

Mikrobiogasanlagen als Klimaschutzmassnahme: Machbarkeitsstudie (Schlussbericht)



Matthias Meier, Lin Bautze, Andreas Gattinger

12.01.2018

Im Auftrag der Bio Suisse

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzbeschrieb Projekt	1
2. Einleitung und Problemstellung.....	2
3. Methodisches Vorgehen	3
3.1 Berechnung Einsparpotenzial Klimagasemissionen	3
3.2 Ökonomische Beurteilung.....	6
4. Einleitung / Problemstellung.....	8
5. Einsparpotenzial an Klimagasemissionen	11
6. Ökonomische Beurteilung	17
7. Diskussion.....	21
8. Literatur.....	23
9. Anhang – Vergleich Mistlagerungsmodell mit Modellierung nach Schweizer Treibhausgasinventar	24
10. Danksagung	25

I. Kurzbeschrieb Projekt

Das von der Bio Suisse initiierte Projekt „Mikrobiogasanlage als Klimaschutzmassnahme: Machbarkeitsstudie“ zielt darauf ab, das Einsparungspotenzial an Klimagasemissionen und die Rentabilität von Mikrobiogasanlagen als mögliche Klimaschutzmassnahme auf Biobetrieben zu bewerten. Eine Mikrobiogasanlage ist hier definiert als eine Kleinstanlage, welche grundsätzlich mit den Hofdüngern eines einzelnen Betriebes betrieben werden kann und somit nicht zwingend auf die Zugabe von Co-Substraten angewiesen ist.

Als implementiertes Beispiel diente hierbei die Mikrobiogasanlage von Niklaus Hari in Reichenbach (CH). Ausgehend von den Produktionsdaten dieser Anlage wurde das Klimaerwärmungspotenzial der Strom- und Wärmeproduktion aus Biogas quantifiziert und mit dem Klimaerwärmungspotenzial der traditionellen Miststocklagerung sowie dem Klimaerwärmungspotenzial von Strom aus Schweizer Strommix und der Gebäudeheizung mit Erdöl verglichen. Zuletzt wurden die Kosten für den Bau, Erhalt und Nutzung der Anlage verifiziert und dem Ertragspotenzial aus der Strom- und Wärmeproduktion gegenübergestellt.

Der hier vorgelegte Abschlussbericht des Projektes gibt Aufschluss darüber, in welcher Grössenordnung das Einsparpotenzial an Klimagasemissionen von Mikrobiogasanlagen liegt und unter welchen Bedingungen Mikrobiogasanlagen für den Landwirt kostendeckend betrieben werden können.

2. Einleitung und Problemstellung

Die direkten Klimagasemissionen der Schweizer Landwirtschaft liegen bei rund 6 Mio. t CO₂-eq. pro Jahr (Bretscher et al., 2014). Davon macht die Lagerung und Aufbereitung von Hofdüngern einen Anteil von rund 18% aus. Die Hofdüngerlagerung trägt damit insbesondere über Methan- (CH₄) und zu einem geringeren Anteil auch über Lachgas- (N₂O) Emissionen, die aus bakteriellen Stoffwechselprozessen entstehen, wesentlich zum Klimaerwärmungspotenzial der Landwirtschaft bei. Emissionseinsparungen während der Hofdüngerlagerung kommen deshalb im Kontext einer Klimafreundlichen Landwirtschaft eine grosse Bedeutung zu.

Die Vergärung von Hofdüngern in Biogasanlagen ist eine anerkannte Klimaschutzmassnahme, da dadurch klimaschädliches Methangas über die Verbrennung in CO₂ umgewandelt wird. Da der Kohlenstoff biogenen Ursprungs ist, ist das so entstandene CO₂ klimaneutral. Gegenüber der herkömmlichen Hofdüngerlagerung in Form von Gülle und Mist entstehen durch die Vergärung von Hofdüngern in einer Biogasanlage insgesamt weniger Klimagasemissionen, vorausgesetzt die Anlage ist dicht. Zusätzlich werden über die Produktion von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien fossile Energieträger ersetzt, was ebenfalls zu einer Reduktion an Klimagasemissionen führt.

Die meisten Biogasanlagen auf Landwirtschaftsbetrieben sind in ihrer Grösse so ausgelegt, dass sie neben dem Hofdünger auch Gärsubstrate aus nicht landwirtschaftlichen Quellen (Nahrungsmittelreste, Grünabfälle von Gemeinden usw.) zuführen müssen, um die Anlage wirtschaftlich betreiben zu können. Diese Substrate werden langsam rar und sind je nach Herkunft umstritten (z.B. importiertes Glycerin). Je nach Grösse der Anlage muss der Hofdünger auch von mehreren Tierhaltungsbetrieben zugeführt werden, um das Produktionspotenzial optimal auszunutzen.

Eine mögliche Alternative stellen Mikrobiogasanlagen dar, also Kleinstanlagen, welche grundsätzlich mit den Hofdüngern eines einzelnen Betriebes betrieben werden können und ohne Zugabe von Co-Substraten auskommen. In der Schweiz existiert u.a. eine solche Anlage in Reichenbach (CH) (<http://www.quh-energie.ch/biogas.html>), entwickelt und gebaut von Niklaus Hari, welche seit 2007 in dieser Form betrieben wird. Gemäss Berechnungen des Erfinders dieser Anlage rentiert seine Mikrobiogasanlage ökonomisch und ökologisch.

Wenn Mikrobiogasanlagen tatsächlich mit den Hofdüngern einzelner Höfe rentabel betrieben werden können, stellt dies ein grosses Klimaschutzpotenzial in der Landwirtschaft dar. Damit erschliesse sich gegebenenfalls eine interessante Fördermöglichkeit für die Schweizer Klimaschutzpolitik.

Um das ökonomische und ökologische Potenzial der Mikrobiogasanlagen zu verifizieren, wurde von Bio Suisse eine unabhängige Studie in Auftrag an das FiBL gegeben. Diese soll das Einsparpotenzial an Klimagasemissionen und Rentabilität der Mikrobiogasanlage in Reichenbach berechnen.

3. Methodisches Vorgehen

3.1 Berechnung Einsparpotenzial Klimagasemissionen

Die Berechnung der Klimagasemissionen aus der Biogasproduktion erfolgte nach einem Ökobilanzansatz. Dabei wurden sämtliche klimarelevanten Emissionen der einzelnen Prozesse innerhalb der Biogasproduktion modelliert und aufsummiert. Das Einsparpotenzial an Klimagasemissionen durch den Betrieb einer Mikrobiogasanlage auf einem Landwirtschaftsbetrieb errechnet sich zum einen aus den Emissionen aus der Hofdüngerlagerung ohne Vergärung in der Biogasanlage abzüglich der Klimagasemissionen, die durch den Bau und den Betrieb der Mikrobiogasanlage entstehen. Zum anderen ersetzen Strom und Wärme aus der Nutzung von Biogas teilweise fossile Energieträger. Die dadurch eingesparten Klimagasemissionen werden zu den Einsparungen aus der Vergärung der Hofdünger gegenüber der herkömmlichen Hofdüngerlagerung addiert, was das Gesamteinsparpotenzial ergibt.

Natürlich hängt das so errechnete Einsparpotenzial stark vom gewählten Vergleichszustand ab. Für die hier gemachten Berechnungen wurden für den Vergleichszustand folgende Annahmen getroffen:

- Vergleichsbasis der Vergärung der Hofdünger in der Mikrobiogasanlage: Lagerung derselben Menge Hofdünger auf Miststock (Stapelmist).
- Vergleichsbasis für die in der Biogasanlage produzierte Strommenge: äquivalente Menge aus dem Schweizer Strommix (inkl. Importstrom) ab Niedervolt-Stromnetz.
- Vergleichsbasis für die in der Biogasanlage produzierte Wärmemenge: äquivalente Wärmemenge aus Heizöl durch Verbrennung in einem 10 kW Heizkessel .

Die Stapelmistlagerung als Vergleichsbasis zur Vergärung stellt in Bezug zum auf diesem Vergleich berechneten Einsparpotenzial an Klimagasemissionen ein konservativer Ansatz dar, da die Methanemissionen aus der Güllelagerung nahezu siebenmal höher sind als jene der Stapelmistlagerung (Bretscher et al., 2017). Folglich ist das Einsparpotenzial bei Betrieben mit Güllelagerung entsprechend höher. Das aus dem Vergleich zur Stapelmistlagerung berechnete Einsparpotenzial kann somit als Minimum betrachtet werden.

Aus bisherigen Klimabilanzen von Biogasanlagen auf Landwirtschaftsbetrieben ist bekannt, dass die vermiedenen Klimagasemissionen aus der Hofdüngerlagerung, insbesondere Methan, der grösste Einflussfaktor sind (Hofmann et al., 2015). Einer detaillierten Modellierung der Klimagasemissionen während der Hofdüngerlagerung kommt deshalb in diesem Kontext eine zentrale Bedeutung zu. Für die Berechnung der Klimagasemissionen während der Mistlagerung wurde für dieses Projekt ein Mistlagerungsmodell entwickelt, welches auf den empirischen Messwerten aus den Arbeiten von Amon (1998) und Amon et al. (2001) beruhen. Im Rahmen dieser Studien

wurden Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen u.a. von Stapelmist über einen Zeitraum von 80 Tagen im österreichischen Alpenraum gemessen. Die klimatischen Bedingungen, unter denen die Messwerte erhoben wurden, stimmen somit gut mit den klimatischen Standortbedingungen der hier bilanzierten Mikrobiogasanlage überein. Aus den Messwerten von Amon (1998) wurden Integralgleichungen abgeleitet, die die Menge an Klimagasemissionen über die Zeit beschreiben. Basierend auf diesen Gleichungen berechnet das Mistlagerungsmodell die Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen in Abhängigkeit der Lagerdauer von Stapelmist. Das Mistlagerungsmodell berücksichtigt, dass während der Jahreszeiten, in denen die Kühe vorwiegend im Stall sind, der Miststock täglich mit einer bestimmten Mistmenge aufgebaut wird. Im Fall der Mistlagerung ohne Betrieb einer Biogasanlage wird der Miststock mehrmals im Jahr während der Mistausbringung wieder abgebaut. Im Fall der Mistlagerung mit Betrieb der Biogasanlage erfolgt der Abbau des Miststocks durch die Vergärung des Mists über die Sommermonate, während der die Kühe auf der Alp sind (vergl. Kapitel 4). Die unterschiedlichen Mistmengen und Lagerzeiten führen zu den unterschiedlichen Emissionsmustern, welche im Mistlagerungsmodell berechnet werden.

Um die Verlässlichkeit der vom Mistlagerungsmodell generierten Werte einordnen zu können, wurden die Klimagasemissionen aus der Mistlagerung auch nach der Methode des Schweizer Treibhausgasinventares berechnet (Bretscher et al., 2017). Diese leitet die Emissionen aus der Hofdüngerlagerung basierend auf der pro Kuh ausgeschiedenen organischen Trockensubstanz ab. Die Menge an organischer Trockensubstanz wiederum wird basierend auf der pro Kuh via Futter aufgenommenen Bruttoenergie berechnet. Die über das Futter aufgenommene Bruttoenergie wird im Schweizer Treibhausgasinventar basierend auf Schweiz-spezifischen Standardwerten abgeleitet.

Beim Vergleich des Mistlagerungsmodells mit der Modellierung nach Schweizer Treibhausgasinventar stellte sich heraus, dass die beiden Modellierungen nur zu vergleichbaren Werten führen, wenn im Mistlagerungsmodell mit Hofdüngermengen gerechnet wird, die basierend auf den Standardwerten nach GRUDAF (Flisch et al., 2009) von der Anzahl auf dem Betrieb gehaltenen Mutterkühe abgeleitet werden. Für die Berechnung der Hofdüngermenge nach GRUDAF wurde ausgehend von den 17 Mutterkühen auf dem Betrieb angenommen, dass jede Kuh pro Jahr ein Kalb hat. Entsprechend wurde zur Mistmenge der Muttertiere noch jene der Kälber dazugerechnet.

Die nach GRUDAF basierend auf dem Tierbestand berechneten Hofdüngermengen lagen deutlich unter jenen Mengen, die vom Betreiber der Mikrobiogasanlage angegeben wurden (siehe folgender Abschnitt). Aus diesem Grund erfolgte die Berechnung des Einsparpotenzials an Klimagasemissionen durch den Betrieb der Mikrobiogasanlage zum einen mit den vom Betreiber angegebenen Hofdüngermengen, zum anderen mit den nach GRUDAF basierend auf dem Tierbestand berechneten Hofdüngermengen. Dabei erfolgte die Berechnung basierend auf den vom Tierbestand abgeleiteten Hofdüngermengen zusätzlich nach einem konservativen Ansatz, indem die

in der Mikrobiogasanlage produzierte Strom- und Wärmemenge proportional an die geringere Hofdüngermenge angepasst wurde.

Da im Aufstallungssystem des hier betrachteten Betriebes Mist und Gülle anfällt, wurde die jährlich anfallende Menge an Vollgülle (401 m³ pro Jahr, Angaben gemäss Betreiber, vergl. Tabelle 1 in Kapitel 4) anhand der Angaben in der GRUDAF (Tabelle 37 (Flisch et al., 2009)) in Mist umgerechnet. Demzufolge entsprechen die 401 m³ Vollgülle einer Mistmenge von rund 362 t. Zusammen mit den zusätzlich anfallenden 25 t Mist (Angaben gemäss Betreiber, Tabelle 1, Kapitel 4) ergibt dies eine total anfallende Mistmenge von 387 t pro Jahr, die im Vergleichsszenario gelagert und ausgebracht werden muss.

Bei der Vergärung des anfallenden Hofdüngers in der Mikrobiogasanlage wird die Gülle ohne Zwischenlagerung in die Biogasanlage eingespeist. Entsprechend entstehen – im Gegensatz zu Mist – durch den Betrieb der Mikrobiogasanlage keine Klimagasemissionen aus der Güllelagerung.

Die Systemgrenze zur Klimabilanzierung der Energiegewinnung aus Biogas in der hier betrachteten Mikrobiogasanlage umfasste folgende Punkte:

- Lagerung des Substrates
- Biogasproduktion im Fermenter
- Umwandlung des Biogas zu elektrischer und thermischer Energie im Blockheizkraftwerk (BHKW)

Nicht in die Systemgrenze einbezogen wurden die Emissionen im Stall (Ammoniak, Lachgas, Methan) und die Emissionen beim Ausbringen der Hofdünger auf dem Feld. Die Emissionen im Stall unterscheiden sich nicht zwischen einem Betrieb, der seinen Hofdünger in einer Biogasanlage vergärt und einem Betrieb, der seinen Hofdünger in Form von Gülle und Mist lagert. Aufgrund der unterschiedlichen Nährstoffzusammensetzung von Gärgülle und normaler Gülle und Mist sind zwar unterschiedliche Emissionsmuster bei der Ausbringung zu erwarten. Trotzdem wurden diese Emissionen hier nicht betrachtet, da diese von zahlreichen Faktoren abhängen (Ausbringungstechnik, klimatische Bedingungen, Zeitpunkt der Ausbringung, Kulturpflanze, die gedüngt wird, etc.), die nicht direkt mit dem Betrieb einer Mikrobiogasanlage in Verbindung stehen.

Unter dem Punkt oben „Umwandlung des Biogas zu elektrischer und thermischer Energie im BHKW“ werden auch die diffusen Methanemissionen aus der Biogasanlage mit eingerechnet. Diese treten beim Fermenter, bei den Rohrleitungen, beim Gasspeicherballon, beim BHKW und beim Gärrestlager auf. Die Höhe dieser Emissionen hängt neben der Wartung einer Biogasanlage auch von deren Konstruktion ab und kann somit zwischen verschiedenen Anlagentypen variieren. Als Datengrundlage zur Abschätzung der diffusen Methanemissionen aus der hier betrachteten Mikrobiogasanlage diente ein Prüfbericht der Firma Oester Messtechnik GmbH in Thun. In diesem

Bericht sind die Messresultate einer etwas grösseren aber ansonsten baugleichen Mikrobiogasanlage in Kirchberg zusammengefasst, die mit demselben BHKW betrieben wird. Gemäss den Angaben im Prüfbericht betragen die jährlichen Methanverluste aus der Anlage rund 3.7 kg CH₄ pro Jahr.

Da die im Prüfbericht ausgewiesene Hochrechnung auf die jährlichen Methanemissionen der Biogasanlage auf einer Einzelmessung beruht und die Messungen die Anlageteile Fermenter, Gasballon und BHKW umfassen, nicht aber die Methanverluste aus dem Gärrestelager, ist diese Zahl mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Um den Einfluss unterschiedlich hoher diffuser Methanemissionen auf das Gesamtergebn abschätzen zu können, wurde die Klimabilanz der Biogasproduktion in verschiedenen Szenarien mit den doppelten, den vierfachen und den halben, der im Prüfbericht ausgewiesenen Methanemissionen berechnet.

Die Daten zur Infrastruktur und zu den Produktionsdaten der hier betrachteten Mikrobiogasanlage wurden durch Befragung von Niklaus Hari, Reichenbach, dem Inhaber und Betreiber der hier vorgestellten Anlage, erhoben. Basierend darauf wurde in der Ökobilanzsoftware SimaPro (Version 8.3) ein Inventar der Mikrobiogasanlage erstellt. Inventardaten zu Baumaterialien und Energieträgern sowie zum BHKW (Hintergrunddaten) wurden der Inventardatenbank Ecoinvent 3.3 (Wernet et al., 2016) entnommen. Ebenso stammen die Inventardaten zur Wärmeproduktion mit Heizöl und zum Schweizer Strommix, welche für die Abschätzung des Reduktionspotenzials an Klimagasemissionen notwendig waren, aus der Ecoinvent-Datenbank.

Die hier betrachtete Mikrobiogasanlage ist so ausgelegt, dass sie ausschliesslich mit den Ausscheidungen der hofeigenen Tiere betrieben werden kann. Um die Gasausbeute und damit die Rentabilität der Anlage zu erhöhen, mischt der Betreiber der Anlage Kaffeetresters aus der Herstellung von Instantkaffee bei. Das Reduktionspotenzial an Klimagasemissionen wurde sowohl für den Betrieb ohne als auch mit Cosubstrat in Form von Kaffeetresters berechnet. Eine Beschreibung der Mikrobiogasanlage und eine Zusammenstellung der wichtigsten Produktionsdaten finden sich in Kapitel 4.

3.2 Ökonomische Beurteilung

Als Ausgangslage für die ökonomische Beurteilung wurde eine bestehende Rentabilitätsberechnung von Niklaus Hari zu der hier betrachteten Mikrobiogasanlage verwendet. Daraus wurden die Kosten für den Bau der Anlage (Material- und Arbeitskosten) und den Betrieb und Unterhalt (Material- und Arbeitskosten) entnommen.

Die Einnahmen aus dem Verkauf von Strom und Wärme wurden in verschiedenen Preisszenarien für Strom und Wärme berechnet.

Dabei wurde von folgenden Preisen ausgegangen:

- Strompreis 1: 54 Rp./kWh → Dies entspricht dem Preis, der mit den aktuell möglichen Fördergeldern pro kWh Strom erwirtschaftet werden kann. Er beinhaltet die kostendeckende Einspeisevergütung gemäss Energieförderungsverordnung¹, EnFV (KEV-Beitrag ab 01.01.2018: 46 Rp./kWh: Grundvergütung [28 Rp./kWh] + Landwirtschaftsbonus [18 Rp./kWh]) und den Stromabnahmepreis mit Ökostromzuschlag (8 Rp./kWh).
- Strompreis 2: 4 Rp./kWh → Dieser Preis entspricht einem Worst-Case-Szenario, wenn der Strom ohne KEV-Beitrag und Ökostromzuschlag verkauft werden müsste.
- Wärmepreis 1: 6 Rp./kWh → Dies ist der aktuelle Preis, den der Betreiber pro kWh Wärme erhält.
- Wärmepreis 2: 10 Rp./kWh → Wärmeverbundpreise liegen im Bereich von 6 bis 15 Rp./kWh, abhängig unter anderem auch von der Anschlussleistung. Der Preis von 10 Rp./kWh entspricht einem mittleren Preisszenario.

Die Wirtschaftlichkeit der Mikrobiogasanlage errechnet sich aus dem jährlichen Finanzertrag der Strom- und Wärmeproduktion abzüglich der jährlichen Abschreibungsrate der getroffenen Investitionskosten und den mit der Anlage verbundenen Betriebs- und Unterhaltskosten. Analog zur Abschätzung des Einsparpotenzials an Klimagasemissionen wurde in der ökonomischen Betrachtung die Rentabilität mit und ohne Einsatz von Cosubstrat betrachtet.

Da Kosten für Bauarbeiten lokal variieren können, wurde in einem weiteren Szenario untersucht, wie stark sich höhere Kosten für den Bau einer Anlage auf die Rentabilität auswirken. Für dieses Szenario wurde von 20% höheren Kosten für den Anlagebau als die auf dem hier betrachteten Betrieb entstandenen Kosten ausgegangen. Auch für dieses Szenario mit höheren Baukosten erfolgte die Berechnung der Rentabilität mit und ohne Einsatz von Cosubstrat.

¹ <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20162947/index.html>

4. Einleitung / Problemstellung

Bei der Mikrobiogasanlage von Niklaus Hari in Reichenbach handelt es sich um eine Biogasanlage, welche in erster Linie mit der Vollgülle und dem Festmist seiner 17 Mutterkühe betrieben wird. Jährlich fallen rund 575 m³ Vollgülle und 25 t Mist an. Der Mist wird verwendet, um die Biogasanlage über den Sommer, wenn die Tiere auf der Alp sind, zu betreiben (ca. 100 Tage). Zur Erhöhung der Gasausbeute werden zusätzlich pro Tag 270 kg Kaffeesatz verdünnt mit 56 m³ Wasser als Cosubstrat beigemischt. Der Kaffeesatz ist ein Abfallprodukt aus der Herstellung von Instantkaffee eines nahegelegenen Verarbeitungsbetriebes.

Die Anlage ist aufgebaut, wie in Abbildung 1 schematisch gezeigt und besteht aus einem Fermenterraum, einer Gärgüllegrube, einem Gasballon zur Speicherung und einem Blockheizkraftwerk (BHKW), verbunden durch ein Rohrsystem.

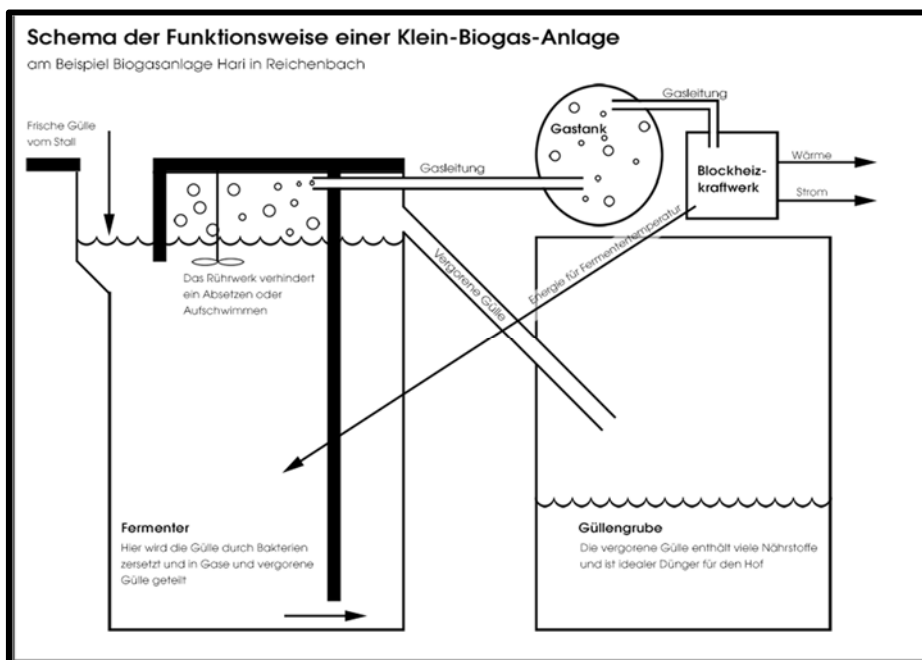


Abbildung 1: Schema der Funktionsweise einer Mikrobiogasanlage (<http://www.quh-energie.ch/biogas.html>).

Gülle, Mist sowie gegebenenfalls das Cosubstrat werden direkt vom Kuhstall in den Fermenterraum eingespeist, nachdem sie mit Wasser verflüssigt worden sind (siehe Abbildung 2). Die jährlich eingesetzten Mengen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Fermenterraum selbst besteht aus Beton (122 m³ Volumen), der durch drei Trennwände in vier Kammern unterteilt ist. Ein Rührwerk sorgt für die Durchmischung der Gärbrühe.



Abbildung 2: Öffnung im Kuhstall für das Einspeisen von Mist, Gülle und Cosubstraten (Bild: Matthias Meier, FiBL)

Tabelle 1. Jährlich zugeführte Inputs und produzierte Strom- und Wärmemengen (Angaben gemäss Betreiber).

Input / Output	Menge	Einheit
Jährlich zugeführte Mistmenge	25	t/Jahr
Jährlich zugeführte Menge Vollgülle unverdünnt	401	m ³ /Jahr
Cosubstrat: jährlich zugeführte Kaffeesatzmenge	99	t/Jahr
Jährlich zugeführte Wassermenge zur Verdünnung	304	m ³ /Jahr
Jährlicher Strombedarf Rührwerk	389	kWh/Jahr
Jährlicher Stromverbrauch Steuerung/Betrieb BHKW	365	kWh/Jahr
Jährlicher Wärmebedarf Fermenter	49'000	kWh/Jahr
Biogas-Jahresproduktion ohne Cosubstrat	15'000	m ³ /Jahr
Biogas-Jahresproduktion mit Cosubstrat	29'000	m ³ /Jahr
Strom-Jahresproduktion brutto ohne Cosubstrat	26'803	kWh/Jahr
Wärme-Jahresproduktion brutto ohne Cosubstrat	63'715	kWh/Jahr
Strom-Jahresproduktion brutto mit Cosubstrat	51'820	kWh/Jahr
Wärme-Jahresproduktion brutto mit Cosubstrat	123'183	kWh/Jahr

Im Fermenterraum wird über einen Zeitraum von 20-40 Tagen aus der zugegebenen Masse Biogas erzeugt, ehemaligen gedeckten Güllegrube gesammelt. Vom Fermenterraum wird das produzierte Biogas in einen oberirdisch liegenden Gasballon (Volumen rund 50 m³) weitergeleitet (siehe Abbildung 3). Für den Gastransport bis zum BHKW benötigt die Anlage keine zusätzlichen Pumpen, da sie einzig durch den Eigendruck funktioniert. Sobald der Ballon eine gewisse Füllhöhe erreicht hat, wird über eine Lichtschranke gesteuert das Biogas an das BHKW geleitet. In dem BHKW (Typ Mephisto G 16 +) werden dann Strom und Wärme produziert (Tabelle 1). Ein Teil des Stroms und der Wärme werden direkt für den Betrieb der Anlage verwendet (Rührwerk, Steuerung BHKW und Beheizung Fermenter). Der restliche Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist. Die überschüssige Wärme wird zur Beheizung von zwei nahe gelegenen Wohnhäusern genutzt.



Abbildung 3: Gasballon für die Biogas-Speicherung (Bild: Matthias Meier, FiBL).

5. Einsparpotenzial an Klimagasemissionen

Ausgehend von den auf dem betrachteten Betrieb verfügbaren Hofdüngermengen können durch deren Vergärung in der Mikrobiogasanlage pro Jahr um die 25 t CO₂-eq. an Klimagasemissionen auf dem Betrieb eingespart werden (Szenario 1 in Tabelle 2, Abbildung 4). Diese Einsparung kommt ohne den Einsatz von Cosubstrat zu Stande. Die Einsparung ergibt sich in erster Linie durch die vermiedenen Emissionen (rund 20 t CO₂-eq.) aus der Hofdüngerlagerung ohne Vergärung in der Mikrobiogasanlage (Abbildung 2). Durch die Nutzung der Abwärme aus dem Betrieb der Mikrobiogasanlage zu Heizzwecken und der damit verbundenen Einsparung an fossilen Energieträgern können pro Jahr immerhin knapp 5 t CO₂-eq. vermieden werden (Tabelle 2). Dagegen werden durch die Stromproduktion in der Biogasanlage im Vergleich zu Strom aus dem Schweizer Strommix tendenziell etwas mehr Klimagasemissionen pro Jahr freigesetzt.

Das Resultat zeigt sich robust gegenüber den Annahmen unterschiedlich hoher diffuser Methanemissionen aus der Biogasanlage (Szenarien 2 bis 4 in Tabelle 2). Auch unter der Annahme der vier-fachen Menge an diffusen Methanemissionen beträgt das Einsparpotenzial nach wie vor rund 25 t CO₂-eq. pro Jahr (Szenario 4 in Tabelle 2). Umgekehrt führt die Halbierung der diffusen Methanemissionen lediglich zu einer Erhöhung des jährlichen Einsparpotenzials von rund 20 kg CO₂-eq. (Szenario 2 in Tabelle 2).

Tabelle 2. Jährliches Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf Betriebsebene ohne Verwendung von Cosubstrat basierend auf Hofdüngermengen gemäss Betreiber.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
	Diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Hälfte der diffusen CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Doppelte diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Vier-fache diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht
Biogasanlage: Klimagasemissionen Stromproduktion pro Jahr [kg CO ₂ -eq.]	2'740	2'728	2'764	2'813
Biogasanlage: Klimagasemissionen Wärmeproduktion pro Jahr [kg CO ₂ -eq.]	808	800	823	852
Biogasanlage Emissionen Mistlagerung vor Beschickung [kg CO ₂ -eq.]	1'825	1'825	1'825	1'825
Total Emissionen Biogasanlage [kg CO₂-eq.]	5'373	5'353	5'412	5'490
Klimagasemissionen Strommix CH [kg CO ₂ -eq.]	2'702			
Klimagasemissionen Wärmeerzeugung aus Erdöl [kg CO ₂ -eq.]	4'627			
Klimagasemissionen Mistlagerung ohne Vergärung [kg CO ₂ -eq.]	23'035			
Total Emissionen Düngerlagerung, Strom- und Wärmeproduktion [kg CO₂-eq.]	30'363			
THG*-Einsparung pro Jahr in [kg CO₂-eq.]	24'990	25'010	24'951	24'873

*THG = Treibhausgase

Da Hofdüngermengen pro Tier variieren können, erfolgte die Berechnung des Einsparpotenzials an betrieblichen Klimagasemissionen auch basierend auf den Richtwerten für den jährlichen Anfall von Hofdüngern aus der GRUDAF (Flisch et al., 2009). Da die Menge an Hofdünger basierend auf diesen Richtwerten für den auf dem betrachteten Betrieb vorhandenen Tierbestand geringer ausfällt, reduziert sich das Einsparpotenzial um knapp 10 t CO₂-eq. auf rund 15 t CO₂-eq. pro Jahr unter der

Annahme, dass kein Cosubstrat eingesetzt wird (Tabelle 3 und Abbildung 4). Hier zeigt sich, dass je höher die Hofdüngermengen pro Tier auf einem Betrieb ausfallen, desto höher ist das betriebliche Einsparpotenzial an Klimagasemissionen. Betrachtet man allerdings das Einsparpotenzial pro Tonne Mist, fallen die Schwankungen relativ gering aus. So liegt unter den klimatischen Bedingungen, wie sie am Standort des betrachteten Betriebes vorherrschen, das Einsparpotenzial pro Tonne Mist bei rund 62 kg CO₂-eq., wenn man die Hofdüngermengen pro Tier nach GRUDAF zu Grunde legt und bei rund 65 kg CO₂-eq. pro Tonne Mist, wenn man die Hofdüngermengen gemäss Angaben des Betreibers berücksichtigt.

Tabelle 3. Jährliches Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf Betriebsebene ohne Verwendung von Cosubstrat basierend auf Hofdüngermengen gemäss GRUDAF.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
	Diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Hälfte der diffusen CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Doppelte diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht	Vier-fache diffuse CH ₄ -Emissionen gemäss Prüfbericht
Biogasanlage: Klimagasemissionen Stromproduktion pro Jahr [kg CO ₂ -eq.]	1'818	1'810	1'835	1'867
Biogasanlage: Klimagasemissionen Wäremproduktion pro Jahr [kg CO ₂ -eq.]	536	531	546	566
Biogasanlage Emissionen Mistlagerung vor Beschickung [kg CO ₂ -eq.]	1'810	1'810	1'810	1'810
Total Emissionen Biogasanlage [kg CO₂-eq.]	4'165	4'152	4'191	4'243
Klimagasemissionen Strommix CH [kg CO ₂ -eq.]	1'793			
Klimagasemissionen Wärmeerzeugung aus Erdöl [kg CO ₂ -eq.]	3'071			
Klimagasemissionen Mistlagerung ohne Vergärung [kg CO ₂ -eq.]	15'287			
Total Emissionen Düngerlagerung, Strom- und Wäremproduktion [kg CO₂-eq.]	20'151			
THG[*]-Einsparung pro Jahr in [kg CO₂-eq.]	15'986	15'999	15'960	15'908

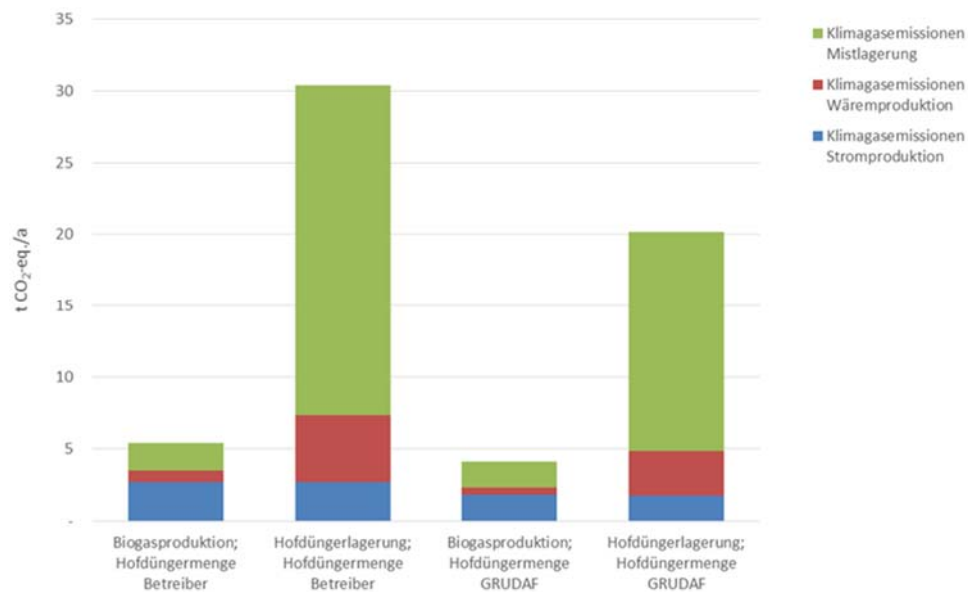


Abbildung 4. Jährliches Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf Betriebsebene ohne Einsatz von Cosubstrat für Hofdüngermengen gemäss Betreiber und Hofdüngermengen gemäss GRUDAF, visualisiert.

Abbildung 5 liefert eine zusätzliche Betrachtungsperspektive auf das Einsparpotenzial an Klimagasemissionen. In dieser Darstellung werden die Emissionen aus dem Betrieb der Mikrobiogasanlage auf eine kWh elektrische Energie bezogen und die vermiedenen Emissionen aus der Düngerlagerung und dem Ersatz fossiler Energieträger als Gutschriften gegenüber gestellt. Da einerseits die produzierte Energiemenge proportional zur in die Anlage zugeführten Hofdüngermenge ist, andererseits auch die Klimagasemissionen aus der Mistlagerung proportional zur gelagerten Mistmenge sind, ist die Menge an CO₂-eq. pro kWh elektrischer Energie unabhängig von der Mistmenge pro Kuh, weshalb hier keine getrennte Betrachtung erfolgt für die vom Betreiber angegebenen Mistmengen auf dem Betrieb und den nach GRUDAF abgeleiteten Mistmengen.

Betrachtet man in Abbildung 5 die Klimagasemissionen bezogen auf eine kWh elektrische Energie, die in der Mikrobiogasanlage ohne Einsatz von Cosubstrat erzeugt wird, zeigt sich, dass verglichen mit einer kWh elektrischer Energie aus dem Schweizer Strommix in der Mikrobiogasanlage doppelt so hohe Emissionen entstehen. Durch die Gutschrift der vermiedenen Emissionen aus der Hofdüngerlagerung und der Gutschrift aus dem Ersatz fossiler Energieträger (Wärmegutschrift) sind unter dem Strich die eingesparten Emissionen pro kWh elektrischer Energie aus der Mikrobiogasanlage aber um rund das Fünf-Fache höher als die Emissionen aus der Stromproduktion. Im Gegensatz zu Abbildung 4, in der die Emissionen aus dem Betrieb der Biogasanlage auf Strom und Wärme gemäss der jeweiligen Energiemenge verteilt wurden, wurden in Abbildung 5 die Gesamtemissionen aus dem Betrieb der Biogasanlage durch die produzierte Strommenge geteilt. Deshalb sind die Emissionen der Stromproduktion

verglichen mit dem Schweizer Strommix in Abbildung 5 wesentlich höher als in Abbildung 4.



Abbildung 5. Entstandene und vermiedene Klimagasemissionen bezogen auf eine kWh elektrische Energie aus der Mikrobiogas-anlage ohne Einsatz von Cosubstrat.

Durch den Einsatz von Kaffeesatz als Cosubstrat mit einem Anteil an der Gesamtbiomasse von rund 20% kann die Gasausbeute nahezu verdoppelt werden. Dadurch steigt auch die jährlich produzierte Strom- und Wärmemenge, was dazu führt, dass das jährliche Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf dem Betrieb auf knapp 44 t CO₂-eq. ansteigt, wenn die Hofdüngermengen gemäss Angaben des Betreibers zu Grunde gelegt werden (Abbildung 6). Werden in der Berechnung die Hofdüngermengen nach GRUDAF zu Grunde gelegt, beträgt das jährliche Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf dem Betrieb rund 28 t CO₂-eq. (Abbildung 4). Bezieht man die Einsparung auf eine Tonne Mist, so liegt das Einsparpotenzial beim Anlagebetrieb mit Cosubstrat zwischen 110 und 113 kg CO₂-eq./t, je nachdem, welche Hofdüngermenge pro Tier in der Berechnung zu Grunde gelegt wird.

Das grössere Einsparpotenzial beim Einsatz von Cosubstrat im Vergleich zum Anlagebetrieb rein mit Hofdünger kommt in erster Linie dadurch zu Stande, dass über die gestiegene Produktion an Abwärme mehr fossile Energie substituiert werden kann. Aber auch die Klimagasemissionen aus der Strom- und Wärmeproduktion fallen leicht geringer aus, weil die Emissionen aus der Herstellung der Infrastruktur auf eine grössere Energiemenge verteilt werden kann.

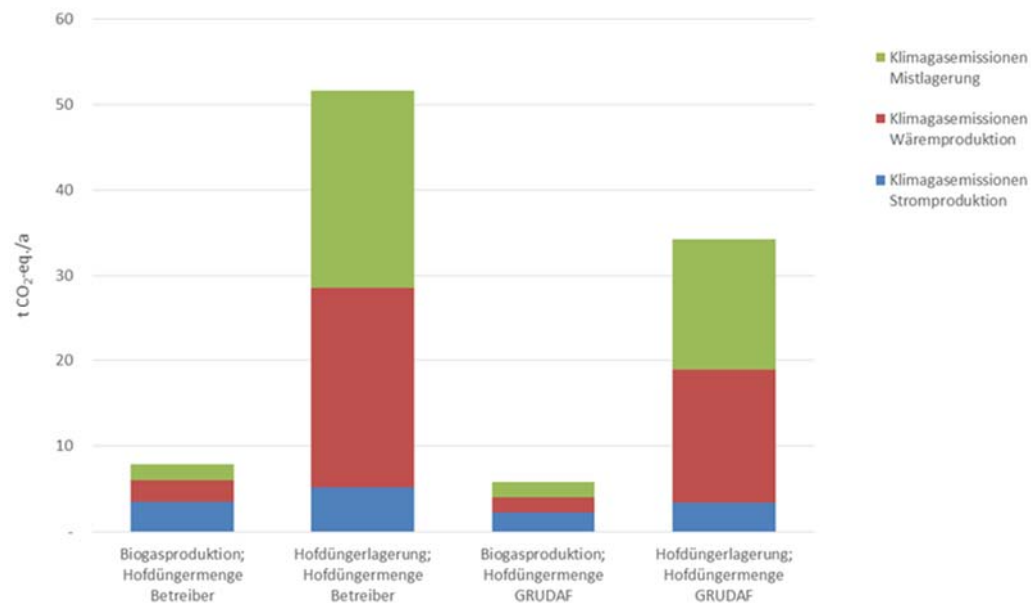


Abbildung 6. Jährliches Einsparpotenzial an Klimagasemissionen auf Betriebsebene mit Einsatz von Cosubstrat.

Bezogen auf eine kWh elektrische Energie fällt das Einsparpotenzial gegenüber einem Verzicht auf den Einsatz von Cosubstrat (Abbildung 5) allerdings etwas geringer aus (Abbildung 7). Obwohl beim Einsatz von Cosubstrat die pro Jahr produzierte Wärmemenge zunimmt, muss diese beim Bezug auf eine kWh elektrische Energie auf eine grössere Anzahl an kWh verteilt werden, da auch die absolut produzierte Strommenge zunimmt. Insgesamt sind die pro kWh elektrische Energie eingesparten Emissionen aus der Mikrobiogasanlage nur noch rund vier Mal so hoch wie die Emissionen aus dem Betrieb der Mikrobiogasanlage (Abbildung 7). Das bedeutet, dass im Betrieb ohne Cosubstrat pro kWh elektrische Energie das günstigere Verhältnis zwischen Klimagasemissionen aus dem Betrieb der Biogasanlage und den eingesparten Emissionen resultiert.

Bezieht man dagegen die Emissionen auf die Gesamtenergie (aus Strom und Wärme), ist das Einsparpotenzial ohne und mit Einsatz von Cosubstrat in Etwa gleich. In beiden Fällen sind die pro kWh eingesparten Emissionen rund fünf Mal so hoch, wie die Emissionen aus dem Betrieb der Mikrobiogasanlage.



Abbildung 7. Entstandene und vermiedene Klimagasemissionen bezogen auf eine kWh elektrische Energie aus der Mikrobiogasanlage mit Einsatz von Cosubstrat.

6. Ökonomische Beurteilung

In Tabelle 4 sind der jährliche Ertrag aus der Strom- und Wärmeproduktion und die jährlichen Kosten der Mikrobiogasanlage für verschiedene Preisszenarien aufgeführt für den Fall, dass die Anlage ohne Einsatz von Cosubstrat betrieben wird. In Tabelle 5 findet sich die analoge Zusammenstellung für den Fall, dass beim Betrieb der Anlage Kaffeesatz als Cosubstrat eingesetzt wird, woraus der höher Strom- und Wärmeertrag resultiert.

Die Investitionskosten für den Bau der Mikrobiogasanlage beliefen sich auf rund 194'450 Franken. Darin enthalten sind Kosten in der Höhe von 4'240 Franken für die Planung (1 Person, 1 Woche Arbeit, 8.5 h pro Tag mit 50 Fr./h Lohnkosten) und für das Baugesuch sowie die Notariatskosten für den Baukredit. Bei der Berechnung der Abschreibungskosten wurde für das BHKW von einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren und für den Fermenter von 20 Jahren ausgegangen.

Der Arbeitsaufwand für Betrieb und Unterhalt der Anlage beträgt jährlich ca. 187 Stunden. Diese wurden mit 50 Fr./h verrechnet. Wird die Anlage mit einem Cosubstrat, wie Kaffeesatz, betrieben, kommt beim Aufwand eine Transportpauschale von ca. 400 Fr. pro Jahr hinzu (Tabelle 5).

Tabelle 4. Erfolgsrechnung der Mikrobiogasanlage ohne Einsatz von Cosubstrat.

Stromjahresproduktion netto [kWh]	26 225			
Wärmejahresproduktion netto [kWh]	14 715			
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Ertrag [CHF]				
Strompreis 1 (54 Rp./kWh)	14 162	14 162		
Strompreis 2 (4 Rp./kWh)			1 049	1 049
Wärmepreis 1 (6 Rp./kWh)	883		883	
Wärmepreis 2 (10 Rp./kWh)		1 472		1 472
<i>Total Ertrag</i>	<i>15 045</i>	<i>15 633</i>	<i>1 932</i>	<i>2 521</i>
Aufwand [CHF]				
Abschreibung BHKW (10 Jahre)	5 137	5 137	5 137	5 137
Abschreibung auf Fermenter (20 Jahre)	7 048	7 048	7 048	7 048
Unterhaltskosten (Rührwerk und BHKW)	514	514	514	514
Arbeitsaufwand Betrieb und Unterhalt	9 350	9 350	9 350	9 350
<i>Total Aufwand</i>	<i>22 049</i>	<i>22 049</i>	<i>22 049</i>	<i>22 049</i>
Jahresergebnis [CHF]	-7 004	-6 415	-20 117	-19 528

Tabelle 5. Erfolgsrechnung der Mikrobiogasanlage mit Einsatz von Cosubstrat.

Stromjahresproduktion netto [kWh]	51 066				
Wärmejahresproduktion netto [kWh]	74 183				
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Ertrag [CHF]					
Strompreis 1 (54 Rp./kWh)		27 575	27 575		
Strompreis 2 (4 Rp./kWh)				2 043	2 043
Wärmepreis 1 (6 Rp./kWh)		4 451		4 451	
Wärmepreis 2 (10 Rp./kWh)			7 418		7 418
<i>Total Ertrag</i>		<i>32 026</i>	<i>34 994</i>	<i>6 494</i>	<i>9 461</i>
Aufwand [CHF]					
Abschreibung BHKW (10 Jahre)		5 137	5 137	5 137	5 137
Abschreibung auf Fermenter (20 Jahre)		7 048	7 048	7 048	7 048
Unterhaltskosten (Rührwerk und BHKW)		514	514	514	514
Arbeitsaufwand Betrieb und Unterhalt		9 350	9 350	9 350	9 350
Transport Cosubstrat		400	400	400	400
<i>Total Aufwand</i>		<i>22 449</i>	<i>22 449</i>	<i>22 449</i>	<i>22 449</i>
Jahresergebnis [CHF]		9 578	12 545	-15 955	-12 988

In den folgenden Tabellen 6 und 7 ist dieselbe Erfolgsrechnung in den 4 Szenarien dargestellt unter der Annahme von 20% höheren Baukosten, was entsprechend die Abschreibung auf den Fermenter entsprechend erhöht. Tabelle 6 zeigt die Erfolgsrechnung für den Fall, dass kein Cosubstrat eingesetzt wird, Tabelle 7 zeigt die Zahlen unter der Verwendung von Cosubstrat.

Tabelle 6. Erfolgsrechnung der Mikrobiogasanlage ohne Einsatz von Cosubstrat unter der Annahme von 20% höheren Baukosten.

Stromjahresproduktion netto [kWh]	26 225				
Wärmejahresproduktion netto [kWh]	14 715				
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Ertrag [CHF]					
Strompreis 1 (54 Rp./kWh)	14 162	14 162			
Strompreis 2 (4 Rp./kWh)			1 049	1 049	
Wärmepreis 1 (6 Rp./kWh)	883		883		
Wärmepreis 2 (10 Rp./kWh)		1 472		1 472	
<i>Total Ertrag</i>	<i>15 045</i>	<i>15 633</i>	<i>1 932</i>	<i>2 521</i>	
Aufwand [CHF]					
Abschreibung BHKW (10 Jahre)	5 137	5 137	5 137	5 137	
Abschreibung auf Fermenter (20 Jahre)	8 356	8 356	8 356	8 356	
Unterhaltskosten (Rührwerk und BHKW)	514	514	514	514	
Arbeitsaufwand Betrieb und Unterhalt	9 350	9 350	9 350	9 350	
<i>Total Aufwand</i>	<i>23 357</i>	<i>23 357</i>	<i>23 357</i>	<i>23 357</i>	
Jahresergebnis [CHF]	-8 313	-7 724	-21 425	-20 837	

Tabelle 7. Erfolgsrechnung der Mikrobiogasanlage mit Einsatz von Cosubstrat unter der Annahme von 20% höheren Baukosten.

Stromjahresproduktion netto [kWh]	51 066				
Wärmejahresproduktion netto [kWh]	74 183				
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Ertrag [CHF]					
Strompreis 1 (54 Rp./kWh)	27 575	27 575			
Strompreis 2 (4 Rp./kWh)			2 043	2 043	
Wärmepreis 1 (6 Rp./kWh)	4 451		4 451		
Wärmepreis 2 (10 Rp./kWh)		7 418		7 418	
<i>Total Ertrag</i>	<i>32 026</i>	<i>34 994</i>	<i>6 494</i>	<i>9 461</i>	
Aufwand [CHF]					
Abschreibung BHKW (10 Jahre)	5 137	5 137	5 137	5 137	
Abschreibung auf Fermenter (20 Jahre)	8 356	8 356	8 356	8 356	
Unterhaltskosten (Rührwerk und BHKW)	514	514	514	514	
Arbeitsaufwand Betrieb und Unterhalt	9 350	9 350	9 350	9 350	
Transport Cosubstrat	400	400	400	400	
<i>Total Aufwand</i>	<i>23 757</i>	<i>23 757</i>	<i>23 757</i>	<i>23 757</i>	
Jahresergebnis [CHF]	8 269	11 236	-17 264	-14 296	

Der erzielte Finanzertrag der Anlage ist stark abhängig vom Biogasertrag der Anlage sowie dem Strom- und Wärmepreis. Der Biogasertrag und damit der Energieertrag der Anlage ist wiederum abhängig von der Nutzung möglicher Cosubstrate, wie z.B. Kaffeesatz. Die Mikrobiogasanlage produziert ohne Cosubstrat netto rund 26'225 kWh Strom und rund 14'715 kWh Wärmeenergie (Tabelle 4). Mit Zugabe von jährlich 99 t Kaffeesatz als Cosubstrat (ca. 20% der Gesamtbiomasse) resultiert ein rund verdoppelter Energieertrag für Strom von 51'066 kWh netto und ein rund fünf Mal höherer Wärmeertrag von 74'183 kWh netto (Tabelle 5).

Unter den betrachteten Szenarien mit den verschiedenen Preisvarianten ist die Anlage nur unter Einsatz von Cosubstrat und dem höheren Strompreis mit den KEV- und Ökostrom-Beiträgen gewinnbringend betreibbar (Tabelle 5). Dabei spielt der Preis für die verkaufte Wärme eine geringe Rolle.

Dasselbe Bild ergibt sich unter der Annahme von 20% höheren Baukosten für den Anlagebau als die auf dem hier betrachteten Betrieb entstandenen Kosten (Tabelle 6 und 7). Nur unter Verwendung von Cosubstrat und dem Strompreis mit KEV- und Ökostrom-Beiträgen ist die Anlage gewinnbringend (Tabelle 7). Im Vergleich zur Erfolgsrechnung mit den geringeren Baukosten (Tabelle 5) fällt der Gewinn pro Jahr rund CHF 1'300 geringer aus. Das entspricht einer Gewinnreduktion von 10 (Szenario 1) bis knapp 15% (Szenario 2) (in Tabellen 5 und 7).

Damit die Mikrobiogasanlage mit Baukosten in der Höhe, wie sie auf dem hier betrachteten Betrieb anfielen, ohne Einsatz von Cosubstrat kostendeckend betrieben werden könnte, müsste unter der Annahme, dass der Preis für eine kWh Wärmeenergie auf 6 Rp./kWh fixiert bleibt, der Strompreis pro kWh mindestens 81 Rp. betragen. Unter Berücksichtigung des höheren Preises für die Wärmeenergie (10 Rp./kWh), müsste der Strompreis für eine ausgeglichene Rechnung mindestens 79 Rp. pro kWh betragen. Besser sieht die Situation unter Verwendung von Cosubstrat aus. Je nach Preis für eine kWh Wärmeenergie müsste der Strompreis mindestens 30 bzw. 36 Rp. pro kWh betragen, damit die Anlage kostendeckend betrieben werden kann.

Geht man von den um 20% höheren Baukosten aus, so müsste der Strompreis für eine kWh mindestens 86 Rp. betragen, damit die Anlage ohne Zugabe von Cosubstrat bei einem Preis für eine kWh Wärmeenergie von 6 Rp./kWh kostendeckend betrieben werden kann. Bei einem Preis für eine kWh Wärmeenergie von 10 Rp./kWh reduziert sich der Mindestpreis pro kWh Strom auf 84 Rp. Wird die Anlage mit Cosubstrat betrieben, müsste der Strompreis für eine kWh unter der Annahme der höheren Baukosten mindestens 38 Rp. betragen, wenn der Preis für eine kWh Wärmeenergie 6 Rp. beträgt. Beträgt der Preis für eine kWh Wärmeenergie 10 Rp. wäre in diesem Fall ein Mindestpreis von 32 Rp. pro kWh Strom für einen kostendeckenden Betrieb erforderlich.

7. Diskussion

Das jährliche Einsparpotenzial an Klimagasemissionen, das durch die Vergärung von Hofdünger in einer Mikrobiogasanlage auf einem landwirtschaftlichen Betrieb mit knapp 20 Kühen anstatt der üblichen Hofdüngerlagerung erzielt werden kann, ist mit rund 16 t CO₂-eq. (Worst Case – ohne Cosubstrat) bis 44 t CO₂-eq. (Best Case – mit Cosubstrat) beträchtlich. Bezogen auf eine Tonne Mist ist die Schwankungsbreite der Einsparung an Klimagasemissionen durch den Betrieb einer Mikrobiogasanlage wesentlich geringer. So liegen die eingesparten Emissionen im schlechtesten Fall bei rund 62 kg CO₂-eq. und im besten Fall bei rund 110 kg CO₂-eq. Durch die Vermeidung der Emissionen aus der Hofdüngerlagerung und die Substitution von fossilen Energieträgern können durch den Betrieb der Mikrobiogasanlage bis zu 85% an Klimagasemissionen eingespart werden. Diese Grössenordnung für das Einsparpotenzial deckt sich mit anderen, ähnlichen Untersuchungen (Esfandiari et al., 2011; Hofmann et al., 2015).

Im Rahmen der hier getätigten Berechnungen wurden die jährlichen Klimagasemissionen auf Ebene des Gesamtbetriebes zwar nicht abgeschätzt. In Schader et al. (2014) wurden jedoch für einen durchschnittlichen Schweizer Milchbetrieb im Berggebiet jährliche Klimagasemissionen von rund 5 t CO₂-eq./ha berechnet. Ausgehend von der Grösse des hier betrachteten Betriebes von 22 ha betragen die jährlichen Klimagasemissionen des Gesamtbetriebes rund 110 t CO₂-eq. In Bezug auf diese betrieblichen Gesamtemissionen bedeutet der Betrieb einer Mikrobiogasanlage eine Reduktion in der Grössenordnung von mindestens 20%. Im Vergleich zu anderen Klimaschutzmassnahmen auf Betriebsebene ist diese Massnahme äusserst effizient. Die in Schader et al. (2014) analysierten betrieblichen Klimaschutzmassnahmen bewirkten eine Reduktion der gesamtbetrieblichen Emissionen von weniger als 1 bis knapp 6%. Die Umsetzung aller 13 analysierter Massnahmen resultierte in einem theoretischen Reduktionspotenzial von rund 20% und kommt damit auf dieselbe Grösse zu liegen, wie das Reduktionspotenzial der Mikrobiogasanlage. Ein weiterer Vorteil der Mikrobiogasanlage ist, dass durch diese Klimaschutzmassnahme keine Ertragsreduktion zu erwarten ist, die die Produkt-bezogene Klimabilanz des Betriebes verschlechtern würde.

Als weiteres Produkt aus der Biogasherstellung entsteht ein hochwertiger Dünger mit einem hohen Anteil an pflanzenverfügbarem Stickstoff. Auf Biobetrieben kann der Einsatz von Gärgülle deshalb je nach Kultur (z.B. Getreide) unter Umständen auch zu einer Ertragssteigerung führen, was die Produkt-bezogene Klimabilanz des Betriebes sogar verbessern würde. An dieser Stelle ist allerdings auch kritisch anzumerken, dass auf Biobetrieben der Einsatz von Gärgülle den für die Bodenfruchtbarkeit wichtigen Kohlenstoffinput via Hofdünger reduziert und dieser fehlende Kohlenstoff aus dem Hofdünger über andere Mittel kompensiert werden muss. Die Problematik besteht insbesondere für Betriebe mit einem hohen Anteil an Ackerfläche. Insofern würde sich der Betrieb einer Mikrobiogasanlage in erster Linie für Biobetriebe mit ausgedehnter Grünlandbewirtschaftung eignen.

Ökonomisch betrachtet ist eine Mikrobiogasanlage nur mit entsprechenden Förderbeiträgen auf den Strompreis kostendeckend und gegebenenfalls gewinnbringend zu betreiben. Eine zentrale Stellgrösse für den rentablen Betrieb ist aber auch das Zuführen von Cosubstrat, welches im Vergleich zu einer ausschliesslich mit Hofdünger betriebenen Anlage zu substantiell höheren Strom- und Wärmemengen führt. Entsprechend reduziert sich der für den rentablen Betrieb notwendige Strompreis erheblich und damit auch die notwendigen Förderbeiträge. Geht man von einem durchschnittlichen Stromabnahmepreis (ohne Förderbeiträge) von 4 Rp. pro kWh aus, so müssen die Förderbeiträge je nach Höhe der Baukosten einer Mikrobiogasanlage und dem Verkaufspreis für die Wärmeenergie zwischen 75 und 85 Rp. pro kWh Strom liegen, um eine Anlage ohne Zugabe von Cosubstrat kostendeckend betreiben zu können. Wird die Anlage zusätzlich zur Hofdüngerbiomasse mit rund 20% Cosubstrat betrieben, sind Förderbeiträge je nach Höhe der Baukosten der Mikrobiogasanlage und dem Verkaufspreis für die Wärmeenergie von 25 und 35 Rp. pro kWh Strom für einen kostendeckenden Betrieb notwendig.

Sowohl in Bezug auf das Einsparpotenzial an Klimagasemissionen als auch in Bezug auf die Rentabilität einer Mikrobiogasanlage kommt der Verwendung von Cosubstrat eine Schlüsselstellung zu. Durch die Beigabe von ca. 20% an Cosubstrat zum Hofdünger steigt die Produktivität einer Mikrobiogasanlage beträchtlich, was zu einer höheren Einsparung an Klimagasemissionen und höheren Einnahmen für Strom und Wärmeenergie führt. In Bezug auf die Nachhaltigkeit einer Mikrobiogasanlage im weiteren Sinne ist in diesem Zusammenhang natürlich entscheidend, was für ein Cosubstrat verwendet wird und wie weit dieses transportiert werden muss. Abfallprodukte aus der lokalen Lebensmittelindustrie sind diesbezüglich von Vorteil.

Vor dem Hintergrund, dass der Betrieb einer Mikrobiogasanlage nicht nur erneuerbare Energie bereitstellt, sondern auch einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz in der Landwirtschaft leisten kann, bieten die im Rahmen dieses Projektes getätigten Berechnungen eine wichtige Faktenbasis, um die Diskussion um entsprechende Förderinstrumente und Vorgaben für den Betrieb von Mikrobiogasanlagen neu zu lancieren.

8. Literatur

- Amon, B., 1998. NH₃-, N₂O- und CH₄-Emissionen aus der Festmistandbindehaltung für Milchvieh. Stall - Lagerung - Ausbringung. Institut für Land-, Umwelt und Energietechnik. Universität für Bodenkultur, Wien, p. 182.
- Amon, B., Amon, T., Boxberger, J., Alt, C., 2001. Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 103-113.
- Bretscher, D., Heldstab, J., Rihm, B., Rogiers, N., Schächli, B., Sommerhalder, M., Stettler, C., Weber, F., 2017. Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2015. National Inventory Report - Including reporting elements under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment FOEN, Climate Division, Bern, Switzerland, p. 623.
- Bretscher, D., Leuthold-Stärfl, S., Felder, D., Fuhrer, J., 2014. Treibhausgasemissionen aus der schweizerischen Land- und Ernährungswirtschaft. *Agrarforschung Schweiz* 5, 458-465.
- Esfandiari, S., Khosrokhavar, R., Sekhvat, M., 2011. Greenhouse gas emissions reduction through a biogas plant: A case study of waste management systems at FEKA dairy farm. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. IPCBEE, Singapore, pp. 455-448.
- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R., Richner, W., 2009. GRUDAF 2009 - Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* 16, 1-97.
- Hofmann, F., Weddige, U., Blumenstein, B., Möller, D., Grieb, B., Mäder, R., Zerger, U., Gerlach, F., 2015. Biogasanlagen im Ökolandbau. Projektbericht im Auftrag der FNR. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V., p. 324.
- Schader, C., Jud, K., Meier, M.S., Kuhn, T., Oehen, B., Gattinger, A., 2014. Quantification of the effectiveness of greenhouse gas mitigation measures in Swiss organic milk production using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production* 73, 227-235.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22, 1218-1230.

9. Anhang – Vergleich Mistlagerungsmodell mit Modellierung nach Schweizer Treibhausgasinventar

Tabelle 8 zeigt die Klimagasemissionen aus der Lagerung von Mist von 17 Mutterkuhkühen und 17 Kälbern über ein Jahr, zum einen berechnet nach dem Mistlagerungsmodell, zum anderen nach der Modellierung aus dem Schweizer Treibhausgasinventar. Die vierte Spalte zeigt die Klimagasemissionen berechnet nach der Modellierung nach Treibhausgasinventar inkl. der Faktoren aus der Unsicherheitsanalyse nach Variante 1 (siehe: (Bretscher et al., 2017)). Die Modellierung nach Treibhausgasinventar erfolgt auf der Basis einer Kuh bzw. eines Kalbes. Die Berechnung berücksichtigt die Emissionen aus der Mistlagerung für 17 Mutterkühe und 17 Mutterkühkälber. Das Mistlagerungsmodell verwendet für die Berechnung der Emissionen aus der Mistlagerung direkt die Menge Mist von 17 Mutterkühen und 17 Mutterkühkälbern und berechnet die Menge an Emissionen nicht über die Anzahl Tiere.

Tabelle 8. Klimagasemissionen aus Mistlagerung berechnet nach verschiedenen Varianten.

	Mistlagerungsmodell	Modellierung nach Treibhausgasinventar	Treibhausgasinventar, obere Unsicherheitsgrenze
	[kg CO₂-eq./a]	[kg CO₂-eq./a]	[kg CO₂-eq./a]
Mutterkühe		7'013	21'310
Mutterkühkälber		1'255	3'652
Total	21'056	8'267	24'961

Der Modellvergleich zeigt, dass die Emissionen, berechnet nach dem Mistlagerungsmodell, unterhalb der oberen Grenze des Unsicherheitsbereiches nach Schweizer Treibhausgasinventar liegen. Somit sind die Berechnungen nach den beiden Modellansätzen vergleichbar.

Da die empirischen Daten, die dem Mistlagerungsmodell zu Grunde liegen (Amon, 1998), unter ähnlichen klimatischen Bedingungen erhoben wurden, wie sie auf dem hier betrachteten Betrieb vorherrschen und die Lagerzeiten der zum Miststock zugeführten Mistmengen viel genauer berücksichtigt, ist das Mistlagerungsmodell für die in diesem Bericht durchgeführte Analyse besser geeignet.

10. Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei der Bio Suisse für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes bedanken. Bedanken möchten wir uns auch bei Christoph Fankhauser für die Projektbegleitung von Seiten der Bio Suisse. Einen besonderen Dank richten wir an Niklaus Hari für die angenehme Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Informationen zu seiner Mikrobiogasanlage.