da2e21f0/content>

8.2.2 Kommunikation der Ergebnisse

Führungen und Vorträge auf der Biogasanlage

Merkle, W., Rüschi, F., Sciascia, G. (2025). Besuch von Agrofutura, 16.09.2025.

Merkle, W., Rüschi, F., Sciascia, G. (2025). Besuch vom AWEL, 19.09.2025.

Vorträge

Merkle, W. (2024). Operation of micro biogas systems under Swiss climate conditions. Great Cycle: International Symposium on Agricultural and Rural Carbon Neutralization-Contribution of Biogas Project, Beijing, 10.09.2024.

Merkle, W., Nägele, H.-J. (2025). Insights and Progress from a Swiss Micro Biogas Research Plant. Interagency Arctic Research Policy Committee Meeting, online, 16.04.2025.

Merkle, W. (2025). Insights and Progress from a Swiss Micro Biogas Research Plant. XIX Summer School on Advanced Biotechnology, Palermo, 01.09.2025.

Merkle, W. (2025). Insights and Progress from a Swiss Micro Biogas Research Plant. Great Cycle: International Symposium on Agricultural and Rural Carbon Neutralization-Contribution of Biogas Project, Beijing, online, 16.10.2025.



Literaturverzeichnis

- Angelidaki, I., Ellegaard, L., 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends. Appl. Biochem. Biotechnol. 109.
- B-Energy operations UG, 2021. Originalbetriebsanleitung (B)plant & B(pack), Biogassystem (B)calm, (B)cooll, (B)clever.
- Bundesamt für Energie BFE, 2023. Energiestrategie 2050, Monitoring-Bericht 2023 (ausführliche Fassung). Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- ChemRRV, 2026. SR 814.81 - Verordnung vom 18. Mai 2005 zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung). | Fedlex [WWW Document]. URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de> (accessed 8.4.26).
- DIN EN ISO 10628, 2014. Schemata für die chemische und petrochemische Industrie.
- Fachstelle Alpwirtschaft, Kanton Bern, 2020. Merkblatt-Alpduengung.
- HomeBiogas, 2024. HomeBiogas - Food Waste Solutions [WWW Document]. URL <https://www.homebiogas.com/solutions/backyard/> (accessed 11.9.24).
- ISO 14617, 2025. Graphische Symbole für Schemazeichnungen.
- NDRC, 2017. The 13th Five-Year National Plan for Rural Biogas Development, 全国农村沼气发展“十三五”规划. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China; Ministry of Agriculture of the People's Republic of China.
- REN21, 2018. Renewables 2018 Global Status Report (No. 978-3-9818911-2-6). REN21 Secretariat, Paris.
- Schürch-Wyss, G., Schürch-Wyss, B., 2025. Portrait d'exploitation. Union suisse des paysans.
- SN EN ISO 23590, 2021. Anforderungen an häusliche Biogasanlagen: Auslegung, Aufbau, Betrieb, Instandhaltung und Sicherheit.
- SNV, 2021. Biodigesters for Better Life. SNV.
- Steiner, R., 2014. Qualitätsmanagement Biogas. Biomasse Schweiz, Energie Schweiz, Schweiz.
- SustainHuts, 2016. Projekt - Life SustainHuts [WWW Document]. URL <https://sustainhuts.eu/project/> (accessed 11.18.24).
- SVGW, 2016. Regelwerk G13 - Richtlinie für die Einspeisung von erneuerbaren Gasen. SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- Viénot, E., 2022. Interreg Alpine Space EU [WWW Document]. URL <https://www.alpine-space.eu/project/alpgrids/> (accessed 11.18.24).
- Weiland, P., 2009. Biogas production: current state and perspectives. Appl. Microbiol. Biotechnol. 849–860.



Anhang

Folgende Anhänge sind als separates Dokument «Anhang_Schlussbericht_deutsch» verfügbar:

- A1 Workshop «Installation der Mikro-Biogasanlage»
- A2 Fotodokumentation: Montage und Installation der angepassten Mikro-Biogasanlage
- A3 Risikoanalyse
- A4 Temperatur und Zerkleinerungsversuche
- A5 Studie: Rechtliche Situation bezüglich Mikro-Biogasanlagen
- A6 Studie: Wirtschaftlichkeit von Mikro-Biogasanlagen
- A7 Studie: Mikro-Biogasanlagen auf Alpwirtschaften
- A8 Studie: Mikro-Biogasanlagen für Berggasthäuser