



EDGE

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Life Sciences und
Facility Management

IUNR Institut für Umwelt und
Natürliche Ressourcen



LAVEBA



Nachhaltiges Energiekonzept für Biogasanlagen Fallstudie Wittenbach

Technischer Bericht, Februar 2024

www.sweet-edge.ch

Michael Wild, ZHAW Wädenswil
Muriel Siegwart, ZHAW Wädenswil
Nicolas Stocker, ZHAW Wädenswil
Jürg Rohrer, ZHAW Wädenswil

<https://doi.org/10.21256/zhaw-2648>

Edge ist ein durch das SWEET Programm des Schweizerischen Bundesamtes für Energie
finanziertes Konsortium unter der gemeinsamen Koordination von UNIGE und EPFL.

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	3
SUMMARY	4
ZUSAMMENFASSUNG	6
1 EINLEITUNG	8
1.1 AUSGANGSLAGE	8
1.2 BIOGASANLAGE WITTENBACH.....	9
1.3 WÄRMEQUELLEN	10
1.3.1 <i>Substrat – Gärgülle Wärmetauscher</i>	10
1.3.2 <i>Wärmeauskopplung Gasaufbereitung</i>	11
1.3.3 <i>Wärmepumpe mit Gärgütlelager als Wärmereservoir</i>	11
1.3.4 <i>Weiteres Heizsystem</i>	11
2 METHODIK	11
2.1 MODELLIERUNG.....	11
2.2 MODELLGLEICHUNGEN.....	13
2.2.1 <i>Randbedingungen</i>	13
2.2.2 <i>Massenströme und Füllstände</i>	14
2.2.3 <i>Wärmeflüsse</i>	15
2.2.4 <i>Zustandsgleichungen</i>	16
2.3 PROGRAMMLOGIK.....	16
2.4 STANDARD-PARAMETER	16
3 RESULTATE	17
3.1 WÄRMETAUSCHER & RÜCKGEWINNUNG GAS-AUFBEREITUNG	17
3.2 WÄRMEPUMPE & GÄRLAGERTEMPERATUR.....	17
3.3 ZWISCHENFAZIT.....	19
3.4 SENSITIVITÄTSANALYSE	20
3.5 WEITERE VARIATIONEN.....	21
3.6 VERGLEICH ZU ANDEREN WÄRMEQUELLEN.....	21
4 FAZIT	24
5 REFERENZEN	25

Danksagung

Die in dieser Publikation präsentierten Forschungsergebnisse wurden mit Unterstützung des Schweizerischen Bundesamts für Energie im Rahmen des SWEET-Konsortiums EDGE erarbeitet. Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für die in dieser Publikation enthaltenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

Die Autoren bedanken sich bei Thomas Keel (Laveba), Mátyás Scheibler (EnergieWenden) sowie Christian Quirrenbach (NQ Anlagentechnik) für die Unterstützung und die Zusammenarbeit.

Summary

In Switzerland, there is considerable untapped potential for the energetic utilisation of manure (2.75 TWh/a). In the coming years, this is to be used to produce high-quality, renewable biogas, which can contribute to the decarbonisation of the Swiss energy system. Renewable gaseous fuels are an important part of the energy strategy, as they are used where electrification is difficult or very uneconomical. In contrast to the current situation, in which a large proportion of agricultural biogas plants convert the gas produced into electricity on-site, biogas plants are to feed directly into the gas grid more often in future. However, this requires alternative heating of the fermenters, as the generously available waste heat from a combined heat and power (CHP) plant cannot be utilised as in the case of electricity generation.

Based on the case study of a planned biogas plant in Wittenbach, an energy concept for a gas-feeding biogas plant was developed, whereby an innovative combination of heat exchanger, heat recuperation and a heat pump was investigated using numerical simulations. To this end, the relevant heat and mass flows of the biogas plant were modelled. Under the chosen conditions, the entire heating requirement of the digesters can be covered over the entire year by the heat exchanger, the heat recuperation from gas processing and the heat pump alone. The critical value of the minimum fermentation slurry storage temperature (5 °C) is not violated in this case, but is met with a margin of >2 °C.

In a sensitivity analysis, various aspects of the modelling and assumptions were examined more closely in order to quantify their influence on the results. For this purpose, selected parameters were varied within a certain range. It was found that in most cases there is a considerable margin. Problematic combinations were found mainly in the case of high heat exchanges between the slurry storage and the environment, and strongly increased heating requirements without a correspondingly higher mass flow. While the first problem (poorly insulated slurry storage) can be prevented by appropriate design, the second problem (e.g. very cold year, unexpected heat losses) is more difficult to solve, but also benefits from good insulation.

The simulations show that no additional heating system is needed for normal operation of the plant, except for redundancy considerations and for start-up. Figure 1 shows a summary of the relevant net biomethane and electricity production for year-round digester heating according to the energy concept presented in this study, compared to a conventional natural gas heating system as well as a combined heat and power (CHP) system.

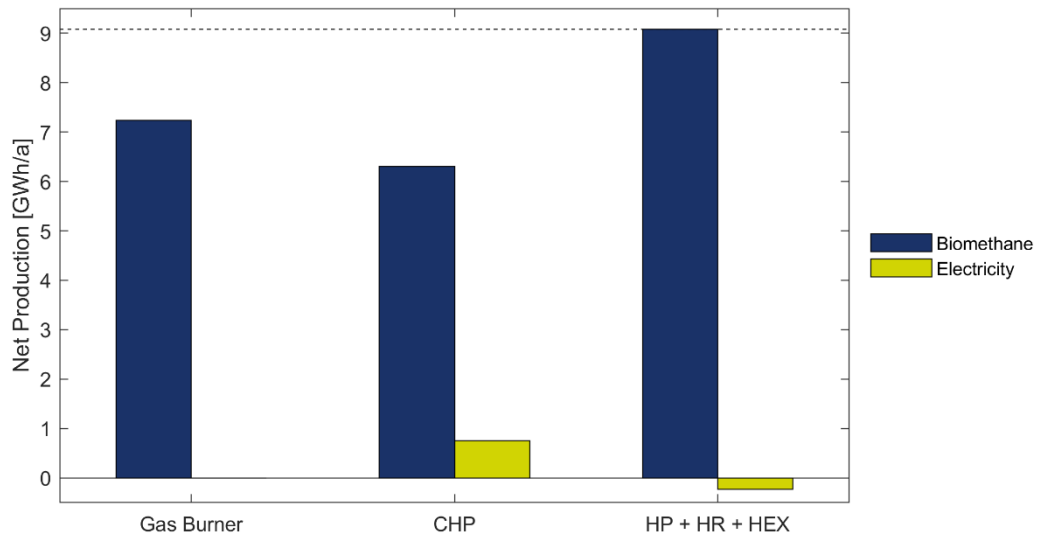


Figure 1. Comparison of annual net biomethane and electric power production of the planned biogas plant in Wittenbach, utilizing different digester heating systems. Based on an annual biomethane production of 9.08 GWh, a gas burner (95% efficiency) utilizes 1.80 GWh while a CHP self-consumes 2.78 GWh, while producing 0.75 GWh of Electricity. In contrast, the combination of heat pump, active heat recovery in the gas compression unit as well as utilizing a substrate/digestate heat exchange does not self-consume biomethane, but requires an electrical input of 0.23 GWh/a.

Zusammenfassung

In der Schweiz gibt es ein beträchtliches, noch nicht erschlossenes Potential zur energetischen Nutzung von Hofdünger (2.75 TWh/a). Dieses soll in den kommenden Jahren genutzt werden, um hochwertiges, erneuerbares Biogas herzustellen, welches zur Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems beitragen kann. Erneuerbare gasförmige Treib- und Heizstoffe sind ein wichtiger Bestandteil der Energiestrategie, da sie dort zum Einsatz kommen, wo eine Elektrifizierung nur schwer möglich oder sehr unwirtschaftlich ist. Im Gegensatz zur heutigen Situation, in der ein Grossteil der landwirtschaftlichen Biogasanlagen das produzierte Gas vor Ort verstromt, sollen in Zukunft Biogasanlagen öfters direkt ins Gasnetz einspeisen. Dies bedingt jedoch eine alternative Beheizung der Fermenter, da nicht wie bei der Verstromung die grosszügig vorhandene Abwärme eines BHKW genutzt werden kann.

Anhand des Fallbeispiels einer geplanten Biogasanlage in Wittenbach wurde ein Energiekonzept für eine direkt einspeisende Biogasanlage evaluiert, wobei eine innovative Kombination aus Wärmetauscher, Wärmerückgewinnung, sowie einer Wärmepumpe mittels einer quantitativen Simulation untersucht wurde. Dafür wurden die relevanten Wärme- und Masseströme der Biogasanlage modelliert. Unter den gewählten Bedingungen kann der gesamte Heizbedarf der Fermenter über das ganze Jahr alleine durch den Wärmetauscher, die Wärmerückgewinnung der Gasaufbereitung sowie die Wärmepumpe gedeckt werden. Die kritische Grösse der minimalen Gärgüllelager-Temperatur (5°C) wird in diesem Fall nicht verletzt, sondern mit einer Marge von >2°C eingehalten.

In einer Sensitivitätsanalyse wurden verschiedene Aspekte der Modellierung und Annahmen genauer untersucht, um ihren Einfluss auf die Resultate zu quantifizieren. Dafür wurden ausgewählte Parameter in einem realistischen Umfang variiert. Es zeigte sich, dass in den meisten Fällen eine beträchtliche Marge vorhanden ist. Problematische Kombinationen zeigten sich vor allem bei hohen Wärmeaustauschen zwischen Gärgüllelager und Umwelt und stark erhöhten Heizbedarfen ohne entsprechend höheren Massedurchfluss. Während das erste Problem (schlecht gedämmtes Gärgüllelager) durch entsprechende Konstruktion verhindert werden kann, ist das zweite Problem (z.B. sehr kaltes Jahr, unerwartete Wärmeverluste) schwieriger zu lösen, profitiert jedoch auch von einer guten Dämmung.

Die Simulationen zeigen, dass für den Normalbetrieb der Anlage keine zusätzliche Heizung nötig ist, ausgenommen aus Redundanzüberlegungen und für das Anfahren. Abbildung 1 zeigt eine Zusammenfassung der Netto Gas- und Stromproduktion für eine ganzjährige Fermenterbeheizung gemäss dem hier vorgestellten Energiekonzept verglichen mit einer konventionellen Gasheizung sowie einem Blockheizkraftwerk.

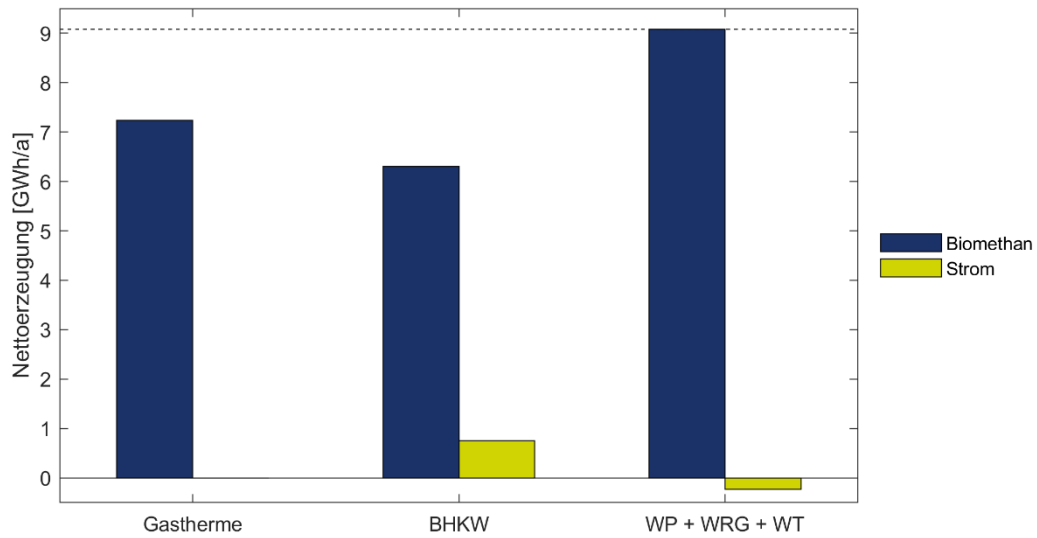


Abbildung 1. Vergleich der jährlichen Nettoproduktion von Biomethan und Strom der geplanten Biogasanlage in Wittenbach unter Verwendung verschiedener Wärmequellen zur Fermenterbeheizung. Ausgehend von einer jährlichen Biomethanproduktion von 9.08 GWh benötigt eine Gastherme (95% Effizienz) 1.80 GWh, während ein Blockheizkraftwerk (BHKW) einen Gasverbrauch von 2.78 GWh hat – bei gleichzeitiger Produktion von 0.75 GWh Strom. Dagegen benötigt die in dieser Studie untersuchte Kombination von Wärmepumpe (WP), Wärmerückgewinnung in der Gaskompression (WRG) sowie der Einsatz eines Substrat-Gärgülle-Wärmetauschers (WT) kein Biomethan, jedoch Strom im Umfang von 0.23 GWh/a.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Gemäss der VSG Jahresstatistik 2023 wurde im Jahr 2022 in der Schweiz Erdgas im Umfang von 33'408 GWh verbraucht, wovon nur 470 GWh durch lokal produziertes Biomethan abgedeckt wurden. Gesamthaft sind in der Schweiz zurzeit 42 Anlagen in Betrieb, welche Biomethan ins Gasnetz einspeisen. Dazu kommt importiertes Biomethan im Umfang von 2'306 GWh, wofür ausgewiesenermassen Zertifikate erworben wurden. Erneuerbare Gase deckten 2022 einen Anteil von 8% am gesamtschweizerischen Gasverbrauch ab, wobei dieser Anteil auf tiefem Niveau klar ansteigt (2020: 4.2%) (VSG Jahresstatistik 2023, 2023).

Das grösste zusätzlich nutzbare Potential zur Biomethanproduktion in der Schweiz ist die Kategorie des Hofdüngers aus der Landwirtschaft, mit einem Potential von 9.9 PJ/a (2.75 TWh/a) Methanproduktion aus 26.9 PJ verfügbarer Primärenergie (Thees et al., 2017). Gemäss Szenario Zero Basis der Energieperspektiven 2050+ soll der Biomethananteil am Schweizer Gasverbrauch langfristig auf 100% steigen, wenn auch unter Einbezug beträchtlicher Importe (BFE, 2021b). Das Szenario skizziert einen Biomethanverbrauch von 15.33 TWh/a, wobei 11.75 TWh/a importiert werden. Das gesamthafte nachhaltige Biomethanpotential der Schweiz wird damit ausgeschöpft (BFE, 2021a).

Das in einer Biogasanlage (BGA) produzierte Biomethan kann in das Gasnetz eingespeist oder vor Ort in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) verstromt werden, wobei Wärme als Nebenprodukt entsteht. Ein Grossteil der in der Schweiz installierten landwirtschaftlichen BGA arbeiten nach dem zweiten Prinzip. 2022 wurde in landwirtschaftlichen BGA Biogas mit einem Brennwert von 551 GWh produziert, wovon aber nur 11.08 GWh (ca. 2%) ins Gasnetz eingespeist wurden (BFE, 2023). Die im BHKW produzierte Wärme wird primär zur Fermenterbeheizung eingesetzt und sekundär gewinnbringend veräussert (z.B. über einen Wärmeverbund oder zur Auftragstrocknung). So wurden 2022 insgesamt 151.4 GWh Wärme zur Fermenterheizung genutzt, während 60.5 GWh Wärme anderweitig eingesetzt wurden (BFE, 2023). Während für landwirtschaftliche BGA nur die Restriktion besteht, dass der Wärmebedarf der Energieanlage durch Wärmenutzung der WKK-Anlage oder andere erneuerbare Quellen gedeckt

werden muss, müssen übrige BGA mindestens 40% der Brutto-Wärmeproduktion einer weiteren Verwendung zuführen (SR 730.03, 2023).

Biogasfermenter sollten bei einer möglichst konstanten Temperatur betrieben werden, wobei das optimale Temperaturniveau zur Maximierung der Gasausbeute von unterschiedlichen Faktoren abhängt. Landwirtschaftliche BGA werden meist in einem mesophilen Bereich bei Temperaturen zwischen 37 °C und 42 °C betrieben, wobei höhere Betriebstemperaturen je nach Substratzusammensetzung anzustreben sind (Leitfaden Biogas, 2016). Der Prozess der Vergärung besteht je nach Zusammensetzung des Ausgangssubstrats aus einer Mischung endothermer (z.B. gesättigte Fettsäuren und Proteine) sowie exothermer (z.B. Kohlenhydrate) Reaktionen (Zhang et al., 2014). In der Summe sind die Reaktionen meist leicht exotherm, liefern jedoch nicht Wärme in dem Umfang, welcher für die Substraterwärmung sowie das Ausgleichen der kontinuierlichen Transmissionsverluste nötig wäre. Die Fermenter müssen also aktiv beheizt werden, um ein konstantes Temperaturniveau zu gewährleisten.

Um diese Wärme bereitstellen zu können, gibt es je nach Verwertungsmethode zwei gängige Ansätze: In einer verstromenden BGA kann die Abwärme des BHKW den Wärmebedarf der Fermenter problemlos decken, während in einer gaseinspeisenden BGA ein Teil des produzierten Biogases als Eigenbedarf verbrannt werden kann. Abhängig unter anderem von der Wärmedämmung des Fermenters muss dafür bis zu 30% des produzierten Biogases eingesetzt werden (Avila-Lopez et al., 2023), wodurch sich die energetische Effizienz und Gasausbeute als auch die finanzielle Erfolgsrechnung sowie die Klimabilanz verschlechtern.

Gegenüber dem aktuellen Schweizer Stand der Technik gibt es eine Reihe weiterer Massnahmen, welche umgesetzt werden können. Im Rahmen des SWEET-EDGE Projektes wurde eine energetische Variantenstudie durchgeführt, um das Potenzial, Zusammenspiel und Herausforderungen dieser Massnahmen zu untersuchen. Die folgenden Massnahmen wurden dabei betrachtet:

- Wärmerückgewinnung über Substrat/Gärrest-Wärmetauscher.

- Wärmeauskopplung in der Gasverdichtung vor der Biomethaneinspeisung.
- Einsatz einer Wärmepumpe mit dem Gärrestlager und/oder Nachgärer als Wärmereservoir.

Eine weitere mögliche erschliessbare Wärmequelle wäre eine CO₂-Verflüssigungsanlage, welche voraussichtlich in Zukunft öfters Teil einer Biogasanlage sein wird. Dies wurde jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet. Die Fermenterheizung via Holzpyrolyse (mit kombinierter Produktion von Pflanzenkohle) wurde im Rahmen dieser Studie anfänglich eingehend betrachtet, stellt aber hauptsächlich aufgrund der nicht kompatiblen Betriebsoptima keine sinnvolle Lösung dar. Der Wärmebedarf eines Biogasfermenters schwankt sowohl saisonal als auch mit der Temperatur im Allgemeinen. Darüber hinaus können Änderungen der Substratzufuhr und der Substratzusammensetzung diesen Wärmebedarf beeinflussen. Andererseits müssen Pyrolyseöfen, die EBC-zertifizierte Biokohle produzieren können (eine notwendige Voraussetzung für einen rentablen kommerziellen Betrieb) unter nahezu optimalen Bedingungen betrieben werden, wobei Abweichungen im Allgemeinen die Qualität der produzierten Biokohle erheblich beeinträchtigen. Nach der Durchführung einer Marktstudie über verfügbare Pyrolyseanlagen und deren Spezifikationen wurde eine Vielzahl von Kombinationen und Kaskaden im Detail untersucht. Zwar gibt es durchaus Kaskaden, die in der Lage sind, den Wärmebedarf jederzeit zu decken (ohne ihre eigenen Betriebsanforderungen stark zu verletzen), doch bestehen sie aus mehreren verschiedenen Typen von Pyrolyseanlagen, was eine hohe Komplexität mit sich bringt. Die Erkenntnis, dass bei den heutigen Biogasanlagen wenig einfach zu realisierenden Rekuperations- und Effizienzmaßnahmen zum Einsatz kommen, machte letztlich eine genauere Betrachtung überflüssig, da der verbleibende Wärmebedarf (nach Umsetzung der genannten Maßnahmen) deutlich unter dem Leistungsniveau handelsüblicher Pyrolyseanlagen liegt – und durch stärkere relative Schwankungen gekennzeichnet ist, die den oben genannten betrieblichen Anforderungen noch stärker entgegenstehen.

Diese Massnahmen stellen für sich alleine keine technischen Neuerungen dar. Beispielsweise werden Rohrbündelwärmetauscher für Biogasanlagen bereits serienmässig hergestellt, kommen aber bisher in der Schweiz nicht oder nur sehr vereinzelt zum Einsatz. Der Bedarf für eine

Verringerung der benötigten Prozesswärme bzw. deren Bereitstellung besteht erst mit dem Wegfallen des BHKW durch direkte Einspeisung des Biogases, was zum heutigen Zeitpunkt sehr selten geschieht, im zukünftigen Schweizer Energiesystem jedoch eine stärkere Rolle spielen soll (BFE, 2021b). Biomethan ist ein sehr hochwertiger Energieträger, welcher durch seine hohe Energiedichte und gute Speicherbarkeit einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung der erneuerbaren Erzeugung leisten kann, unter anderem zur Versorgung von regionalen Hochtemperaturprozessen. Die direkte Verstromung vor Ort vergibt einen Grossteil dieser Vorteile.

Die Herausforderung besteht darin, den saisonal schwankenden Wärmebedarf auf möglichst effiziente Weise mit lokal verfügbaren Wärmequellen zu decken. Anhand des Fallbeispiels einer geplanten Biogasanlage in Wittenbach (SG) werden die zentralen Energie- und Masseflüsse über ein Modelljahr simuliert.

1.2 Biogasanlage Wittenbach

In Wittenbach (SG) soll eine Biogasanlage gebaut werden, welche Biomethan direkt in das Erdgasnetz einspeist (Keel & Scheibler, 2022). Diese Verwertungsmethode wurde gewählt, da zum einen ein relativ einfacher Zugang zum Gasnetz direkt angrenzend zum Projektperimeter besteht, zum anderen keine grossen potentiellen Wärmeabnehmer in der Nähe zu finden sind. Darüber hinaus ist die Gaseinspeisung aus Sicht des Gesamtenergiesystems sehr wertvoll. Das Vorhaben wird durch das SWEET-EDGE Projekt begleitet. Die BGA mit einem kombinierten Fermentervolumen von 4'712 m³ wird grossmehrheitlich aus einer Mischung von Hofdünger und Sauermolke von lokalen Zulieferern gespiesen und soll bei einer konstanten Temperatur von 45 °C betrieben werden. Aufgrund des Anteils nicht-landwirtschaftlicher Cosubstrate (zwischen 20 und 50%) wird die geplante Anlage als landwirtschaftliche Biogasanlage Typ C klassifiziert (BAFU, 2021), welche Recyclingdünger herstellt. Es wird eine Rohgasproduktion von 1.58 Mio. m³/a angestrebt, mit der Inbetriebnahme wird 2025 gerechnet. Tabelle 1 fasst die wichtigsten energetischen Kennzahlen der Anlage zusammen.

Tabelle 1. Energie-Kennzahlen der geplanten Biogasanlage in Wittenbach.

Kenngrösse	Wert	Einheit
Rohgasertrag	1'582'000	m ³ /a
Biomethanertrag	911'000	m ³ /a
Mittlere Leistung	1'098	kW
Jahresenergieertrag	9'082	MWh
Heizbedarf	1'748	MWh

Die Biogasanlage wird geplant durch die Firmen Laveba Genossenschaft, Energiewenden, NQ Anlagentechnik, Kuster + Hager Architekturbüro AG, sowie der Bauverwaltung der Gemeinde Wittenbach. Betrieben werden soll sie von einer neu gegründeten Gesellschaft unter Beteiligung der Laveba Genossenschaft, der Gemeinde Wittenbach, sowie weiteren betriebsnahen Akteuren. Abbildung 2 zeigt das Gesamtschema der geplanten Biogasanlage mit allen peripheren Komponenten.

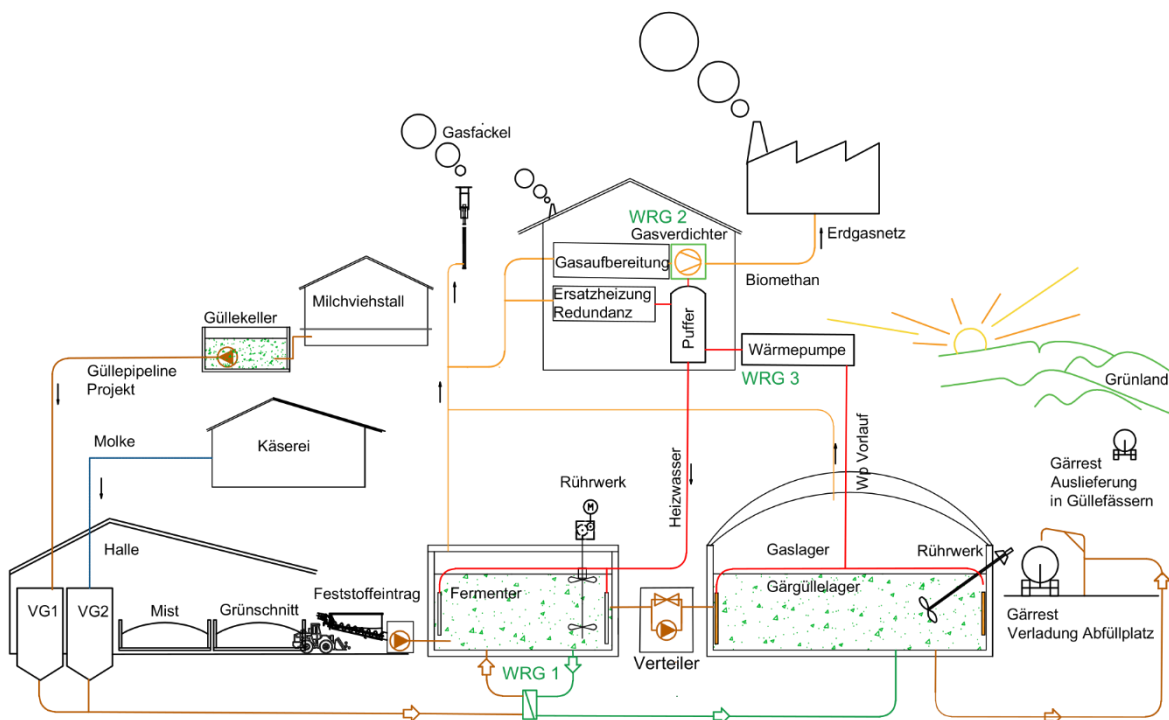


Abbildung 2. Gesamtschema der geplanten Biogasanlage in Wittenbach. Fermenter und Gärgüllelager sind hier als jeweils ein Behälter zusammengefasst. (Zeichnung: Mátyás Scheibler, EnergieWenden).

1.3 Wärmequellen

Die Fermenter der Biogasanlage können durch eine Kombination von verschiedenen Heizsystemen beheizt werden. Im Folgenden werden die betrachteten Systeme kurz vorgestellt.

1.3.1 Substrat – Gärgülle Wärmetauscher

Ein beträchtlicher Teil der benötigten Prozesswärme des Fermenters wird für die Erwärmung des frischen Substrates auf die Fermentertemperatur eingesetzt. Gleichzeitig verlässt die Gärgülle den Fermenter mit

einer Temperatur von 45 °C. Wird auf eine Nachgärung verzichtet, kann die in der Gärgülle enthaltene Wärme über einen Wärmetauscher in das frische Substrat eingebracht werden. Dabei können Wärmetauscher-Effizienzen von >60% erzielt werden. Erhältliche Wärmetauscher sind als Rohr-in-Rohr, Spiral- und Doppelhelix-Wärmetauscher ausgeführt (Ökostrom Schweiz, 2015).

1.3.2 Wärmeauskopplung Gasaufbereitung

In der Biogasanlage Wittenbach wird voraussichtlich ein Gasaufbereitungssystem mit Membrantrennverfahren zur Abscheidung des CO₂ zur Anwendung kommen. Dabei wird das Rohgas auf einen Druck von 5-16 bar verdichtet und über eine Membran geführt. Die bei der Kompression anfallende Abwärme kann für die Fermenterheizung genutzt werden. Basierend auf Herstellerinformationen werden zwei Varianten mit einer verfügbaren Abwärme von 12 oder 24 kW_{th} betrachtet, wobei für Standardberechnungen die konservative Variante mit 12 kW_{th} verwendet wird.

1.3.3 Wärmepumpe mit Gärgüllelager als Wärmereservoir

Die anfallende Gärgülle wird spezifisch im Winter in einem Gärgüllelager gelagert, da sie ausserhalb der Vegetationsperiode nicht auf den Feldern ausgebracht werden darf. Selbst nachdem ihr durch den Wärmetauscher schon eine signifikante Menge Wärme entzogen wurde, ist sie noch immer ein gut nutzbares Wärmereservoir. Durch ein System von

Kühlschleifen im Gärgüllelager kann dieses erschlossen werden. Die Gärgülle wird so auf eine minimale Temperatur von 5 °C abgekühlt, was die Fließfähigkeit gewährleistet. Ein vergleichbares Projekt wurde in Deutschland für einen Schweine-maststall durchgeführt (Pommer, 2019), wobei eine potenzielle CH₄-Emissionsreduktion nicht Teil der Betrachtung war. Eine Reduktion dieser Emissionen mit der Gärgüllentemperatur ist aber zumindest anzunehmen (Baldé et al., 2016).

1.3.4 Weiteres Heizsystem

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Wärmequellen wird eine generische Heizung angenommen, welche zum einen als Rückfallebene fungiert, zum anderen für das initiale Anfahren des Fermenters benötigt wird. Die Technologie (z.B. Holzschneitzelheizung, Gastherme) ist jedoch unspezifiziert, es wird für die Analyse davon ausgegangen, dass die Heizung jeden möglichen Wärmebedarf instantan abdecken kann. Eine Auswahl des spezifischen Heizsystems wird dann a posteriori auf Basis der berechneten Heizbedarfe durchgeführt.

2 Methodik

2.1 Modellierung

Die geplante Anlage wird als punktmodelliertes Wärme- und Massetransfer-Modell aufgebaut. Die Behälter (Fermenter und Gärgüllelager) werden jeweils als homogene, perfekt durchmischte Entitäten betrachtet. Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Prozessflussschema der Anlage. Dabei werden die einzelnen Fermenter und Gärgüllelager zu jeweils einem einzelnen Behälter zusammengefasst. Die diskretisierten Modellgleichungen wurden in MATLAB implementiert.

Das Ausgangssubstrat ist vor dem Eintrag in den Fermenter in eine Fest- sowie Flüssigfraktion aufgeteilt (siehe auch Abbildung 2). Während die

Feststoffe direkt in den Fermenter eingebracht werden, wird der flüssige Anteil durch einen Wärmetauscher geleitet, und von da aus in den Fermenter. Die Gärgülle passiert einen Pressschneckenseparator, welcher die festen Anteile in den Fermenter rückführt. Die flüssigen Anteile werden durch den Wärmetauscher geleitet, und von da aus in das Gärgüllelager. Das Gärgüllelager wird in Wittenbach aus Platzgründen kleiner dimensioniert als die Gesamtmenge der im Winter anfallenden Gärgülle. Die Gärgülle wird immer aus dem Gärgüllelager entnommen, auch wenn bei mangelnder lokaler Kapazität die Gärgülle in diese externen Güllelager transportiert wird. Dadurch kann die in der Gärgülle enthaltene Restwärme trotzdem genutzt werden.

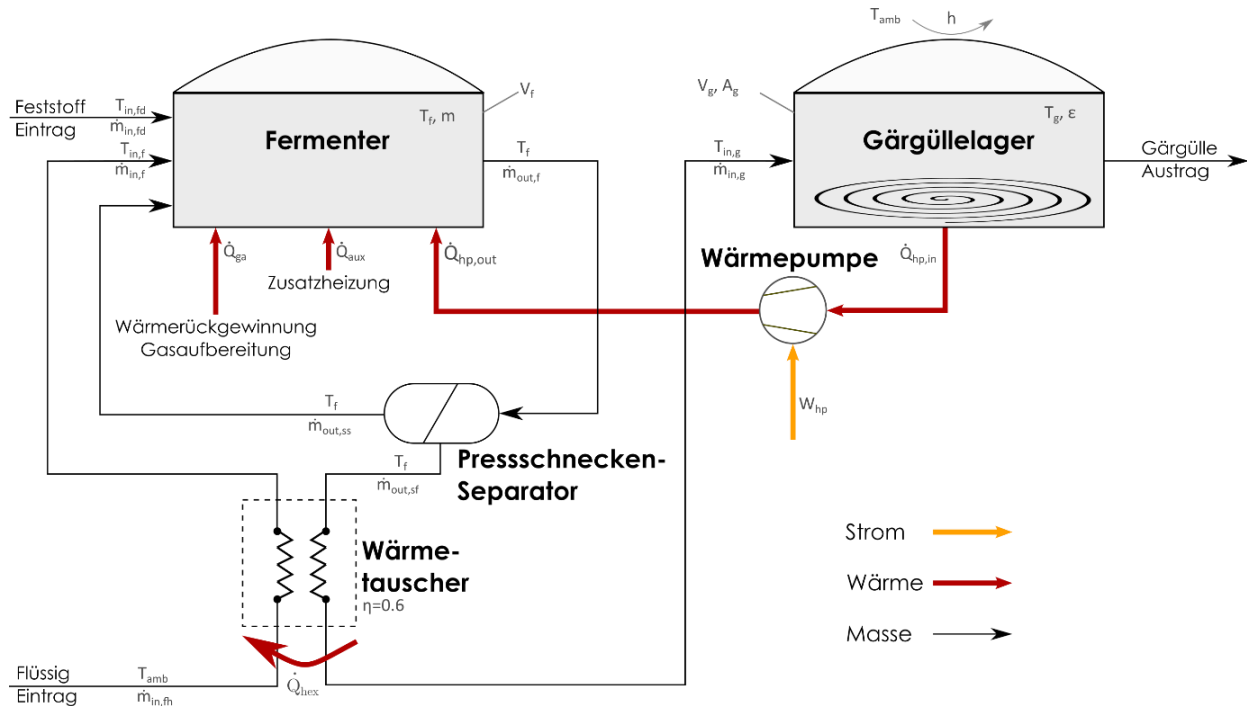


Abbildung 3. Vereinfachtes Prozessflussschema der geplanten Biogasanlage mit Fermenter und Gärgüllelager. Der flüssige Teil des Ausgangssubstrats wird zunächst durch einen Wärmetauscher geleitet und kommt dann in den Fermenter. Die festen Anteile werden direkt in den Fermenter gegeben. Nach der Verweildauer strömt die Gärgülle aus dem Fermenter in den Separator, wobei die flüssigen Anteile in den Wärmetauscher gelangen, und von da in das Gärgüllelager. Die festen Anteile werden nach ergänzenden biologischen und mechanischen Massnahmen in den Fermenter zurückgeführt, wo sie weiter zerfallen. Die Fermenterheizung besteht aus einer Wärmepumpe, welche dem Gärgüllelager Wärme entzieht, Abwärme aus der Gasreinigung sowie einer Zusatzheizung, welche im Regelbetrieb jedoch nicht benötigt wird.

Die Heizkaskade des Fermenters besteht schlussendlich aus einer passiven Wärmerückgewinnung mittels Substrat-Gärgülle Wärmetauscher, der Abwärme aus der Gasaufbereitung, einer aktiven Beheizung mittels der Wärmepumpe sowie einer Zusatzheizung, welche jedoch im Regelfall nicht benötigt werden sollte.

Die folgenden Annahmen werden zur Vereinfachung des Modells gemacht:

- Der Füllstand des Fermenters ist konstant, deshalb sind Massenfluss in den sowie aus dem Fermenter identisch.
- Alle Materialeigenschaften sind temperatur- und zeitkonstant.
- Es wird von einer konstanten Fermentertemperatur $T = 45^\circ\text{C}$ ausgegangen, was eine sehr konservative Annahme darstellt.
- Die Einlasstemperatur des frischen Substrats ist identisch mit der Aussentemperatur.
- Bei der Berechnung des Wärmetransfers vom Gärgüllelager zur Umwelt wird sehr vereinfachend von einem durchschnittlichen linearen Wärmetransferkoeffizient über die gesamte Oberfläche (Wärmetransfer der Wand zur Luft sowie des Bodens zum Erdreich) ausgegangen, wobei der Wärmetransfer abhängig von der Aussentemperatur (Luft) berechnet wird.
- Es wird von komplett homogenen Eigenschaften des Substrates und perfekter Durchmischung in den Behältern ausgegangen.
- Die Fermenter und das Gärgüllelager werden als jeweils ein Behälter angenommen, auch wenn sie in der Realität aus mehreren einzelnen Behältern bestehen. Diesem Umstand wurde über die Oberflächen und Volumen in der Berechnung Rechnung getragen.
- Die Gärgülle wird nach dem Verlassen des Fermenters als inert betrachtet, d.h. es gibt keine Wärmeein- und austräge, welche biologischen Reaktionen geschuldet sind.

2.2 Modellgleichungen

2.2.1 Randbedingungen

Der Massenstrom in den Fermenter wird anhand einer 1-jährigen Sinuskurve modelliert, welche den Substrateintrag im Sommer gegenüber dem Substrateintrag im Winter um einen spezifizierbaren Faktor F verringert, sodass

$$\max(\dot{m})(1 - F) = \min(\dot{m}) \quad (1)$$

wobei das Maximum am 1. Januar, das Minimum am 1. Juli zu liegen kommt. Die entsprechende Gleichung ist

$$\dot{m}_{IN,F}(t) = \dot{m}_{avg} \cdot \left(1 + \frac{F}{2 - F} \cdot \left(\frac{2\pi t}{8760} \right) \right) \quad (2)$$

Wobei \dot{m}_{avg} der Jahresmittelwert des Substrateintrages ist, und $\dot{m}(t)$ in Einheiten von kg/h gerechnet wird. Abbildung 4 zeigt den modellierten Substrateintrag über das gesamte Jahr. Die sommerliche Reduktion des Substrateintrags erfolgt aufgrund der teilweisen Weidehaltung. Im hier gezeigten Fall wird auf Basis von Erfahrungswerten mit einer Reduktion von 10% im Sommer gegenüber dem Winter gerechnet (T.Keel, persönliche Kommunikation, 2023).

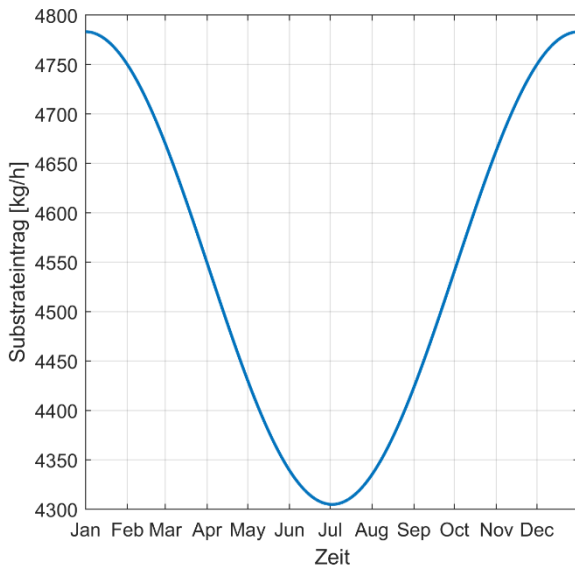


Abbildung 4. Substrateintrag über das gesamte Modelljahr mit einem Jahreseintrag von 39'806 t, durchschnittlichem Eintrag von 4'544 kg/h, maximalem Eintrag von 4'782 kg/h und minimalem Eintrag von 4'305 kg/h. Dies entspricht einer Reduktion von 10% im Juli gegenüber Januar.

Die Entnahme der Gärgülle aus dem Lager wird diskret modelliert. Grundsätzlich wird über den

Sommer Gärgülle entnommen, bis das Lager per Ende September leer ist. Während der Vegetationsruhezeit wird keine Gärgülle auf die Felder ausgebracht. Dies geschieht erst wieder nach Einsetzen der Vegetationsperiode. Dieser Termin kann sich je nach Wetter verschieben und ist von den zu düngenden Kulturen abhängig (Flisch et al., 2009). Es wird davon ausgegangen, dass die Gülleentnahme per Anfang April beginnt und im Sommer konstant ist. Da der Füllstand ausschliesslich im Winter relevant ist, sollte das jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Bei einer totalen Menge von 39'806 t über das gesamte Jahr wird also mit einer Entnahme von 9'214 kg/h während April bis September gerechnet, und mit keiner Entnahme im Winter. Abbildung 5 zeigt den modellierten Verlauf der Gülleentnahme über das gesamte Jahr.

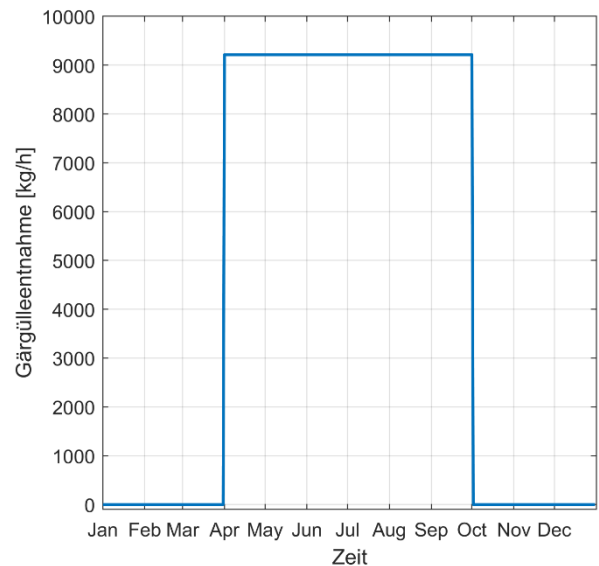


Abbildung 5. Gärülleentnahme über das gesamte Modelljahr mit einer totalen Entnahme von 39'806 t. Keine Gülleentnahme von Oktober bis März. Die Gärülleentnahme wird über den Sommer konstant modelliert.

Die Aussentemperatur wurde anhand von historischen Wetterdaten in St. Gallen festgelegt. Spezifisch wurden Temperaturen aus dem Jahr 2021 verwendet. Im Vergleich zu langjährigen Durchschnittstemperaturen werden so auch Variationen in kurzen Zeitskalen abgebildet. Dabei wurde die Lufttemperatur 2 m über Boden verwendet. Der Wärmebedarf des Fermenters wurde wie folgt modelliert:

$$Q_F = 262.4 \text{ kW} - 6.18 \frac{\text{kW}}{\text{K}} \cdot T \quad (3)$$

wobei Q_F in kW_{th} und T (Aussentemperatur) in $^{\circ}\text{C}$ gehalten sind. Diese Funktion entsteht durch eine Regression des vom Anlagenbauer geschätzten monatlichen Wärmebedarfes mit den historischen Aussentemperaturen. Vereinfachend wird hier davon ausgegangen, dass sich der Wärmebedarf des Fermenters linear zur Aussentemperatur verhält. Die Betrachtung von zeitlich höher aufgelösten Fluktuationen des Wärmebedarfes ist ein zentraler Bestandteil dieser Analyse. Der Wärmebedarf Q_F beinhaltet das Aufheizen des Substrats als auch das Ausgleichen der Transmissionsverluste. Durch die biologischen Reaktionen eingebrachte Wärme ist hier ebenfalls schon (als negativer Wärmebedarf) berücksichtigt. Abbildung 6 zeigt den Wärmebedarf über das gesamte Modelljahr.

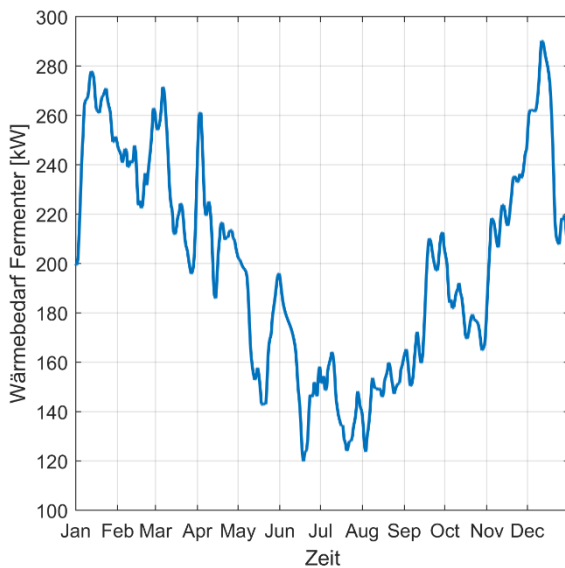


Abbildung 6. Modellierter Wärmebedarf des Fermenters auf Basis von historischen Wetterdaten. Der gesamte Jahresbedarf beträgt $1748 \text{ MWh}_{\text{th}}$ (es ist zu beachten, dass die Y-Achse nicht bei 0 beginnt).

2.2.2 Massenströme und Füllstände

Der Substrateintrag wird aufgeteilt in eine feste und flüssige Fraktion, wobei die feste Fraktion ($\dot{m}_{in,fd}$) direkt in den Fermenter geleitet wird, während die flüssige Fraktion ($\dot{m}_{in,fh}$) zuerst den Wärmetauscher passiert. Die Aufteilung geschieht wie folgt:

$$\dot{m}_{in,fd} = \alpha_F \cdot \dot{m}_{IN,F}, \quad \dot{m}_{in,fh} = (1 - \alpha_F) \cdot \dot{m}_{IN,F} \quad (4)$$

α_F bezeichnet den Masseanteil des Feststoffstromes. Die Massebilanz des Fermenters ist demzufolge:

$$\dot{m}_{IN,F,TOT} = \dot{m}_{in,fd} + \dot{m}_{in,fh} + \dot{m}_{out,ss} \quad (5)$$

Der Pressschneckenseparator teilt die aus dem Fermenter ausgetragene Gärgülle ($\dot{m}_{out,f}$) wiederum auf in einen festen ($\dot{m}_{out,ss}$) sowie einen flüssigen ($\dot{m}_{out,sf}$) Anteil. Dies geschieht ebenfalls nach fixen proportionalen Anteilen:

$$\dot{m}_{out,ss} = \alpha_S \cdot \dot{m}_{out,f}, \quad \dot{m}_{out,sf} = (1 - \alpha_S) \cdot \dot{m}_{out,f} \quad (6)$$

Wie in den Annahmen beschrieben, ist der Füllstand des Fermenters konstant, d.h. folglich auch $\dot{m}_{out,sf} = \dot{m}_{IN,F}$ bei konstanter Dichte. Hier wird die Vereinfachung gemacht, dass das Biogas, welches dem frischen Substrat entnommen wird, vernachlässigt wird. Prozentual wird ca. 2 % der eingehenden Masse über das Biogas abgeführt, weshalb diese Vereinfachung vertretbar ist (Bowman et al., 2022). Zusammen mit (6) kann der Massestrom aus dem Fermenter berechnet werden:

$$\dot{m}_{out,f} = \frac{\dot{m}_{IN,F}}{(1 - \alpha_S)} \quad (7)$$

Eine prozentuale Erhöhung der Rezirkulierung von unvergorenem Material (α_S) bei gleichbleibendem äusserem Substrateintrag ($\dot{m}_{IN,F}$) erhöht dementsprechend den absoluten Durchfluss durch den Fermenter. Andererseits sinkt bei einem gegebenen Fermenterdurchsatz der absolut nötige äussere Substrateintrag mit steigender Rezirkulierung. Der Rezirkulierungsmassefluss ist folgendermassen:

$$\dot{m}_{out,ss} = \frac{\alpha_S}{(1 - \alpha_S)} \dot{m}_{IN,F} \quad (8)$$

Es ist wichtig zu betonen, dass die Rezirkulation der festen Fraktion aus dem Pressschneckenseparator keine zusätzliche Masse ins System bringt oder entfernt (selbiges gilt für die Energieseite, wenn keine Verluste angenommen werden). Weiter gibt es keine Massezu- und abflüsse zwischen Fermenter und Gärgüllelager, folglich $\dot{m}_{IN,G} = \dot{m}_{out,sf} = \dot{m}_{IN,F}$.

Abbildung 7 zeigt den Nettozufluss in das Gärgüllelager über das gesamte Jahr. Abbildung 8 zeigt den Füllstandsverlauf (in m^3) über das gesamte Jahr, zusammen mit den angenommenen Volumina des Gärgüllelagers (3 separate Behälter). Für die weiteren Berechnungen wird davon ausgegangen, dass das Gärgüllelager aus Platzgründen auf $11'000 \text{ m}^3$ begrenzt ist und alle darüber hinaus nötige Kapazität extern angemietet wird. Betrieblich wird der Gärrest aus dem Fermenter immer zuerst in das Gärgüllelager gegeben. Ist dieses voll, wird gleichzeitig dieselbe Menge Gärrest aus dem Lager entfernt und in ein externes Lager überführt.

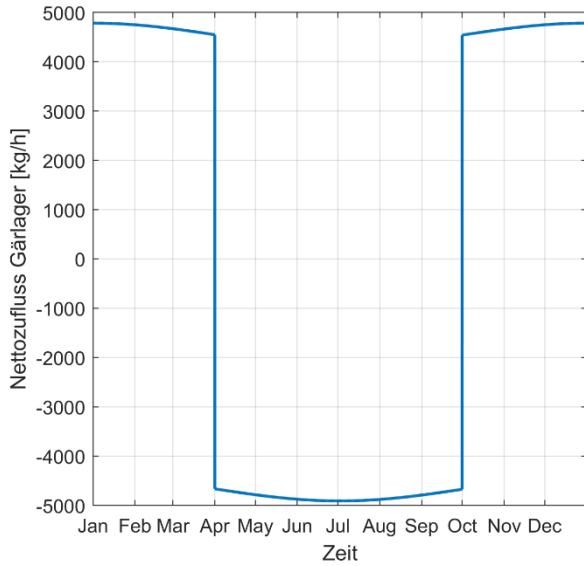


Abbildung 7. Nettozufluss in das Gärgütlelager über das gesamte Modelljahr. Positive Werte entsprechen einem Zufluss in das Gärgütlelager, negative Werte einem Abfluss.

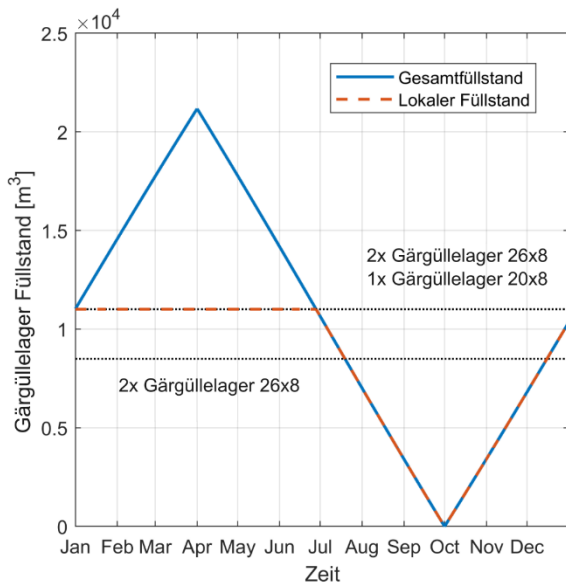


Abbildung 8. Modellierter Füllstand des Gärgütlelagers, in m^3 . Die gepunkteten Linien zeigen die Volumina des Gärgütlelagers an – je nach Konfiguration Nachfermenter/ Gärlager kann diese Zahl unterschiedlich sein. Die rote Linie zeigt den lokal vorhandenen Füllstand (begrenzt durch Lagerkapazität), die blaue Linie den Gesamtfüllstand, welcher sich aus lokaler und externer Kapazität zusammensetzt.

Der Füllstand des Fermenters ist, wie in den Annahmen beschrieben, konstant. Der Füllstand des Gärgütlelagers jedoch schwankt während des Jahres, was eine direkte Auswirkung auf das der Wärmepumpe zur Verfügung stehende Wärmereservoir und damit auch auf die damit verbundene Temperaturveränderung hat. Der Füllstand des Gärgütlelagers wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon(t) = \min \left(1, \varepsilon_0 + \frac{1}{V_G \rho} \int_0^t (\dot{m}_{IN,G} - \dot{m}_{OUT,G}) dt \right) \quad (9)$$

obei ε den Füllstand des Gärgütlelagers (0: Leer, 1: Voll) bezeichnet, ε_0 den Anfangszustand der Simulation (1. Januar), ρ die Dichte der Gärgülle und V_G das Gesamtvolumen des lokal verfügbaren Gärgütlelagers. Die Gleichung (9) korrespondiert zur rot gestrichelten Linie in Abbildung 8.

2.2.3 Wärmeflüsse

Der Wärmefluss \dot{Q}_{HEX} wird von den Temperaturen des frischen Substrats und des Fermenters, der Effizienz des Wärmetauschers, sowie von der Direktbeschickung des Fermenters bestimmt. Die Direktbeschickung eines Teils des eingehenden Substrates hat zur Folge, dass die Massenströme im Wärmetauscher nicht symmetrisch sind, was eine etwas umständlichere Herleitung zur Folge hat. Der Wärmefluss kann auf beiden Seiten definiert werden:

$$\dot{Q}_{HEX} = \dot{m}_{in,fh} \cdot c_p \cdot (T_{in,f} - T_{amb}) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{HEX} = \dot{m}_{out,sf} \cdot c_p \cdot (T_f - T_{in,g}) \quad (11)$$

Mit konstanten Materialeigenschaften kann man diese wie folgt kombinieren:

$$\dot{m}_{in,fh} \cdot (T_{in,f} - T_{amb}) = \dot{m}_{out,sf} \cdot (T_f - T_{in,g}) \quad (12)$$

Da $\dot{m}_{in,fh} < \dot{m}_{out,sf}$ (und $c_p = \varnothing$) kann die Effizienz des Wärmetauschers wie folgt formuliert werden:

$$\eta_{HEX} = \frac{T_{in,f} - T_{amb}}{T_f - T_{amb}} \quad (13)$$

Somit kann die Temperatur der flüssigen Fraktion des frischen Substrates berechnet werden:

$$T_{in,f} = T_{amb} + \eta_{HEX} \cdot (T_f - T_{amb}) \quad (14)$$

Die Kombination von (12) und (14) ergibt die Einlasstemperatur des Gärgütlelagers,

$$T_{in,g} = T_f - \frac{\dot{m}_{in,fh}}{\dot{m}_{out,sf}} \left(\eta_{HEX} (T_f - T_{amb}) \right) \quad (15)$$

während der Wärmefluss \dot{Q}_{HEX} wahlweise über Gleichungen (10) oder (11) bestimmt werden kann:

$$\dot{Q}_{HEX} = \dot{m}_{in,fh} \cdot c_p \cdot \eta_{HEX} \cdot (T_f - T_{amb}) \quad (16)$$

Die Wärmeflüsse mit Bezug zur Wärmepumpe folgen zuerst folgender Gleichung:

$$\dot{Q}_{HP,OUT} = \dot{Q}_{HP,IN} + \dot{W}_{HP} \quad (17)$$

Darüber hinaus wird die Definition des COP (Coefficient of Performance, Arbeitszahl) benutzt:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{HP,OUT}}{\dot{W}_{HP}} \quad (18)$$

Aus Gleichungen (17) und (18) ergibt sich die dem Gärgüllelager entzogene Wärme in Abhängigkeit der dem Fermenter zugeführten Wärme:

$$\dot{Q}_{HP,IN} = \dot{Q}_{HP,OUT} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP} \right) \quad (19)$$

Der COP wird als konstant angenommen. Der Wärmefluss ausgehend von der Zusatzheizung wird als \dot{Q}_{aux} bezeichnet. Die Wärmerückgewinnung aus der Gasaufbereitung \dot{Q}_{ga} wird als konstante Leistung mit wahlweise 12 bzw. 24 kW_{th} Leistung angenommen (siehe Abschnitt 1.3.2).

2.2.4 Zustandsgleichungen

Die Bodenplatte wird als thermisch aktiv betrachtet und zur integralen Wärmekapazität des Gärgüllelagers gezählt. Bei einer Dicke $d = 0.2$ m beträgt das Volumen der Bodenplatte rund 275 m³. Die Wärmekapazität von Beton liegt bei ca. 880 J/(kgK), die Dichte bei 2400 kg/m³. Die thermische Masse der Bodenplatte wird im Folgenden als $(V\rho c_p)_{BP}$ bezeichnet. Es ist spezifisch anzumerken, dass die thermische Masse der Bodenplatte nur ca. 1.5% der thermischen Masse des Gärgüllelagers in vollem Zustand entspricht, im leeren Zustand jedoch erheblich zur numerischen Stabilität der Simulation beiträgt. Die Energiebilanz des Gärgüllelagers kann wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left((V\rho c_p)_{BP} + \varepsilon V\rho c_p \right) T_G & \\ &= \dot{m}_{IN,G} T_{IN,G} c_p \\ &- \dot{m}_{OUT,G} T_G c_p \\ &+ hA(T_{amb} - T_G) - \dot{Q}_{HP} \end{aligned} \quad (20)$$

In Worten gefasst beschreibt Gleichung (20) folgendes: Die Veränderung der internen Energie

des Gärgüllelagers sowie der Bodenplatte wird bestimmt durch die zufließende Enthalpie aus dem Fermenter (via Wärmetauscher), die abfließende Enthalpie durch Gülleentnahme, des Wärmetauschers mit der Umgebung, sowie der durch die Wärmepumpe entzogenen Wärme.

2.3 Programmlogik

Ausgehend von einem bekannten Wärmebedarf (siehe Abbildung 6) wird der Fermenter über eine Kombination der vorgestellten Wärmequellen beheizt. Die Kaskadierung dieser Heizungen erfolgt nach einer Programmlogik: Der vorgegebene Wärmebedarf des Fermenters wird zwingend zu einem Teil vom Wärmetauscher gespiesen. Der verbleibende Wärmebedarf wird danach prioritär von der Wärmerückgewinnung aus der Gasaufbereitung und sekundär von der Wärmepumpe gespiesen, sofern die Gärgülle über der spezifizierten Minimaltemperatur liegt. Der danach noch verbleibende Wärmebedarf muss von einer zusätzlichen Heizung erbracht werden.

Die Wärmepumpe wird über eine einfache Logik gesteuert: Zu jedem Zeitpunkt wird die maximal mögliche Leistung berechnet, welche die Wärmepumpe dem Gärgüllelager während eines Zeitschrittes entziehen könnte, ohne die Temperaturuntergrenze zu verletzen. Ist dieser Wert über der aktuell benötigten Heizleistung, so wird die gesamte Heizleistung von der Wärmepumpe erbracht. Steht nicht genügend Wärme im Reservoir zur Verfügung, nutzt die Wärmepumpe das maximal Mögliche, während der verbleibende Teil mit der zusätzlichen Heizung erbracht wird.

2.4 Standard-Parameter

Für die Simulationen wurden Standardwerte für Parameter angenommen, welche in Tabelle 2 aufgeführt sind. Spezifisch für die Effizienz des Wärmetauschers, den COP der Wärmepumpe, und den Wärmeübergangskoeffizienten Gärlager – Umgebung wurden Simulationen mit abweichenden Werten durchgeführt, um die Sensitivität zu überprüfen. Die Standardwerte stellen aber grundsätzlich relativ konservative Annahmen dar.

Der Wärmeübergangskoeffizienten Gärlager – Umgebung wurde so gewählt, dass der konvektive Wärmeverlust im Winter bei durchschnittlich ca. 30 kW_{th} liegt, was naturgemäss von der Temperatur des Gärgüllelagers abhängt. Diese Werte bewegen sich (skaliert zur Behälteroberfläche) in derselben Grössenordnung wie in der Literatur (Avila-Lopez et

al., 2023; Hreiz et al., 2017), die Vergleichbarkeit ist aber vermutlich relativ komplex. Abbildung 9 zeigt den modellierten konvektiven Wärmeverlust des Gärgüllelagers (Luft & Boden kombiniert) über das gesamte Jahr.

Tabelle 2. Standardwerte für Simulationen. Die Aussentemperaturen basieren auf historischen Wetterdaten von 2021.

Name	Symbol	Wert	Einheit
Minimum Temperatur Gärgüllelager	$T_{G,MIN}$	5	°C
Effizienz Wärmetauscher	η_{HEX}	0.6	-
COP Wärmepumpe	COP	3.5	-
Wärmeübergangskoeffizient Gärgüllelager – Umgebung	h	1	$\frac{W}{m^2K}$
Festfraktion frisches Substrat	α_F	0.3	-
Feststoffrezirkulation	α_S	0.15	

3 Resultate

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, folgt die Programmlogik dem Ablauf, zuerst den Wärmebedarf via Wärmetauscher und Rückgewinnung aus der Gasaufbereitung zu decken, danach via Wärmepumpe, und zuletzt mittels einer zusätzlichen Heizung. Da die Schritte nur in diese Richtung voneinander abhängig sind, werden die Resultate auch in dieser Reihenfolge präsentiert.

3.1 Wärmetauscher & Rückgewinnung Gas-aufbereitung

Der Restbedarf an Wärme für den Fermenter bei einem Wärmetauscherwirkungsgrad von 60 % und einer Rekuperationsleistung der Gaskompression in der Gasaufbereitung von 12 kW wird in Abbildung 10 gezeigt. Es ist anzumerken, dass sowohl Wärmetauschereffizienz als auch Heizleistung der Rekuperation aus der Gasaufbereitung am konservativen Ende der Annahmen zu verorten sind.

3.2 Wärmepumpe & Gärlagertemperatur

Ausgehend vom «reduzierten» Lastgang, welcher in Abbildung 10 gezeigt wurde (Wärmerückgewinnung

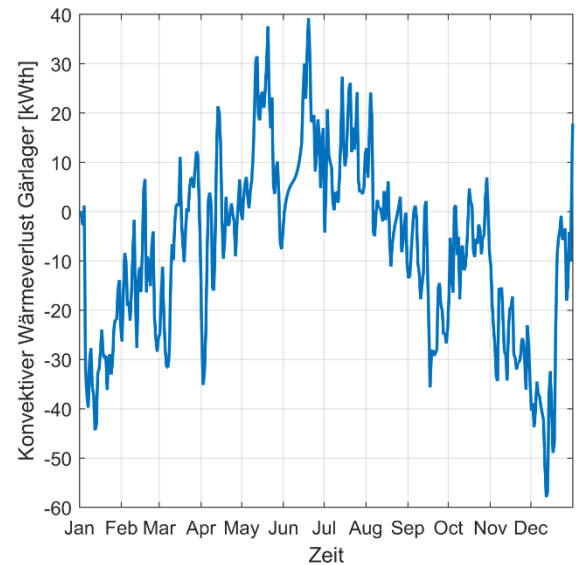


Abbildung 9. Modellierter konvektiver Wärmeverlust (Luft + Boden) des Gärgüllelagers über das gesamte Jahr (Temperaturen von 2021), mit Standardwerten gem. Tabelle 2. Positive Werte entsprechen Wärmetransport in das Gärgüllelager.

via Wärmetauscher plus Rückgewinnung Gaskompression in der Gasaufbereitung) wird eine Wärmepumpe mit $COP = 3.5$ genutzt, um die Restwärme zu liefern, falls das Temperaturniveau des Gärgüllelagers dies zulässt. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Einlasstemperatur des Gärlagers $T_{in,g}$.

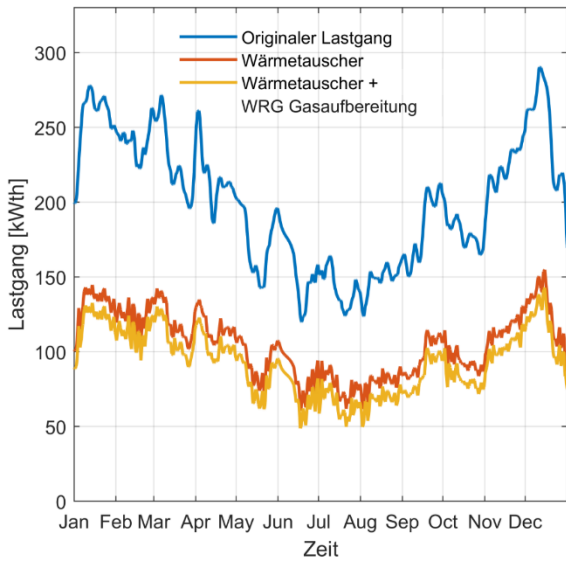


Abbildung 10. Wärmebedarf des Fermenters über das gesamte Jahr. Die blaue Kurve zeigt den originalen Lastgang, sprich den gesamten Wärmebedarf des Fermenters. Die rote Kurve zeigt den verbleibenden Wärmebedarf nach Einbau des Wärmetauschers, die gelbe Kurve zeigt den verbleibenden Wärmebedarf nach zusätzlicher Verwendung der Abwärme aus der Gasaufbereitung. Dies entspricht der notwendigen Leistung, welche die Wärmepumpe bereitstellen muss.

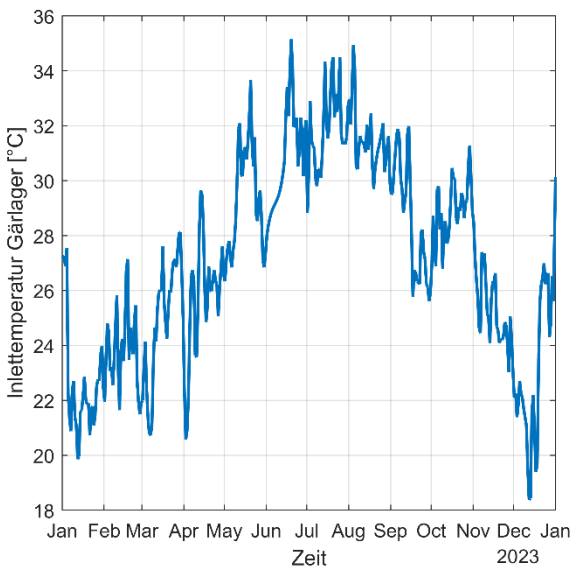


Abbildung 11. Einlasstemperatur des Gärlagers (°C) über das gesamte Jahr. Dies entspricht der Auslasstemperatur der Gärrestseite des Wärmetauschers, da zwischen diesen Punkten kein Rohrwärmeverlust stattfindet.

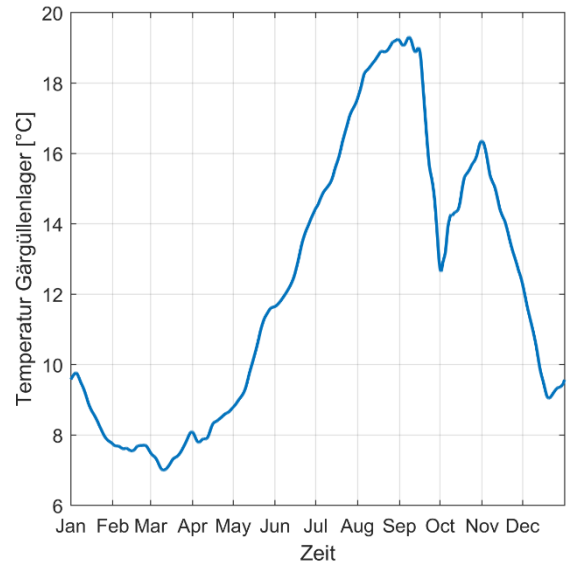
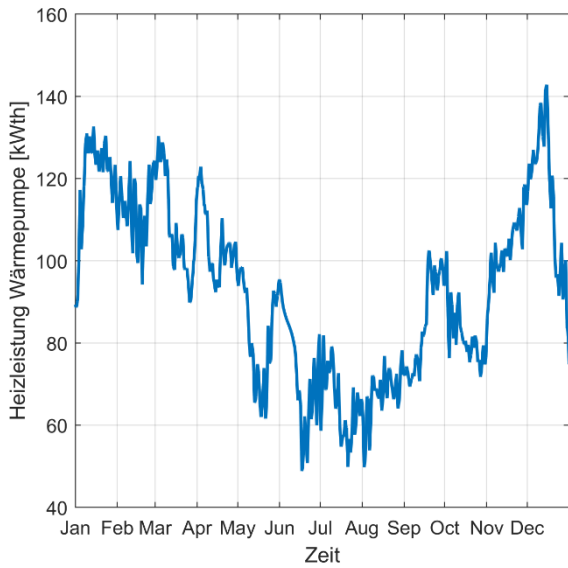


Abbildung 12. Temperaturverlauf des Gärgüllelagers über das gesamte Jahr mit Wärmeentnahme durch die Wärmepumpe. Während der Zeit von Jahreswechsel bis Anfang Juli ist das Lager voll, es finden netto keine Zu- und Abflüsse statt. Per Ende September ist das Lager leer und wird danach wieder gefüllt.

Abbildung 12 zeigt den Temperaturverlauf des Gärgüllelagers über das gesamte Jahr. Der Füllstand des lokalen Lagers ist in Abbildung 8 (rot) ersichtlich. In der ersten Jahreshälfte gibt es keine Netto Massezu- und abflüsse aus dem Lager, da dieses voll ist. Per Ende September ist das Lager leer und wird danach wieder gefüllt. Die Temperatur des Gärgüllelagers fällt zu keinem Zeitpunkt unter das kritische Niveau von 5 °C, daher kann auch die Wärmepumpe konstant arbeiten. Die Anfangstemperatur wird jeweils iterativ bestimmt, sodass per Anfang und Ende Jahr dieselbe Temperatur im Gärgüllelager herrscht. Dadurch wird verhindert, dass ein schlecht gewählter Anfangswert die Ergebnisse verfälscht. Die Heizleistung der Wärmepumpe über das gesamte Jahr ist in Abbildung 13 dargestellt.



Über das gesamte Jahr wird der Heizbedarf von 1748 MWh/a gedeckt aus 826.4 MWh (47.3 %) Wärme-tauscher, 105.1 MWh (6 %) Wärmerück-gewinnung Gaskompression in der Gasaufbereitung, und 814.8 MWh (46.6 %) Wärmepumpe, welche bei einem COP von 3.5 folglich einen jährlichen Strom-verbrauch von 232.8 MWh hat. Abbildung 14 illu-striert die Anteile grafisch. Eine Wärmepumpe mit einer Maximalleistung von 150 kW_{th} kommt unter diesen Bedingungen auf 5432 Vollaststunden.

Abbildung 13. Heizleistung der Wärmepumpe über das gesamte Jahr. Die Wärmepumpe ist zu keinem Zeitpunkt durch den Temperaturgrenzwert des Gärgütlelagers limitiert.

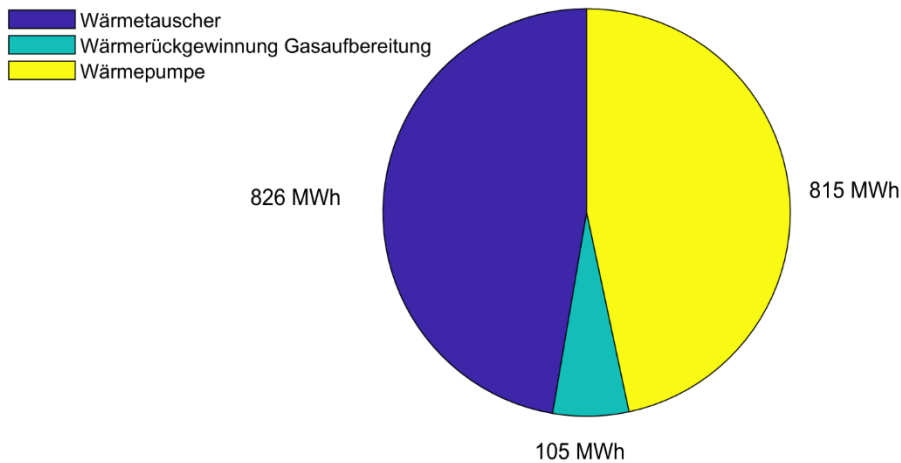


Abbildung 14. Anteile der verschiedenen Heizsysteme an der jährlich benötigten Wärme für die Beheizung des Fermenters.

3.3 Zwischenfazit

Wie im letzten Abschnitt beschrieben, ist die gezeigte Kombination aus Wärmetauscher, Rekuperation aus der Gaskompression in der Gasaufbereitung und Wärmepumpe ganzjährig in der Lage, die benötigte Wärme zu liefern – unter den getroffenen Annahmen und Vereinfachungen. Die Gärлагertemperatur fällt in

diesem Fall nie unter 7 °C, daher besteht auch eine gewisse Sicherheitsmarge. Demzufolge wäre für den Normalbetrieb keine zusätzliche Heizung nötig. Im Folgenden werden für breiter abgestützte Schlussfolgerungen die Sensitivitäten der Annahmen überprüft.

3.4 Sensitivitätsanalyse

Um die Belastbarkeit des Ergebnisses («Keine zusätzliche Heizung nötig im Normalbetrieb») zu überprüfen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Tabelle 3 zeigt die durchgeführten Parametervariationen sowie den jährlich aufsummierten Fehlbetrag nach Nutzung von Wärmetauscher, Wärmerückgewinnung Gaskompression in der Gasaufbereitung, und Wärmepumpe. Dies wäre die nötige Wärmeenergie, welche von einem zusätzlichen Heizsystem zur Verfügung gestellt werden müsste.

In Bezug auf den Gesamtheizbedarf von 1748 MWh/a ist grundsätzlich nur der Wärmeaustausch mit der Umwelt relevant. Unglücklicherweise besteht hier wohl auch die grösste Unsicherheit, da dieser Parameter zum einen relativ einfach modelliert wurde, zum anderen von einigen Faktoren abhängt, hauptsächlich von der spezifischen Bauweise des Gärgütlelagers. Die in Abschnitt 2.4 erwähnte Fachliteratur gibt einen guten Einblick in die mögliche Komplexität dieses Themas. Es ist anzumerken, dass ein Wärmetransferkoeffizient von 10 W/(m²K) als relativ hoch (konservativ) einzustufen ist.

Tabelle 3. Parametervariationen und summierte fehlende Heizenergie ΔQ über das gesamte Jahr pro Variation. Standardwerte sind fett hervorgehoben. Einzige Variationen mit Fehlbeträgen (rot) sind $h = 5$ oder 10 W/(m²K) (Wärmetransferkoeffizient Gärgütlelager – Umwelt) sowie $T_{min} = 9$ °C (Grenzwert Temperatur Gärgütlelager). Die Beträge sind einem Gesamtverbrauch von 1748 MWh/a gegenüberzustellen.

Parameter	Einheit	Variation					
η_{HEX}	-	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	
ΔQ	MWh	0	0	0	0	0	
h	W/(m ² K)	0.1	0.2	0.5	1	2	5
ΔQ	MWh	0	0	0	0	0	89.95
\dot{Q}_{ga}	kW	0	12	24			
ΔQ	MWh	0	0	0			196.58
α_F	-	0.2	0.3	0.4	0.5		
ΔQ	MWh	0	0	0	0		
α_s	-	0	0.15	0.3	0.5		
ΔQ	MWh	0	0	0	0		
COP	-	3	3.5	4	4.5	5	
ΔQ	MWh	0	0	0	0	0	
$T_{min,d}$	°C	3	5	7	9		
ΔQ	MWh	0	0	0	5.09		
d	m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
ΔQ	MWh	0	0	0	0	0	

Bezüglich der benötigten Leistung dieser zusätzlichen Heizung ist es schwierig, eine Aussage zu machen. In allen Simulationen mit Fehlbeträgen wird der Temperaturgrenzwert im Gärgütlelager verletzt, wodurch die Wärmepumpe abgeschaltet wird. Die fehlende Leistung ist in dem Fall jene der wegfallenden Wärmepumpe. Da das Gärgütlelager aber ein thermisches Reservoir mit relativ grosser Trägheit ist, kann im Realfall eine zusätzliche (weit kleiner dimensionierte) Heizung auch schon Tage

oder Wochen vor einer prognostizierten Grenzwertverletzung zugeschaltet werden, wodurch weniger Wärme aus dem Gärgütlelager entnommen werden muss. So kann die Grenzwertverletzung gänzlich verhindert werden. Alternativ ist auch eine Variante denkbar, in der die Wärmepumpe zeitweise die Umgebungsluft oder Abluft aus der Halle als Wärmereservoir nutzt, um eine weitere Abkühlung der Gärgülle zu verhindern oder grundsätzlich einen energetisch sinnvolleren Betrieb zu fahren. Dies ist

mit der Installation eines zusätzlichen Luft/Wasser-Wärmetauschers sowie eines Umschaltventils verbunden.

3.5 Weitere Variationen

Zusätzlich zu den präsentierten Parametervariationen wurde auch eine Variation des Wärmeverbrauchs der Fermenter untersucht. Dies vor dem Hintergrund, dass höhere Verbräuche denkbar sind, falls ein zusätzlicher Fermenter gebaut werden sollte. Das Gärgüllenlager würde in diesem Falle nicht vergrößert. Diese Variation wird kombiniert mit einer Variation des Massedurchsatzes, da sich dieser ebenfalls ändern kann. Durch diese weiteren Variationen sollen Unsicherheiten in den Annahmen abgedeckt sowie eine gewisse Flexibilität des Konzepts demonstriert werden. Tabelle 4 zeigt die jährlich nötige Heizenergie, welche durch eine zusätzliche Heizung bereitgestellt werden müsste, abhängig der jeweiligen Variationskombination.

Zwei Erkenntnisse können aus dieser Untersuchung gezogen werden:

- eine Erhöhung des Masseflusses hat aus energetischer Sicht keinen Einfluss auf den Betrieb (sofern die nötige Heizleistung davon nicht beeinflusst wird)
- eine Erhöhung der nötigen Heizleistung ist problemlos, sofern der Massefluss proportional dazu ansteigt.

Insgesamt ist aber sogar das extremste Ergebnis bei einem jährlichen Heizbedarf von 2'270 MWh/a (1.3x Nominalwert) ohne entsprechenden Massedurchfluss relativ unproblematisch, da es sich bei den fehlenden 25 MWh um nur knapp 1% des jährlichen Heizbedarfes handelt. Zum einen liegt dieser Betrag in der Modellgenauigkeit, zum anderen dürfte das Problem über betriebliche Massnahmen zu lösen sein. Dieses Szenario wäre beispielsweise in einem extrem kalten Jahr denkbar, in welchem die spezifisch nötige Heizleistung pro Massedurchfluss steigt oder bei anderweitig unerwartet hohen Wärmeverlusten.

Tabelle 4. Jährlich fehlende Heizenergie (MWh) bei linearer Skalierung des Masseflusses (1 = 39806 t/a) und Heizleistung (1 = 1748 MWh/a).

		Massefluss				
		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
Heizleistung	0.9	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.1	5.6	0	0	0	0
	1.2	14.6	5.7	0.1	0	0
	1.3	25.0	14.3	5.5	0	0

3.6 Vergleich zu anderen Wärmequellen

Die in dieser Studie gezeigte Kombination von Wärmepumpe, Wärmerecuperation sowie einem Wärmetauscher benötigt jährlich 232 MWh Strom, eliminiert jedoch den Biogas-Eigenverbrauch. Diesem Konzept soll eine Reihe von alternativen Konzepten gegenübergestellt werden, welche den Status Quo und/oder Best Practices reflektieren. Dies sind:

- Eine Gastherme (Effizienz 95%), welche Biogas für die Beheizung des Fermenters konsumiert (Konzept 1). Der Einsatz einer Gasheizung ist für diese Niedertemperatur-Anwendung sehr suboptimal und wird hier nur als Referenzfall aufgeführt.
- Blockheizkraftwerk (BHKW), welches Wärme für die Beheizung des Fermenters liefert und gleichzeitig Strom produziert, der nicht lokal verbraucht wird (bzw. nicht im System der Fermenterheizung). Es wird eine elektrische Umwandlungseffizienz von 30% sowie eine Gesamteffizienz von 90% angenommen (Konzept 2).
- Kombination aus BHKW und Wärmepumpe (Konzept 3). Im Gegensatz zur alleinigen Fermenterheizung durch ein BHKW wird hier der erzeugte Strom zum Betrieb einer Wärmepumpe für die zusätzliche Beheizung des Fermenters mit COP = 3.5 eingesetzt.

- Kombination aus BHKW, Wärmepumpe (siehe Konzept 3) und weiteren Effizienzmassnahmen (Konzept 4). Zusätzlich werden hier eine Wärmerückgewinnung sowie der Substrat/Gärgülle-Wärmetauscher implementiert.

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich auf Jahresbasis zwischen den genannten Systemen sowie dem in dieser Studie betrachteten Konzept. Diese Analyse gibt keine Anhaltspunkte zur Auslastung der jeweiligen Systeme. Beispielsweise wird das BHKW, wenn es mit Wärmetauscher, WRG sowie Wärmepumpe gekoppelt wird (Konzept 4), verhältnismässig wenig Betriebsstunden aufweisen. Trotzdem können durch diese Betrachtung einige interessante Erkenntnisse gewonnen werden.

Der wohl verbreitetste Vergleichsfall der Fermenterheizung mittels BHKW (Konzept 2) zeichnet sich durch einen sehr hohen Gasverbrauch im Umfang von 2775 MWh/a aus, was einem Eigenverbrauch von 30.5 % entspricht – wenn auch bei gleichzeitiger Produktion von 749 MWh/a Strom. Wird der vom BHKW produzierte Strom mittels Wärmepumpe ebenfalls zur Fermenterheizung eingesetzt, so kann die Anlage mit einem Eigenverbrauch von 12.2 % betrieben werden (Konzept 3). Werden zusätzlich die in diesem Bericht beleuchteten Effizienzmass-

nahmen (Wärmerückgewinnung Gaskompression sowie Wärmetauscher) eingesetzt, so sinkt der Eigenverbrauch auf 5.7 % - mit dem Vorbehalt, dass in dieser jahresbasierten Betrachtung jegliche Einschränkungen durch die in diesem Fall hohe Variabilität des Restheizbedarfes (nach den gegebenen Heizleistungen der Effizienzmassnahmen) nicht berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass einzelne Komponenten nur sporadisch zum Einsatz kommen und somit nur wenige Betriebsstunden pro Jahr aufweisen. Dies dürfte aufgrund der technischen Komplexität zu sehr hohen Investitions- und Betriebskosten führen.

Abbildung 16 zeigt den Vergleich der jährlichen Nettoproduktion von Biomethan und Strom für die drei Varianten Gastherme, BHKW, sowie Wärmepumpe + Wärmerückgewinnung + Wärmetauscher. Ausgehend von einer jährlichen Biomethanproduktion von 9.08 GWh (vgl. Tabelle 1) und einem Heizbedarf von 1.75 GWh resultiert für die Variante mit Gastherme eine jährliche Biomethanproduktion von 7.24 GWh, für die Variante mit BHKW eine Biomethanproduktion von 6.31 GWh sowie Stromproduktion von 0.75 GWh, sowie für die hier vorgestellte Variante eine Biomethanproduktion von 9.08 GWh (100 % der Auslegungsmenge) mit einem Stromverbrauch von 0.23 MWh.

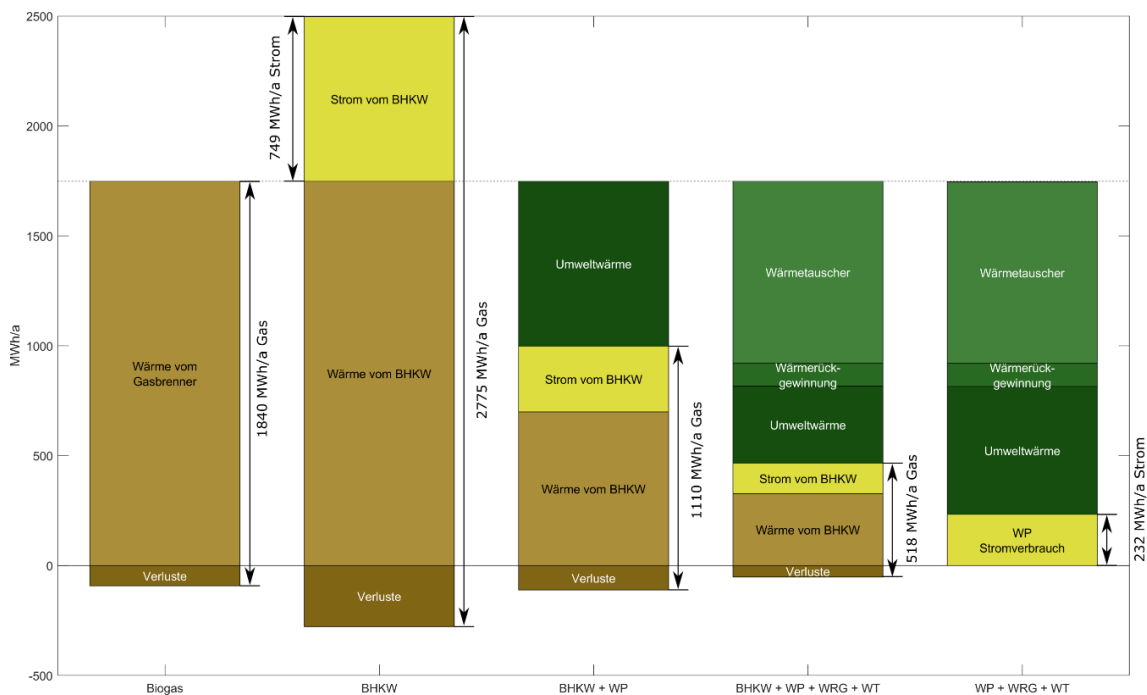


Abbildung 15. Vergleich verschiedener Konzepte zur Fermenterbeheizung. Es besteht ein Jahresheizbedarf von 1748 MWh (gestrichelte Linie), welcher durch die verschiedenen Wärmequellen abgedeckt wird. Die Pfeile rechts der Balken bezeichnen einen Verbrauch, während der Pfeil links des Balkens eine Produktion bezeichnet.

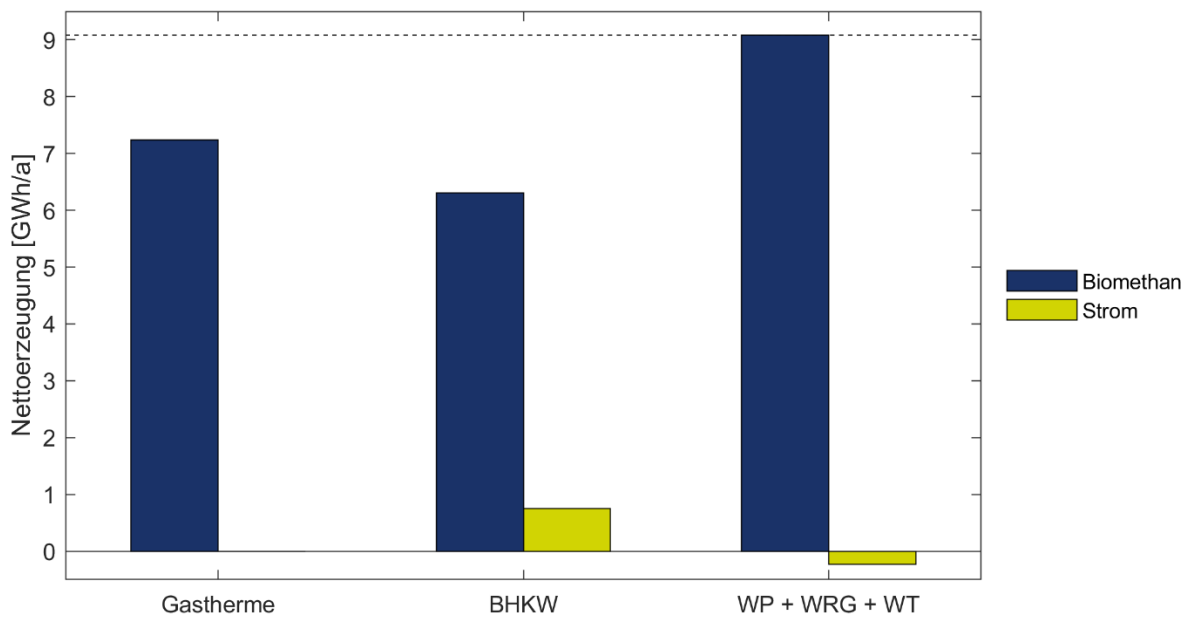


Abbildung 16. Vergleich der jährlichen Nettoproduktion von Biomethan und Strom der geplanten Biogasanlage in Wittenbach unter Verwendung verschiedener Wärmequellen zur Fermenterbeheizung. Ausgehend von einer jährlichen Biomethanproduktion von 9.08 GWh benötigt eine Gastherme (95% Effizienz) 1.8 GWh, während ein BHKW einen Biomethanverbrauch von 2.78 GWh hat – bei gleichzeitiger Produktion von 0.75 GWh Strom. Dagegen benötigt die in dieser Studie untersuchte Kombination von Wärmepumpe, Wärmerückgewinnung in der Gaskompression sowie der Einsatz eines Substrat-Gärgülle-Wärmetauschers kein Biomethan, jedoch Strom im Umfang von 0.23 GWh/a.

4 Fazit

Anhand des Fallbeispiels der geplanten Biogasanlage in Wittenbach wurde ein Energiekonzept für eine direkt einspeisende Biogasanlage erarbeitet, wobei eine innovative Kombination aus Wärmetauscher, Wärmerekuperation, sowie einer Wärmepumpe untersucht wurde. Unter Standardbedingungen (siehe Tabelle 2) ergibt sich eine Situation, in welcher der gesamte Heizbedarf der Fermenter über das gesamte Jahr ausschliesslich durch den Wärmetauscher, die Wärmerekuperation sowie die Wärmepumpe gedeckt werden kann. Die kritische Grösse der minimalen Gärgüllelager-Temperatur (5 °C) wird in diesem Fall nicht verletzt, sondern mit einer Marge von >2 °C eingehalten.

In einer Sensitivitätsanalyse wurden verschiedene Aspekte der Modellierung und Annahmen genauer untersucht, um ihren Einfluss auf die Resultate zu quantifizieren. Dafür wurden ausgewählte Parameter in einem gewissen Rahmen variiert. Es zeigte sich, dass in den meisten Fällen eine beträchtliche Marge vorhanden ist. Problematische Kombinationen zeigten sich vor allem bei hohen Wärmeaustauschen zwischen Gärgüllelager und Umwelt und stark erhöhten Heizbedarfen ohne entsprechend höheren Massedurchfluss. Während das erste Problem (schlecht gedämmtes Gärgüllelager) durch entsprechende Konstruktion verhindert werden kann, ist das zweite Problem (z.B. sehr kaltes Jahr, unerwartete Wärmeverluste) schwieriger zu lösen, wird durch eine gute Dämmung jedoch auch verringert.

Die Simulationen zeigen, dass für den Normalbetrieb der Anlage im hier modellierten Zustand keine zusätzliche Heizung nötig ist, ausgenommen aus Redundanzüberlegungen und für das Anfahren. Die dafür verwendeten Technologien sind jeweils für sich alleine erprobt und werden durch unsere Praxispartner bereits erfolgreich eingesetzt. Die Umsetzung der Biogasanlage in Wittenbach wird umfangreiche Daten liefern, um das hier vorgestellte Modell und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu validieren. Darüber hinaus werden die Feldtests die Möglichkeit geben, diverse Modellparameter zu kalibrieren, welche zum jetzigen Zeitpunkt grossmehrheitlich aus Literaturdaten und konservativ gewählten Abschätzungen bestehen. Es besteht die Absicht, das Modell (nach erfolgter Validierung/Kalibrierung) in einer geeigneten Form der Industrie zur Verfügung zu stellen.

5 Referenzen

- Avila-Lopez, M., Robles-Rodriguez, C., Tiruta-Barna, L., & Ahmadi, A. (2023). Toward thermal autarky for large-scale biogas plants: Dynamic energy modeling for energy efficiency in anaerobic digesters with enhanced multimembrane gasholders. *Fuel*, 339, 126978. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126978>
- BAFU. (2021). *Biogasanlagen in der Landwirtschaft*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Baldé, H., VanderZaag, A. C., Burt, S. D., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Desjardins, R. L., & MacDonald, D. J. (2016). Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology*, 216, 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031>
- BFE. (2021a). *Energieperspektiven 2050+: Exkurs Biomasse*. Bundesamt für Energie (BFE).
- BFE. (2021b). *Energieperspektiven 2050+: Technischer Bericht*. Bundesamt für Energie (BFE).
- BFE. (2023). *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2022—Vorabzug*. Bundesamt für Energie (BFE).
- Bowman, G., Ayed, L., & Burg, V. (2022). Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland in the context of the circular economy. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101273. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101273>
- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R., & Richner, W. (2009). *Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau*. Forschungsanstalt Agroscope Changings-Wädenswil ACW.
- Hreiz, R., Adouani, N., Jannot, Y., & Pons, M.-N. (2017). Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. *Chemical Engineering Research and Design*, 119, 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.007>
- Keel, T., & Scheibler, M. (2022). *Machbarkeitsstudie Bioenergie Wittenbach*. Gemeinde Wittenbach.
- Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*. (2016). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- Ökostrom Schweiz. (2015). *Wärmerückgewinnung aus Gärgülle*. Ökostrom Schweiz.
- Pommer, R. (2019). *Wärmerückgewinnung aus Gülle—Ökonomische Bewertung der Wärmerückgewinnung aus der Gülle in der Schweinezuchtanlage Bortewitz*.
- Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., & Lemm, R. (2017). *Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET*. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Verordnung über die Förderung der Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien (Energieförderungsverordnung, EnFV) vom 1. November 2017*. (2023). SR 730.03.
- VSG Jahresstatistik 2023*. (2023). Verband der Schweizerischen Gasindustrie.
- Zhang, X., Yan, J., Li, H., Chekani, S., & Liu, L. (2014). Energy Saving for Biogas Production and Upgrading – Thermal Integration. *Energy Procedia*, 61, 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.921>

SWEET EDGE

SWEET – "SWiss Energy research for the Energy Transition" – is a funding programme of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE). SWEET's purpose is to accelerate innovations that are key to implementing Switzerland's Energy Strategy 2050 and achieving the country's climate goals. The programme was launched in early 2021 and the funding programme runs until 2032.

SWEET EDGE "Enabling Decentralized renewable GEneration in the Swiss cities, midlands, and the Alps" is a consortium sponsored by the Swiss Federal Office of Energy's "SWEET" programme and coordinated by the University of Geneva's Renewable Energy Systems group and the EPFL Laboratory of Cryospheric Sciences.

EPFL-UNIL Center for Climate Impact and Action (CLIMACT) and University of Geneva's Faculty of Science and Institute for Environmental Sciences (ISE) provide the management and administrative support to SWEET-EDGE.

Contacts

Evelina Trutnevyte
Co-coordinator of the consortium
University of Geneva
evelina.trutnevyte@unige.ch

Michael Lehning
Co-coordinator of the consortium
EPFL
lehning@slf.ch

www.sweet-edge.ch

Authors

Michael Wild, ZHAW Wädenswil
Muriel Siegwart, ZHAW Wädenswil
Nicolas Stocker, ZHAW Wädenswil
Jürg Rohrer, ZHAW Wädenswil

Layout and Design

Flora Dreyer, University of Geneva