

Umweltwirkungen und ökonomische Machbarkeiten der bisherigen Projektergebnisse in der Biogasbranche

Treibhausgasemissionen

Berichtszeitraum 2020

Gefördert von:



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère du Développement durable
et des Infrastructures



Laufzeit des Projektes: 2016 – 2020

Autoren:

Katharina Laub

Manuel Trapp

IZES gGmbH Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme

Altenkessler Str. 17

66115 Saarbrücken

Tel.: +49-(0)681-8449720

Saarbrücken, den 31.12.2020

Inhalt

1	Einleitung.....	5
1.1	Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft	5
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	5
1.3	Methodik	7
1.3.1	Vorbemerkung	7
1.3.2	Methodische Grundlagen der ökobilanziellen Bewertung	8
1.3.3	Betrachtete Emissionen und Wirkungsabschätzung	8
1.3.4	Untersuchte Ansätze	9
2	Ökologische Bewertung von Algen.....	9
2.1	Einflussfaktoren	10
2.2	Systemgrenze	10
2.3	Ergebnis	11
3	Ökologische Bewertung der Wasserstoffintegration	12
3.1	Einflussfaktoren	12
3.2	Systemgrenze	13
3.3	Ergebnisse	14
4	Ökologische Bewertung von Gärrest.....	16
4.1	Einflussfaktoren	16
4.2	Definition der Szenarien	17
4.2.1	Systemgrenze	17
4.3	Ergebnisse	20
5	Diskussion und Fazit	21
	Literaturverzeichnis.....	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Wirkbereiche von Biogas	7
Abbildung 2 Systemgrenze Algenproduktion.....	10
Abbildung 3 Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Algenproduktion - Klimawandel.....	12
Abbildung 4 Systemgrenze Untersuchung 1 (Referenzszenario)	13
Abbildung 5 Systemgrenze Untersuchung 2	14
Abbildung 6 Ergebnisse Ökobilanzierung Untersuchung 1	15
Abbildung 7 Ergebnisse Ökobilanzierung Untersuchung 2	16
Abbildung 8 Systemgrenze im Referenzszenario Rohgülle	17
Abbildung 9 Systemgrenze im Szenario Vergärung Rohgülle	18
Abbildung 10 Ergebnisse der Ökobilanz für die beiden Szenarien - Klimawandel.....	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungskategorie Klimawandel	9
Tabelle 2 Charakteristik des Eingangsstoff Rinderrohgülle.....	18
Tabelle 3 Charakteristik von Gärreste	19

1 Einleitung

Das Projekt Persephone diversifiziert das Produktportfolio der Biogasproduktion und analysiert die technischen und einzelbetrieblichen Möglichkeiten einer Refinanzierung von Biogasanlagen abseits des Strom- und Wärmemarktes, auf den Biogas häufig reduziert wird. Die Nutzung von Biomasse zur Gewinnung von Energie hat direkte positive Auswirkungen für das Klima, wenn dadurch fossile Energieträger verdrängt werden. Jedoch gibt es im laufenden Betrieb von Biogasanlagen häufig noch Optimierungspotenziale, die jedoch im Falle einer Umsetzung dazu führen, dass der biogasbasierte Strom insbesondere im Bereich des Klimaschutzes und des Ressourcenverbrauchs eine deutlich bessere Umweltwirkung aufweist insbesondere unter Berücksichtigung der Ziele der RED II¹ (Anlagenspezifische Mindestschwellenwert). Diese Optimierungspotenziale von Biogasanlagen durch alternative Verwertungen von Strom, Wärme, Gärrest und der Untereinbeziehung von indirekten Systemdienstleistungen sind das Kernthema von Persephone.

1.1 Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft trägt maßgeblich zur Produktion klimaschädlicher Gase bei. Der landwirtschaftliche Sektor emittierte 2018 in den EU- 28 Staaten insgesamt rund 394 Mio. t Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten (UBA, 2020). Insbesondere Methan- Emissionen aus der Tierhaltung und Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen sind wesentliche Quellen (siehe Deutschland CH₄ und N₂O Emissionen 7% der Gesamtemissionen (DBV, 2020)). Der Biogassektor bietet das Potenzial, die globalen Treibhausgasemissionen um 10- 13% zu reduzieren und kann so entscheidend zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 beitragen (WBA, 2019). Im Vergleich zu fossilen Brennstoffen ergibt sich ein THG- Emissionsminderungspotenzial für die Produktion und Nutzung von Biogas von bis zu 240% und Biomethan von bis zu 202%, in Abhängigkeit von den verwendeten Rohstoffen und der Technologie (Giuntoli et al., 2017). Die Methanemissionen in der Tierhaltung können durch die anaerobe Vergärung der in der Tierhaltung anfallenden Mengen an Gülle und Mist in Biogasanlagen signifikant reduziert werden. Das anschließend erzeugte Gärprodukt kann industriell erzeugte Mineraldünger, welche einen hohen Einsatz fossiler Energieträger benötigen, ersetzen und die damit verbunden Emissionen reduzieren (WBA, 2019). Ein weiterer Vorteil gegenüber Mineraldünger besteht in der verstärkten Kohlenstoffspeicherung im Boden bei der Ausbringung von Gärresten (WBA, 2019). Die weiteren Emissionsreduktionspotenziale durch Biogas entstehen bei der Produktion der Hauptprodukte (Strom/ Wärme) und dem damit verbundenen Ersatz fossiler Energieträger.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Bei einer Lebenszyklusanalyse werden alle Emissionen, die über den Lebensweg der Biomasse entstehen, ausgenommen der direkten Emissionen bei der finalen Nutzung (die direkten Emissionen entsprechen der in der Biomasse photosynthetisch gebundenen CO₂-Menge), zusammengerechnet und auf eine funktionale Einheit allokiert (hier 1 MJ). Je nach Inputsubstrat ergeben sich in der Vorkette der Anbaubiomasse durch Stickstoffdüngemittel und Treibstoffe für Bodenbearbeitung, Ernte und Logistik sensitive Einflussgrößen. Bei effektiven Klimaschutzmaßnahmen (siehe Schuler et al. 2014) ist davon auszugehen, dass zukünftig auch in den Vorketten spezifisch geringere Emissionen zu erwarten

¹ RED II - Erneuerbare-Energien- Richtlinie (2018/2001); (EU, 2018)

sind. Die THG-Minderung in den Vorketten ist abhängig von der Entwicklung des Treibstoffmixes aber auch vom Einsatz und der Herkunft von Düngeprodukten. Diese Entwicklungen lassen sich derzeit noch nicht absehen.

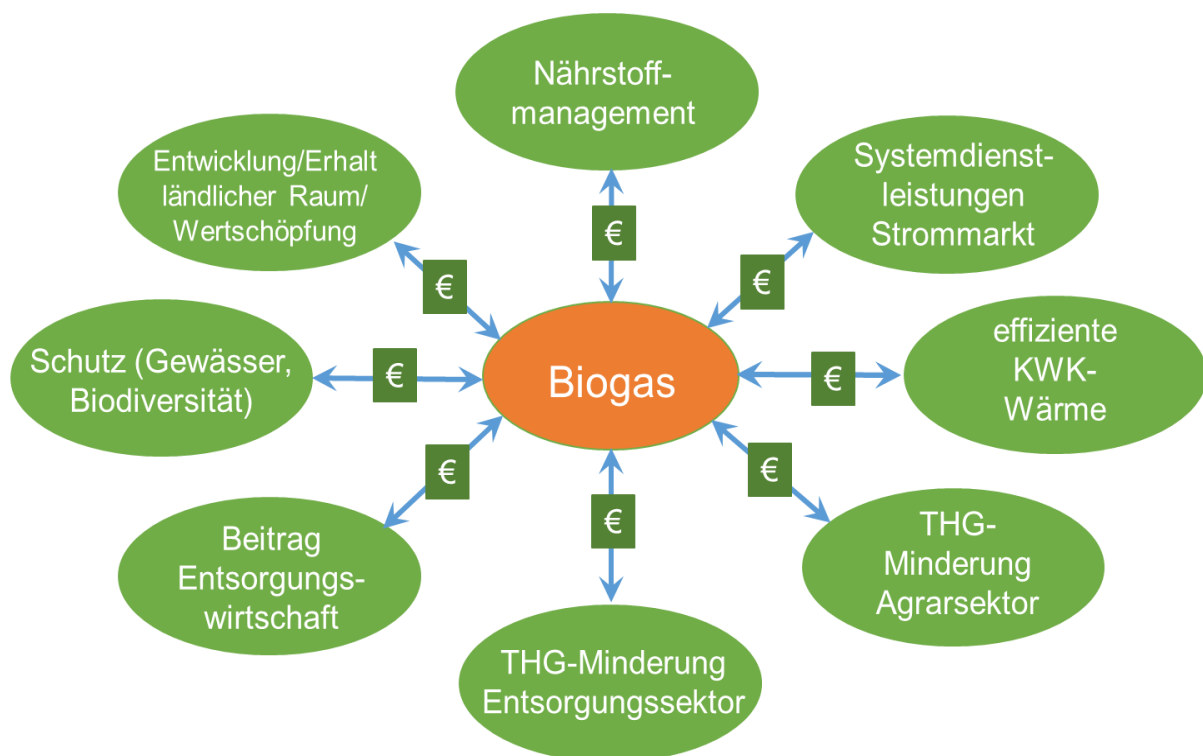
In Bezug auf die Nutzung von landwirtschaftlichen Wirtschaftsdüngern (Gülle und Mist) ist zu bedenken, dass diese bei einer konventionellen (d.h. offenen) Lagerung sowie bei einer konventionellen Ausbringung diffuse Methan- und Lachgasemissionen abgeben. Da Methan eine 23-fach höhere Klimawirksamkeit (Global Warming Potential - GWP) und Lachgas ein GWP von 265 besitzen, haben selbst geringe Emissionen dieser beiden Klimagase einen großen Effekt auf die THG-Bilanz. In beiden Fällen wird bei der Verwertung der Reststoffe über den Biogasprozess sichergestellt, dass die Reststoffe die längste Zeit in einem gasdichten Raum verweilen (Fermenter) und so die Emissionen deutlich reduziert werden können. Zudem verringern sich durch die gasdichte Lagerung und Verwertung von flüssigen und festen tierischen Exkrementen die Ammoniakemissionen.

Die vorangegangenen Aktionen 3 bis 6 zielen darauf ab, das Produktportfolio der Biogasproduktion zu diversifizieren sowie die Evaluation der technischen und einzelbetriebswirtschaftlichen Möglichkeiten einer (i) In-Wert-Setzung von Wirtschaftsdüngern, einer (ii) Integration der Algenkultivierung, einer (iii) Einbeziehung von Wasserstoff in die Biogasproduktion sowie (iv) einer In-Wertsetzung von Ökosystemdienstleistungen und deren Vorteile für die Wasserwirtschaft.

In Aktion 7 werden die vorangegangenen Aktionen hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Klimaschutz sowie mögliche volkswirtschaftliche Auswirkungen analysiert. Ziel der Aktion 7 ist eine Überprüfung der ökologischen Nachhaltigkeit von zusätzlichen Produktentwicklungen der Biogasanlagen im Sinne der Bioökonomie. Somit sollen letztendlich positive Effekte für strukturschwache ländliche Räume entwickelt werden.

Die nachfolgende Grafik (siehe Abbildung 1) beschreibt die unterschiedlichen Wirkbereiche von Biogas. Dieser Bericht untersucht das konkrete Treibhausgasminderungspotenzial der in Persephone behandelten unterschiedlichen Diversifizierungsmöglichkeiten von Biogas.

Abbildung 1 Wirkbereiche von Biogas



Ziel ist es, die Bedeutung der Biogasanlagen bzgl. des Klimaschutzes in der Großregion herauszuarbeiten. Aufbauend auf den Arbeiten im Projekt OptibioGaz mit der alleinigen Konzentration auf die Biogasproduktion zur Energieerzeugung haben sich daraus die folgenden Fragestellungen entwickelt, die in Persephone innerhalb verschiedener Szenarien untersucht wurden:

- 1) Bietet die Integration einer Algenproduktion in die Biogasanlage einen Vorteil hinsichtlich des Klimaschutzes? Es wird simuliert, dass die in Biogasanlagen entstehenden Produkte Wärme, Strom und CO₂ in der Algenraffinerie verwendet werden. Systemgrenze ist in diesem Fall der Fermenter bzw. die Raffinerie.
- 2) Wie wirkt sich die Integration von Wasserstoff in der Biogasanlage auf die Ökobilanz der Biomethanproduktion hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und der kumulierten Energiebilanz aus? Dabei werden unterschiedliche Aufbereitungsverfahren für Biomethan miteinander verglichen. Systemgrenzen sind hierbei die Produktion von Biogas und die Verwertung des Biomethans in einer Gastherme, einem existierenden BHKW und in einem neu gebauten BHKW.
- 3) Wie ist der Einsatz von Gärresten gegenüber Mineraldünger und Gülle bei der Düngung hinsichtlich des Klimaschutzes zu bewerten?

1.3 Methodik

1.3.1 Vorbemerkung

Die ökologische Bewertung eines Produktes oder Prozess basiert auf der Bestimmung der relevanten Stoff- und Energieströme, die durch die Bereitstellung des Produktes und des dazugehörigen Prozesses ausgelöst werden. Die Ökobilanz betrachtet den Lebenszyklus eines Produktes und die damit

verbundenen Umweltwirkungsaspekte. Die Ökobilanz beinhaltet zudem auch andere Dienstleistungen die von dem untersuchten Prozess erbracht werden. Die LCA umfasst die Rohstoffgewinnung, Produktion, Anwendung sowie die Beseitigung, im Englischen wird dieser Ansatz als „cradle to grave“ beschrieben (Hofmann et al., 2015).

1.3.2 Methodische Grundlagen der ökobilanziellen Bewertung

Ziel der Ökobilanzierung im Projekt Persephone ist die Ermittlung der klimawirksamen Emissionen für die drei Untersuchungsschwerpunkte (Substitution Mineraldünger durch Gärprodukte, Integration Algenerzeugung in die BGA, Integration von Wasserstoff in der BGA). Zudem werden die möglichen Einflussgrößen auf die Ökobilanz identifiziert, sodass zum Schluss Empfehlungen zur klimaschonenden Biogasproduktion gegeben werden können.

Zur Analyse der Umweltauswirkungen in den verschiedenen Szenarien mit dem Ziel, außergewöhnliche Umweltbelastungen zu identifizieren, wurde das Instrument Life Cycle Assessment (LCA) verwendet. Dieser Ansatz wurde gemäß der im ILCD „Handbook for LCA“ [EC JRC 2010, 2010] und der [DIN EN ISO 14040/DIN EN ISO 14044] beschriebenen Methodik durchgeführt. In dieser Europäischen Norm werden die generellen Anforderungen an jede LCA definiert. Das Ziel des LCA-Ansatzes wurde bereits innerhalb der Forschungsfrage in Kapitel 1 definiert. Die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevante Wirkungskategorie ist der Klimawandel. Andere Wirkungskategorien wie z.B. Eutrophierung, Versauerung, Landnutzung oder Humantoxizität werden im Rahmen des Projektes Persephone nicht betrachtet, da die Datenverfügbarkeit und – Konsistenz zur vollständigen Erfassung aller Prozesse nicht detailliert genug waren, um Auswertungen der weiteren Kategorien durchzuführen. Die Treibhausgasemissionen für die 3 verschiedenen Untersuchungsschwerpunkte werden mit der Software Umberto berechnet. Die gewählte Wirkungskategorie konzentriert sich auf das globale Treibhausgaspotenzial, daher konzentriert sich die Berechnung auf die Emissionen von u.a. CO₂- Kohlendioxid, CH₄- Methan und N₂O- Stickstoffmonoxid mit einem angewandten Zeithorizont von 100 Jahren (Smith et al., 2007; Amon et al., 2004). Die unterschiedliche Klimawirkung der Gase wird durch die Darstellung der CO₂-Äquivalente berücksichtigt. Sämtliche klimarelevanten Emissionen der einzelnen Prozesse werden im Rahmen der Ökobilanz bestimmt, aufsummiert und zur Veranschaulichung in CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde elektrische Energie dargestellt. Zur Bewertung der Umweltauswirkungen in den Szenarien wurde die Bewertungsmethode ReCiPe (Goedkoop et al., 2008) gewählt, die in der ecoinvent-Datenbank (ecoinvent, 2013) implementiert ist. Im Rahmen der Definition der Szenarien und der Beschreibung der Behandlungsprozesse wird der Umfang dieser Analysen in den jeweiligen inhaltlichen Kapiteln näher beschrieben.

1.3.3 Betrachtete Emissionen und Wirkungsabschätzung

Um die Wirkung der unterschiedlichen wirksamen Treibhausgasemissionen einer Biogasanlage besser einschätzen zu können, werden sie in CO₂-Äquivalente (CO₂äq) pro funktionelle Einheit umgerechnet (Smith et al., 2007). Die Berechnung der Umweltauswirkungen wurde mit den in Tabelle 1 aufgeführten Charakterisierungsfaktoren für den Klimawandel durchgeführt. Methan ist 25-mal klimawirksamer als CO₂, deshalb wird zur Berechnung der CO₂-Äquivalente jede Tonne Methan mit dem Faktor 25 multipliziert. Distickstoffmonoxid dagegen ist 298-mal klimawirksamer als CO₂ (Hofmann et al. 2015).

Tabelle 1 Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungskategorie Klimawandel¹

EMISSION	CHARAKTERISIERUNGS FAKTOR	EINHEIT
KOHLENSTOFFDIOXID, CO ₂	1	kg CO ₂ eq
METHAN, CH ₄	25	kg CO ₂ eq
DISTICKSTOFFMONOXID, N ₂ O	298	kg CO ₂ eq

1.3.4 Untersuchte Ansätze

Für die Integration von Wasserstoff und die Produktion von Algen werden eigene Berechnungen bzgl. der Einsparung von CO₂ –Äquivalenten (z.B. CO₂ oder CH₄) anhand der konkreten Beispielsanlagen erarbeitet. Die funktionale Einheit der Berechnungen ist ein Megajoule (MJ), bezogen auf den oberen Heizwert des Biogases (für die Bereiche Algen und Wasserstoff) bzw. die Nährstoffwirkung für den Bereich des Düngemanagements. Im Bereich der Verwertung organischer Dünger liegen bereits Literaturwerte bzw. Werte aus anderen Projekten vor (INEMAD², Optibiogaz³). Die geplante Analyse beschreibt die Auswirkungen des Düngemanagements auf den Klimaschutz.

2 Ökologische Bewertung von Algen

Mikroalgen sind ein potenzielles zukünftiges Rohmaterial für z.B. Transportkraftstoffe. Zudem liefern Algen nützliche und wertvolle Nebenprodukte in verschiedenen Formen (z.B. Biomasse oder Tierfutter), die das Potenzial bieten Umweltbelastungen zu reduzieren (siehe Interreg-Projekt ALG-AD⁴). Obwohl zahlreiche groß angelegte, kommerzielle Algenzuchtanlagen sowie Ernte- und Verarbeitungsanlagen weltweit existieren, werden die meisten für die Produktion von hochwertigen Lebensmittelzusätzen und nicht für kostengünstige Transportkraftstoffe verwendet (Passell et al., 2013). Daten über Algenanbau, Erntemöglichkeiten und Technologien dieser kommerziellen Anlagen sind schwer zu erhalten. Außerdem sind viele neue Technologien noch in der Erprobungsphase wie z.B. die Umwandlung in Biodiesel. Aufgrund dessen wurde in dieser Analyse auf Literatordaten zurückgegriffen. Zudem sind all diese Vorteile stark abhängig von der Algenart und der Algenkultivierung. Demzufolge werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Algenkultivierungsprozess nachfolgend dargestellt.

¹ Quelle: Eigenschaften Faktoren für Klimawandel (Goedkoop et al., 2008)

² INEMAD – Improved Nutrient and Energy Management through Anaerobic Digestion (FP7) <https://www.izes.de/de/projekte/inemad-improved-nutrient-and-energy-management-through-anaerobic-digestion>

³ Optibiogaz – Optimierte und integrierte Verfahren zur Biogaserzeugung in der Landwirtschaft (Interreg IV-A) <https://www.izes.de/de/projekte/optibiogaz-optimierte-und-integrierte-verfahren-zur-biogaserzeugung-der-landwirtschaft>

⁴ ALG-AD – Creating value from waste nutrients by integrating algal and anaerobic digestion technology. <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/alg-ad-creating-value-from-waste-nutrients-by-integrating-algal-and-anaerobic-digestion-technology/>

2.1 Einflussfaktoren

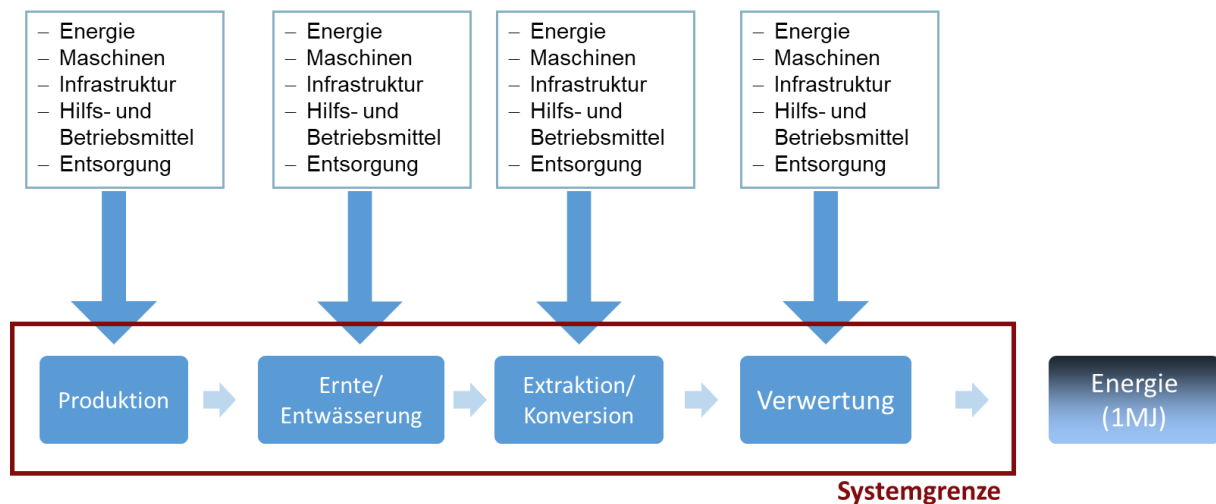
Bei der ökologischen Bewertung der Algenproduktion sind die Ergebnisse abhängig von folgenden Faktoren:

- Ertrag, TS-Gehalt, Biogasertrag, Nährstoffgehalte
- Produktionsprozess
- Spezifizierung der Anlage
offen oder geschlossen, Kollektor, Schlauch, etc. Materialbedarf
- Herkunft der Rohstoffe (Input)
- CO₂-Aufnahme, elektrische und thermische Produktionsenergie
- Beschreibung der Algenintegration
- Behandlung Nebenprodukte der Biogaserzeugung inkl. Algenproduktion

2.2 Systemgrenze

Das untersuchte System umfasst Algenkultivierung, Ernte und Entwässerung, Algenölextraktion, und die Verwertung. Abbildung 2 zeigt die einzelnen Prozesse, die in jedem dieser Lebenszyklusstadien enthalten sind. Der Transport von Materialien wurde von der aktuellen Analyse ausgeschlossen, ebenso Materialien und Energie, die mit dem Bau der Infrastruktur zusammenhängen, blieben unberücksichtigt. Die Referenzeinheit bzw. funktionelle Einheit ist definiert als 1 MJ Biogas (vgl. Abschnitt 1.3.4).

Abbildung 2 Systemgrenze Algenproduktion



Produktion

Mikroalgen können in offenen Laufbahnen oder in Photobioreaktoren kultiviert werden. Innerhalb dieser Analyse wurden die weiter verbreitete Kultivierung der Algenart *Nano cloris sp.* und *Nano cloropsis* in offenen Laufbahnen analysiert.

Ernte/ Entwässerung

Die Algen werden aus den Produktionsteichen bei einer Ertragsrate von ca. 10% des Teichvolumens/Tag entnommen. Eine Zentrifuge reduziert die Lösung zu einer Paste mit ca. 20%

Trockenmasse. Die betrachtete Algenproduktivität entspricht den derzeit im Entwicklungsstadium befindlichen Anlagen mit einer niedrigen Algenernte von etwa 3g/m²/Tag im jährlichen Durchschnitt.

Extraktion/ Konversion

Die Paste mit 20% Trockenmasse dient als Input im Extraktionsverfahren. Der Prozessschritt der Extraktion umfasst die Vorbereitung, Extraktion, Lösungsmittelrückgewinnung, Ölabscheidung, Bandfilterpresse und die Trocknung.

Verwertung

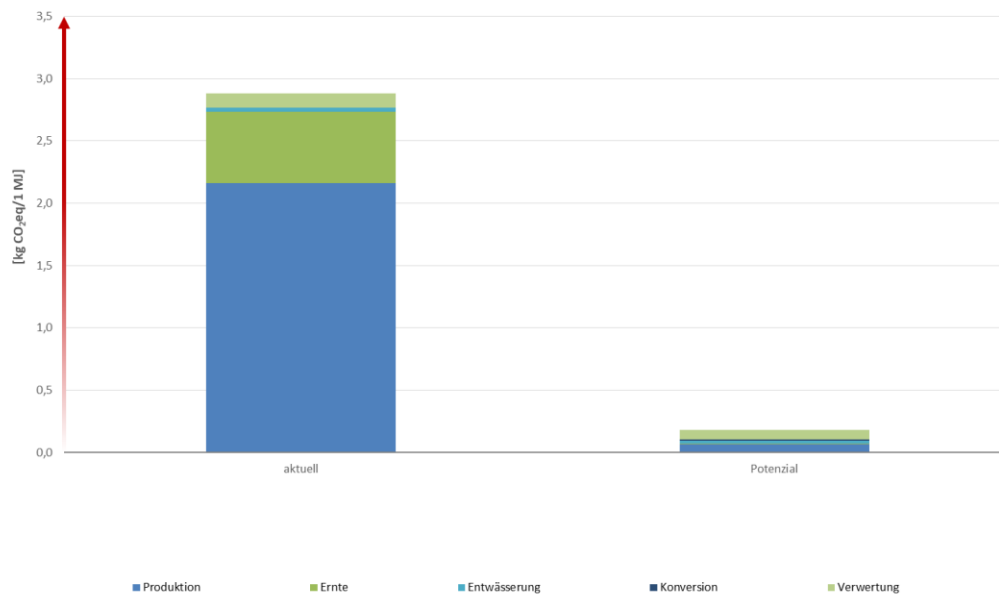
Die in der LCA angenommene Verwertung umfasst die Aufbereitung des Algenöls zu Biodiesel.

Während des Algenkultivierungsprozesses fallen in zwei Prozessschritten Nebenprodukte an und zwar bei der Gewinnung des Algenöls (Ölkuchen) sowie bei der Umwandlung des Öls in Biodiesel (Glycerin) welche im Rahmen von Gutschriften mitberücksichtigt werden.

2.3 Ergebnis

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die aktuelle Produktion von Treibstoffen aus Algen unter Berücksichtigung der Verwendung von Diesel innerhalb des Produktions- und Ernteprozesses (Säule 1) sehr schlecht abschneidet und sehr hohe Treibhausgasemissionen (z.B. Beheizung) entstehen. Die zweite Säule zeigt das Potenzial durch die Kombination einer Algennutzung und einer Biogasanlage. Die geringeren Emissionen entstehen sowohl durch die Nutzung des Biogases in der Algenproduktion (z.B. Beheizung) als auch durch die Nutzung der Nebenprodukte aus der Algenproduktion in der Biogasanlage. Aufgrund des ausbaufähigen Biomasseertrags in der Algenproduktion ist durch den technologischen Fortschritt langfristig mit geringeren Emissionen pro funktionelle Einheit zu rechnen. In Säule 2 sind technologischer Fortschritt und die Nutzung erneuerbarer Energieträger berücksichtigt und im Vergleich der beiden Säulen ist ein hohes Potenzial in den Bereichen Produktion und Ernte zu erkennen.

Abbildung 3 Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Algenproduktion - Klimawandel



Die Ergebnisse zeigen, dass signifikante Verbesserungen und Effizienzsteigerungen in der Algenproduktion notwendig sind damit sie zu einem konkurrierenden Rohmaterial werden können. Die Integration von Biogas kann eine solche Verbesserung darstellen (Passell et al., 2013; Collett et al., 2015). Die zukünftige Betrachtung mit verbesserten Wirkungsgraden bietet ein Reduktionsminderungspotenzial über alle Prozessschritte hinweg obwohl auch im Zukunftsszenario mehr Energie zur Herstellung von Algenbiodiesel benötigt wird. Die Ergebnisse sowohl im Basisfall als auch im Zukunftsfall stellen eine optimalste Lösung in Bezug auf die Auswirkungen dar. Ein zukünftiger Durchbruch der Algenkultivierung zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs gelingt nur durch eine Optimierung der Anbau und Erntemethoden, die Integration erneuerbarer Energien (Biogas, PV oder Solarthermie, etc.) während der Produktion, einer höheren Biomasseproduktivität, höhere Ölausbeute und einem verbesserten Nährstoffrecycling. In einer umfänglichen Ökobilanz müssen zukünftig neben der Treibhausgasbilanz auch andere Auswirkungen berücksichtigt werden, wie z. B. Versauerung, Eutrophierung, Humantoxizität und Ökotoxizität sowie Auswirkungen von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen und der Wasserverbrauch (Passell et al., 2013; Collett et al., 2015).

3 Ökologische Bewertung der Wasserstoffintegration

Die Kombination von CO₂ und Wasserstoff und die Umwandlung zu Methan (Power-to-gas) erfährt eine wachsende Aufmerksamkeit. Die Power-to-Gas (PtG)-Technologie besteht darin, Strom zu nutzen, um Wasser durch Elektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln und anschließend Methan aus Kohlendioxid und Wasserstoff zu synthetisieren.

3.1 Einflussfaktoren

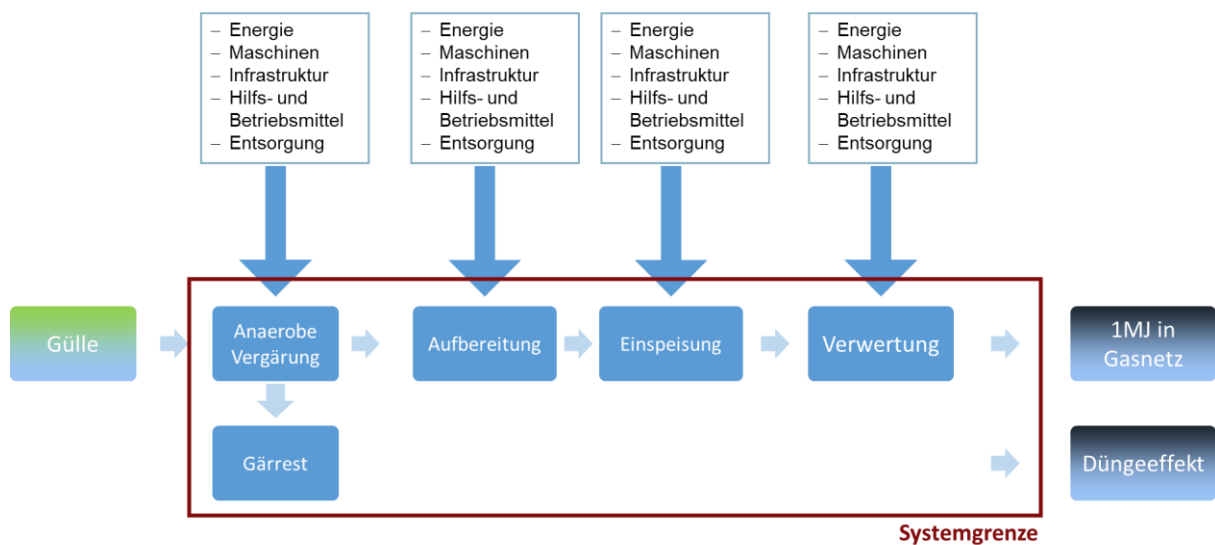
Bei der ökologischen Bewertung der Methanisierung sind die Ergebnisse abhängig von folgenden Faktoren:

- Direkte Integration in den Fermenter bzw. nachgeschaltete Integration des Wasserstoffes?
- Welcher Methangehalt wird durch die Methanisierung erzielt? Wieviel des vorhandenen CO₂ wird umgesetzt?
- Quelle des Wasserstoffs bzw. Herkunft/ Produktion der benötigten elektrischen Energie zur Wasserstoffherzeugung (Elektrolyse)
- Beschreibung der Anlagenkomponenten (Materialbedarf)

3.2 Systemgrenze

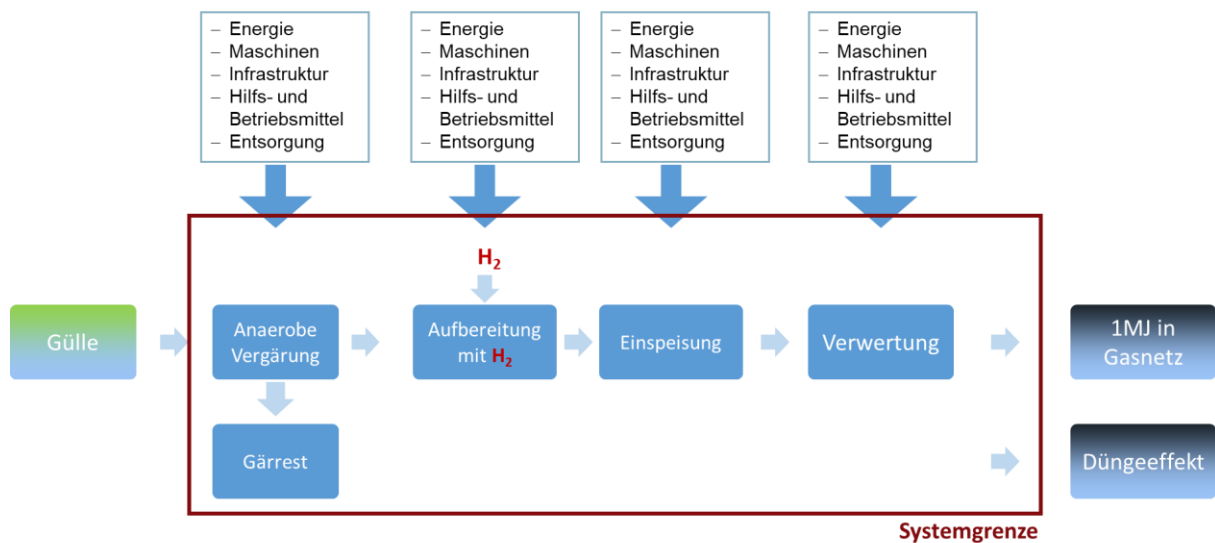
Es wurden drei verschiedene Varianten der Methaneinspeisung analysiert. In Untersuchung 1 wurden die Anaerobe Vergärung, Aufbereitung, Einspeisung und Verwertung betrachtet. Diese erste Betrachtung wurde in Untersuchung 2 durch die nachgeschaltete Integration von Wasserstoff ergänzt. Die Referenzeinheit bzw. funktionelle Einheit ist definiert als 1 MJ Energie im Gasnetz. Der Düngereffekt wurde ebenfalls in Form einer Gutschrift berücksichtigt. Die detaillierte Beschreibung des angesetzten Düngereffekts erfolgt in der ökologischen Betrachtung des Gärrests in Kapitel 4. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass alle Aufbereitungsmethoden sich in unmittelbarer Nähe zur Biogasanlage befinden.

Abbildung 4 Systemgrenze Untersuchung 1 (Referenzszenario)



Die Abbildung 4 zeigt die Systemgrenze für die erste Untersuchung der Wasserstoffproduktion. Hier sieht man die herkömmliche Aufbereitung von Biogas ohne Wasserstoff (entweder per Aminwäsche oder Membranaufbereitung). Innerhalb der Systemgrenze sieht man die Schritte die betrachtet wurden (Anaerobe Vergärung, Aufbereitung, Einspeisung und Verwertung).

Abbildung 5 Systemgrenze Untersuchung 2



Hiermit verglichen wurde die Wasserstoffaufbereitung in der zweiten Untersuchung. Hier wurden die folgenden Schritte betrachtet: Anaerobe Vergärung, Aufbereitung mit H_2 , Einspeisung und Verwertung.

Anaerobe Vergärung

Die angenommene durchschnittliche in die Vergärung gebrachte Rohgüllemenge beträgt 8,7 Tonnen pro Tag. Der angenommene Methanertrag beträgt $17 \text{ Nm}^3 / \text{pro m}^3 \text{ Rinderrohgülle}$ und für das BHKW wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von 32% und ein thermischer Wirkungsgrad von 55% erwartet (KTBL, 2013; Optibio gaz, 2012). Der Nährstoffgehalt des Gärrests zur Gutschriftenvergabe wurde aus Kapitel 4 übernommen.

Aufbereitung, Einspeisung und Verwertung

Die Methanisierung besteht in der Synthese von CH_4 aus CO_2 und H_2 . H_2 stammte in dieser Analyse aus der Wasserelektrolyse. Des Weiteren kann die Methanisierung durch die chemische oder biologische Katalyse erfolgen. Neben der Wasserstoffaufbereitung wurden auch als weitere Aufbereitungsmethoden die Aminwäsche sowie die Aufbereitung per Membran betrachtet. Die Daten für die Aufbereitung, Einspeisung und Verwertung entstammen der ecoinvent Datenbank (ecoinvent, 2013). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden unterschiedliche Strombereitstellungen (PV, Wind und Wasserkraft) für die Aufbereitung mittels H_2 miteinander betrachtet.

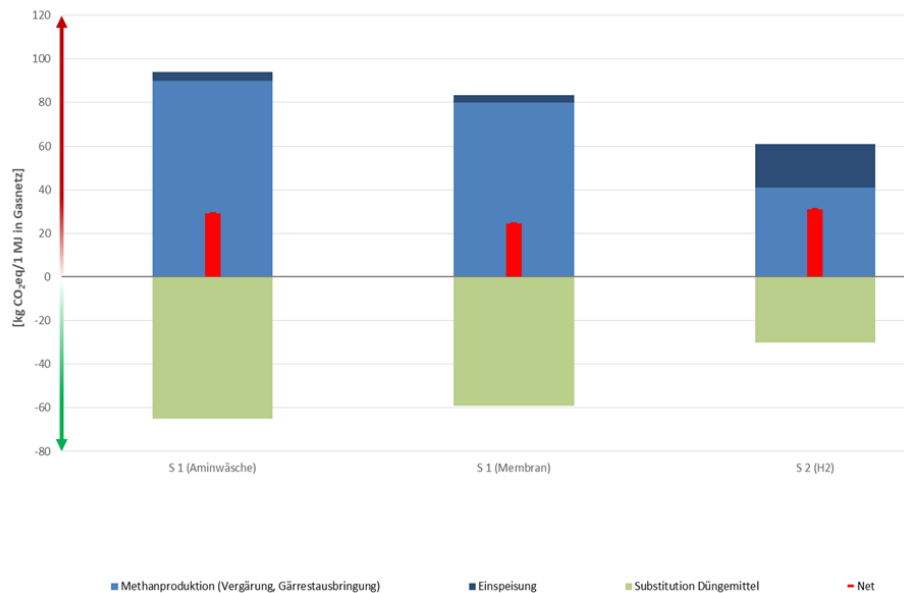
3.3 Ergebnisse

Die Emissionen von Treibhausgasen pro Energieeinheit wurden für verschiedene Szenarien berechnet, wobei die Quelle der Elektrizität und die Herkunft des Kohlendioxids variieren. Die Ergebnisse in Abbildung 6 zeigen, dass eine Aufbereitung bei beiden Aufbereitungstechniken grundsätzlich als sehr energieaufwendig zu bewerten ist und diese sich nur in einem großen Maßstab lohnt.

Die Aufbereitung mit Wasserstoff schneidet aktuell schlechter ab bezogen auf die funktionelle Einheit $1 \text{ MJ } CH_4\text{-Output}$ dies resultiert insbesondere aus den geringeren angesetzten Düngeeffekten. Bei

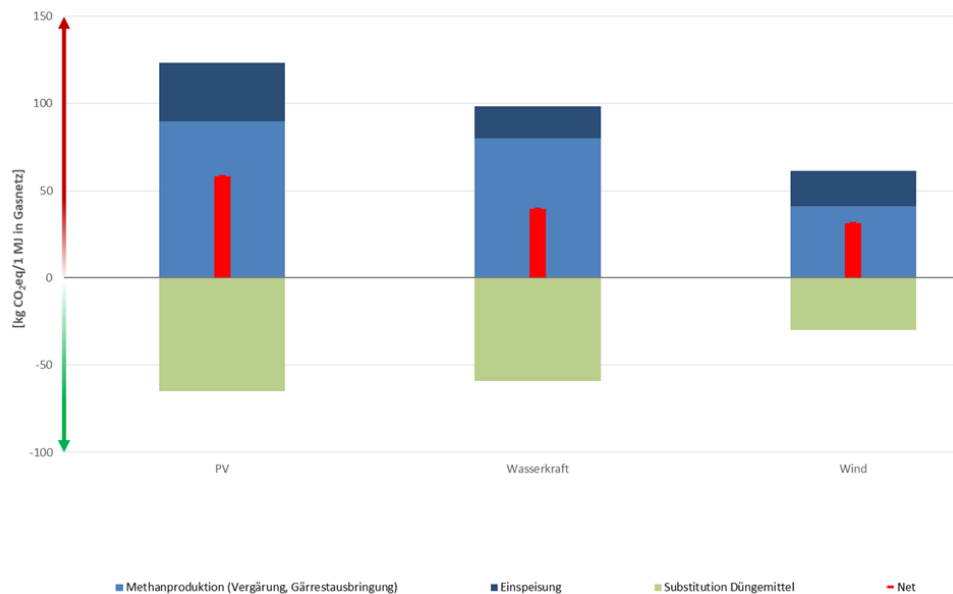
Änderung der funktionellen Einheit in Bezug auf den Materialinput, verändern sich die Treibhausgasemissionen zu Gunsten der Biogasaufbereitungstechnik mit Wasserstoffintegration.

Abbildung 6 Ergebnisse Ökobilanzierung Untersuchung 1



Die Wasserstoffproduktion in Abbildung basiert auf der Annahme der Stromerzeugung auf Basis von Windkraft. Die Abbildung 7 präsentiert die Sensitivität zu Photovoltaik, Wasserkraft und Wind. Hier zeigt es sich dass eine starke Abhängigkeit zur Strombereitstellung für die Wasserstofferzeugung besteht. Zur Erwähnen ist allerdings, dass im Vergleich der drei Szenarien der Strombedarf der Anlage aus dem regionalen Strommix besteht und nur die Betrachtung der Wasserstoffproduktion Windkraft beinhaltet.

Abbildung 7 Ergebnisse Ökobilanzierung Untersuchung 2



Ein intermittierender Betrieb mit Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien kann die Treibhausgasemissionen deutlich reduzieren. Die zukünftige Entwicklung eines niedrigeren Stromverbrauchs und die Integration von erneuerbaren Gutschriften aus der CO₂-Valorisierung können die Wettbewerbsfähigkeit dieser Technologie erhöhen (Collet et al., 2017; Meylan et al., 2017).

4 Ökologische Bewertung von Gärrest

Bei der Lagerung von tierischen Exkrementen (Gülle und Mist) entstehen in landwirtschaftlichen Betrieben hohe Mengen Methanemissionen. Die folgende THG Bilanz konzentriert sich auf die Klimawirkungen, die durch die Behandlung von einer Tonne Rinderrohgülle entstehen. Ein Effekt der Biogasanlage ist, dass das produzierte Methan aufgefangen und im BHKW zu Strom- und Wärmeenergie verwertet wird. Die Vermeidung der Emissionen wird in dieser Betrachtung als Gutschrift berücksichtigt. Die Tierproduktion an sich bleibt in dieser Bewertung unberücksichtigt.

4.1 Einflussfaktoren

Bei der ökologischen Bewertung von Gärresten/ Gärprodukten sind die Ergebnisse abhängig von folgenden Faktoren

- Höhe der Substitutionseffekte?
 - o Wie viel Mineraldünger kann effektiv eingespart werden?
 - o Nährstoffzusammensetzung Gärprodukt?
- Vorbehandlung der Gülle?
- Ausbringungs- und Einarbeitungsverfahren
 - o Welche Ausbringungstechnik?
 - o Welche Technik für Einarbeitung?
 - o Zeitraum zwischen Ausbringung und Einarbeitung

- Logistik
 - o Transportentfernung

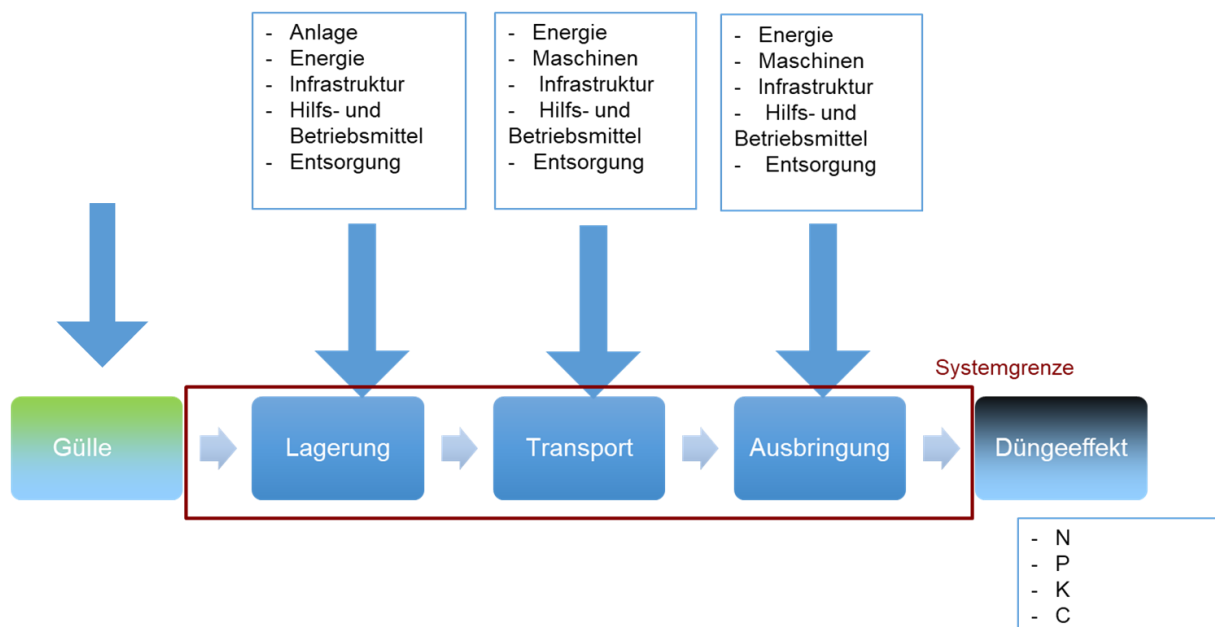
4.2 Definition der Szenarien

4.2.1 Systemgrenze

In der Bilanz werden die Emissionen für folgende Prozessschritte berücksichtigt: Anaerobe Vergärung bzw. Lagerung, Transport und Ausbringung. Die Systemgrenze dieser Untersuchung ist die Biogasanlage. Das heißt, es wird weder der landwirtschaftliche Betrieb noch eine mögliche Co-Vergärung anderer Substrate bilanziert, sondern es wird dargestellt, wie sich die Treibhausgasemissionen für eine Tonne Rinderrohgülle mit dem Betrieb einer Biogasanlage verändern. Der Prozess selbst wurde dahingehend geändert, dass ein Vergleich zwischen zwei verschiedenen Szenarien hinzugefügt wurde. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen den Prozess mit allen Stufen des Güllemanagements, beginnend mit Rinderrohgülle als Eingangsprodukt. Im Referenzszenario ist die Lagerung enthalten, da das Emissionsminderungspotenzial der Vergärung mit den vermiedenen Lagerungsemissionen verglichen werden muss (Hofmann et al., 2015; Trapp et al., 2016). Bei der Herstellung von Mineraldüngern werden THG-Emissionen hauptsächlich durch den zumeist fossilen Energiebedarf freigesetzt. Eine Substitution der Mineraldünger durch Gärprodukte führt dadurch zu positiven Effekten in der Ökobilanz, da diese in Form von Gutschriften (negative CO₂- Äquivalente) berücksichtigt werden.

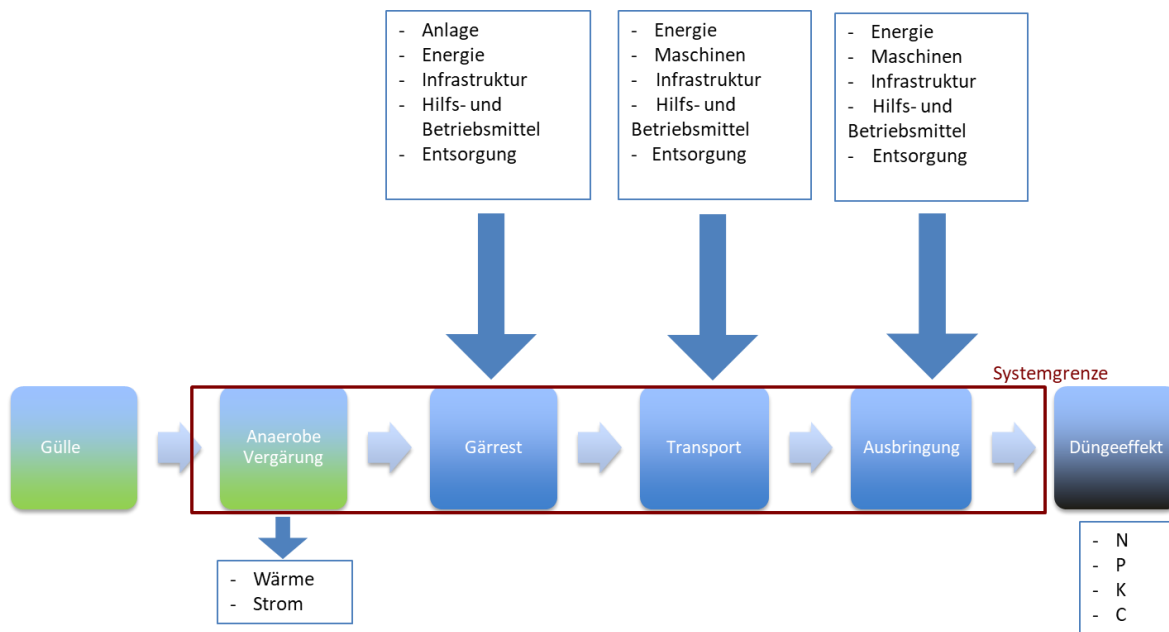
Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt das Referenzszenario Gülle. Die funktionelle Einheit ist 1m³ Rinderrohgülle bezogen auf den Düngeeffekt mit den entsprechenden Nährstoffwerten.

Abbildung 8 Systemgrenze im Referenzszenario Rohgülle



Die nächste Grafik (Abbildung 9) zeigt das Gärrestszenario. Funktionelle Einheit ist der Düngeeffekt für 1 m³ Rohgülle mit den entsprechenden Nährstoffwerten. Zusätzlich als Gutschrift werden hier Strom und Wärme bilanziert.

Abbildung 9 Systemgrenze im Szenario Vergärung Rohgülle



Die betrachteten Behandlungsprozesse werden im Folgenden separat beschrieben. Für jeden Behandlungsschritt gibt es verschiedene Technologien. In dieser Analyse wurde die Technologie mit dem höchsten Marktanteil oder den besten verfügbaren Daten zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen gewählt.

Vor der Beschreibung der einzelnen Prozessschritte müssen die Eigenschaften des Rohmaterials definiert werden. In Tabelle 2 ist der Einsatzstoff Rohgülle angegeben. Die Angaben über Trockenmasse- und Nährstoffgehalte von organischen Düngern variieren in Abhängigkeit von Ausgangsmaterial und Wassergehalt. Die Werte stellen daher nur Richtwerte der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Albers, 2015) dar.

Tabelle 2 Charakteristik des Eingangsstoff Rinderrohgülle¹

TROCKENMASSE	9,58 %
GESAMT N	4,7 kg/m ³
NH₄-N	1,9 kg/m ³
P₂O₅	1,6 kg/m ³
K₂O	4,9 kg/m ³

Lagerung:

Innerhalb des Güllemanagement wird Rohgülle gelagert, bevor sie auf die Felder ausgebracht werden kann. Die Güllelage ist notwendig, da die Ausbringung auf dem Feld aufgrund gesetzlicher Vorgaben nicht zu jeder Jahreszeit erlaubt ist. Die Güllelage kann in die Tierhaltung, aber auch in den Güllemanagementprozess einbezogen werden (Nemecek et al., 2011). Emissionen aus der

¹ Quelle: Eigenschaften von Rinder(roh)gülle (Albers, 2015)

Lagerung von Gärresten werden nicht separat berücksichtigt, da sie innerhalb der Biogasanlage enthalten sind.

Vergärung von Gülle

Der angenommene Methanertrag beträgt $17 \text{ Nm}^3 / \text{m}^3$ Rinderrohgülle und für das BHKW wurde ein Standardprozess aus der ecoinvent- Datenbank (ecoinvent, 2013) entnommen. Der Nährstoffgehalt ist in der folgenden Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 Charakteristik von Gärreste¹

GESAMT N	0.41 %
NH₄-N	64 % des Gesamt N
P₂O₅	100 % vom Input
K₂O	100 % vom Input

Transport von Gülle/Gärresten

Für die Verwendung von Gülle als Düngemittel ist der Transport zu einem Feld notwendig. Die Höhe der zu berücksichtigenden Emissionen hängt im Wesentlichen von der Transportentfernung sowie den eingesetzten Technologien ab (ecoinvent, 2013). Die angenommene Transportdistanz beträgt 20 Kilometer für Gärreste und 5 km für Gülle. Der erhöhte Transportradius wird als Gutschrift angerechnet.

Ausbringung von Gülle/Gärresten

Die Emissionen der Ausbringung auf dem Feld hängen vom Nährstoffgehalt und der Nährstoffverfügbarkeit von Gülle und Gärresten sowie von den Umweltbedingungen (Boden, Klima) während des Prozesses ab (Defra, 2010).

Vorgelagerte Prozesse

Die vorgelagerten Prozesse, die als Emissionen aus Infrastruktur, Betriebsstoffen, Anlagen, Energie, Maschinen und Entsorgung beschrieben werden, sind in der Systemgrenze miteingeschlossen. Diese werden durch die Unterstützung der ecoinvent-Datenbank (ecoinvent, 2013) einbezogen.

Substitute

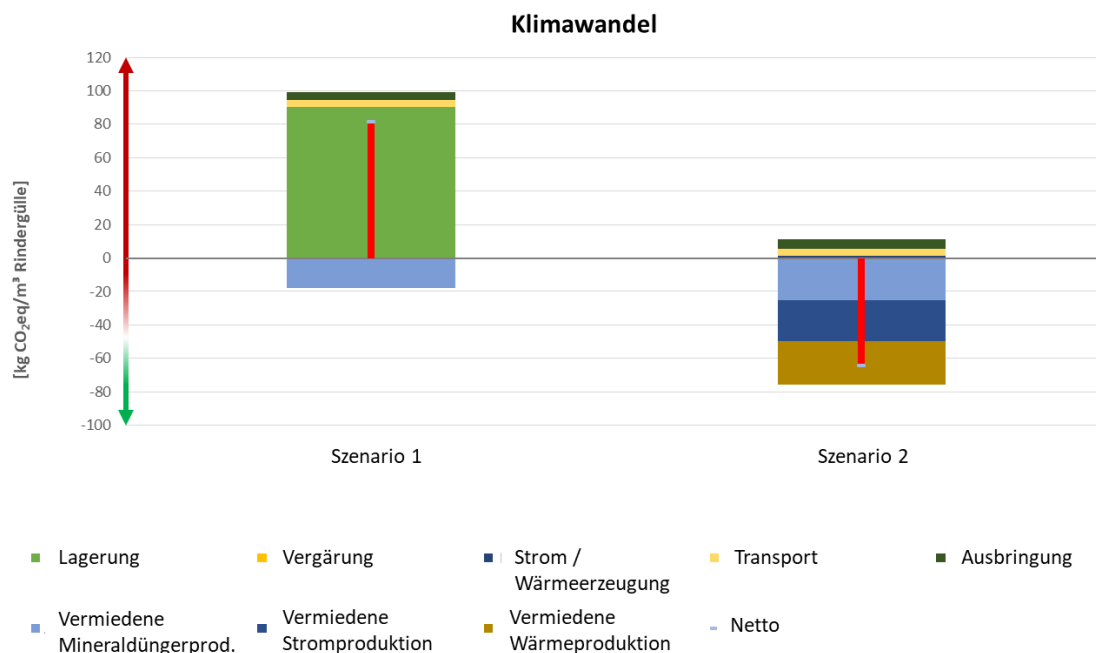
Durch den Einsatz von Gülle und Gärrest kann der Einsatz von Mineraldünger vermieden werden. Daher werden die Düngeeffekte durch ihr Referenzprodukt Mineraldünger als Nutzen berücksichtigt. Der Nutzen für das Endprodukt wird über dessen Nährstoffgehalt und Nährstoffeffizienz (organische/ mineralische Nährstoffe) auf Basis der ecoinvent-Datenbank (ecoinvent, 2013) berechnet. Die Produktion von Wärme und Strom der Biogasanlage kann fossile Brennstoffe ersetzen. In Szenario 2 werden der produzierte Strom und die produzierte Wärme über die vermiedenen fossilen Ressourcen berechnet. Die Substitute beziehen sich jeweils auf die funktionelle Einheit 1 m^3 Rinderrohgülle.

¹ Quelle: Nährstoffgehalt von Gärresten (Reinhold, 2014)

4.3 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnung des Güllemanagements mit und ohne anaerobe Vergärung hinsichtlich des Klimawandels dargestellt. Die Abbildung 10 zeigt das Minderungspotenzial (Methanemissionen bei der Lagerung). Die aufsteigenden Säulen zeigen die Emissionen der verschiedenen Güllemanagement-Prozessschritte. Die Säulen abwärts zeigen die Emissionsgutschriften, die durch die Substitution der konventionellen Produkte - Mineraldünger und fossile Ressourcen - entstehen. Der dünne rote Balken zeigt die Nettoemissionen an. Zeigt dieser nach oben, bedeutet dies, dass Netto-Emissionen entstehen, zeigt er nach unten, beschreibt er eine Netto-Emissionseinsparung.

Abbildung 10 Ergebnisse der Ökobilanz für die beiden Szenarien - Klimawandel



Die Analyse zeigt, dass in Szenario 1 (Referenzszenario) hohe Emissionen aus der Güllelagerung (90 kg CO₂eq) entstehen, während alle anderen Prozesse nahezu marginal sind (4 kg CO₂eq). Die vermiedenen Lagerungsemissionen tragen zu einer fast 50%igen Emissionsreduktion bei. Die entstandenen THG-Emissionen sind zwar immer von der jeweiligen Lagerdauer abhängig, allerdings bedeutet dies auch hohe Nährstoffverluste für den landwirtschaftlichen Prozess. Diese Nährstoffverluste müssen häufig durch Mineraldünger ersetzt werden.

In Szenario 2 ist die Vergärung im konventionellen Güllemanagementprozess enthalten. Der hoch belastende Prozess der Lagerung wird ausgeschlossen. Durch die Substitution von Mineraldünger, Wärme und Strom ergeben sich Netto-Emissionsvorteile (Netto-Emissionseinsparungen). Die Emissionen während des Ausbringungsprozesses steigen mit den Gärresten leicht an (5 kg CO₂eq). Insgesamt ergeben sich in Szenario 2 Emissionsvorteile, was bedeutet, dass die Vergärung als Behandlungsoption zur Emissionsreduzierung während des Güllemanagementprozesses beiträgt. Mit den Gutschriften für Strom und Wärme hat Biogas deutliche Einsparungen und den besseren Düngereffekt. Wenn die Vorteile von Wärme und Strom aus der Berechnung herausgelassen werden, führt der höhere Nutzen von vermiedenem Mineraldünger aufgrund geringerer Nährstoffverluste

(Lagerungsverluste) immer noch zu Gesamtemissionseinsparungen für Szenario 2 (Anaerobe Vergärung).

Die Einbeziehung der Vergärung in eine konventionelle Prozesskette des Güllemanagements zeigt, dass das größte Vermeidungspotenzial bei der Anpassung der Lagerungen besteht, allerdings ist auch die Ausbringung in beiden Szenarien noch optimierungsfähig. Hier ist zu erwähnen, dass die ecoinvent-Datenbank (ecoinvent, 2013) von einer Spritzplattenausbringung ohne Einarbeitung von Gülle/Gärrest ausgeht. Folglich zeigt Szenario 2 ein weiteres Emissionsminderungspotenzial durch die Verbesserung der Ausbringungstechniken.

Zusammenfassend kann die Vergärung als eine vielversprechende Lösung zur Reduzierung der Umweltbelastungen im Zusammenhang mit dem Güllemanagement angesehen werden. Für eine endgültige Entscheidung, insbesondere zur Schließung von Nährstoffkreisläufen, ist jedoch eine Bewertung erforderlich, die alle relevanten Umweltauswirkungen (z. B. Eutrophierung, Versauerung) abdeckt, um die Verlagerung von Umweltbelastungen von einer Maßnahme zur anderen zu vermeiden (Nemecek et al. 2011; Trapp et al., 2016). Mit Abschluss des Projektes werden diese Fragestellungen durch weitere Studien untermauert (O’Keefe et al., 2019; Timonen et al., 2019).

5 Diskussion und Fazit

Die unterschiedliche Betrachtung möglicher Diversifizierungsansätze für Biogas hat gezeigt, dass diese direkte positive Auswirkungen auf die Ökobilanz haben, sofern dadurch fossile Energieträger verdrängt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass insbesondere ein hoher Gülleanteil sich positiv auf die THG-Bilanz auswirkt, da Emissionen aus der Güllelagerung und -ausbringung vermieden werden und abgesehen vom Transport der Gülle zur Biogasanlage keine zusätzlichen Aufwendungen entstehen. Jedoch gibt es im laufenden Betrieb häufig noch Optimierungspotenziale, dies ist besonders in der Algenproduktion der Fall. Hier ist ein zukünftiges THG-Minderungspotenzial bei der Verwendung als Biokraftstoffe erkennbar. Allerdings ist hierfür eine Reduktion des Energieaufwandes im Rahmen der Produktion von Wasserstoff unabdingbar. Zudem gilt es die Biomasseerträge signifikant zu erhöhen. Im Falle der Wasserstoffintegration in die Biogasanlage ist festzustellen, dass aktuell keine Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Aufbereitungstechnologien eingespart werden können. Dies ist bezogen auf 1 MJ CH₄-Output. Mit einer Erhöhung der CH₄-Erträge im Wasserstoffszenario sinkt der Input pro 1 MJ CH₄ und ermöglicht wiederum Potenziale zur THG-Minderung. Ähnlich wie bei der Algenkultivierung sind die Art der Produktion und der Aufbau des Prozesses entscheidend für die spätere THG-Bilanz. Im Rahmen der Wasserstoffintegration ist insbesondere die Wasserstoffproduktion und Bereitstellung ausschlaggebend.

Mit der zukünftigen Entwicklung und Optimierung unterschiedlicher Algenkultivierungsmethoden ist ein weiterer Untersuchungsbedarf bezüglich Ökobilanzierung gegeben. Dies gilt ebenfalls für die Wasserstoffintegration.

Literaturverzeichnis

- Albers, D., 2015: Möglichkeiten und Nutzen der Gülleseparation in Milchviehbetrieben. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. [Online]. https://www.google.de/search?q=M%C3%B6glichkeiten+und+Nutzen+der+G%C3%BClleseparation+in+Milchviehbetrieben+lwk+niedersachsen&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&ei=oTYIV_7mEfGv8wfi_YLwCg. Abgerufen am 08.12.2020.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Moitzi, G., Amon, T., Zechmeister-Boltenstern, S., 2004. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle and pig slurry and influence of slurry treatment. [Online]. http://www.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H93000/H93100/AmonPublikationen/emissions_during_storage_slurry.pdf. Abgerufen am 06.11.2020.
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Steyer, J. P., Bernard, O. (2015). Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied Energy*, **154**, 1089-1102.
- Collet, P., Flottes, E., Favre, A., Raynal, L., Pierre, H., Capela, S., Peregrina, C. (2017). Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology. *Applied Energy*, **192**, 282- 295.
- DBV- Deutscher Bauernverband e.V. (2020). Situationsbericht 2019/ 2020 – Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Situationsbericht 2020/ Gr 23-3. Berlin.
- DEFRA 2010. Fertiliser Manual (RB209) (8th edition). Norwich: TSO. ISBN 978 0 11 243286 9. [Online]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/432676/rb209-fertiliser-manual-110412.pdf. Abgerufen am 08.12.2020.
- EBA – European Biogas Association. (2020). THG- Reduktionspotenziale der Biogas und Biomethan-Industrie. European Biogas Association website [Online]. <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/04/20200419-Infographic-German-version.pdf>. Abgerufen am 06.11.2020.
- EU (2018). Richtlinie (EU) 2018/2001 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.
- ecoinvent (2013). The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. ecoinvent (URL: www.ecoinvent.org). Abgerufen am: 03.11.2020).
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.
- Goedkoop, M.J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver A., Struijs J., Van Zelm R., 2008. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition Report I: Characterisation. 6 January 2009, <http://www.lcia-recipe.net>. Abgerufen am 08.12.2020.
- Hofmann, F., Weddige, U., Blumenstein, B., Möller, D., Grieb, B., Mäder, R., Zerger, U., Gerlach, F., Jaensch, V., Hartmann, K.(2015). Biogasanlagen im Ökolandbau. [Online].

https://orgprints.org/29559/1/FNR_Abschlussbericht_BioBiogas_22003312.pdf. Abgerufen am 08.12.2020.

ISO. 2006a. ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (2nd ed.). Geneva: ISO.

ISO. 2006b. ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva: ISO.

Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R., Marelli, L. (2017). Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. Calculated according to the methodology set in COM(2016) 767, EUR 27215 EN, doi:10.2790/27486.

KTBL- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. (2013). Faustzahlen Biogas. 3. Edition. Darmstadt.

Meylan, F. D., Piguet, F.P., Erkman, S. (2017). Power-to-gas through CO₂ methanation: Assessment of the carbon balance regarding EU directives. *Journal of Energy Storage*, **11**, 16-24.

Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, **104**, 217–232. Abgerufen am 06.11.2020.

O 'Keeffe, S., Franko, U., Oehmichen, K., Daniel-Gromke, J., Thrän, D. (2019). Give them Credit- the GHG performance of regional biogas systems. GCB Bioenergy. 11. 10.1111/gcbb.12603.

Optibio gaz (2012). Optimierte und integrierte Verfahren zur Biogaserzeugung in der Landwirtschaft. [Online]. http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/ST_8_662.pdf. Abgerufen am 08.12.2020.

Passell, H., Dhaliwal, H., Reno, M., Wu, B., Amotz, A.B., Ivry, E., Gay, M., Czartoski, T., Laurin, L., Ayer, N. (2013). Algae biodiesel life cycle assessment using current commercial data. *Journal of Environmental Management*, **129**, 103- 111.

Reinhold, G. (2014). Besondere Eigenschaften verschiedener Gülle- und Festmistarten bei der Vergärung. Regional Institute for Agriculture Thüringen. FNR-conference. Oldenburg. 25/09/2014. Retrieved from <http://www.tll.de/ainfo/pdf/mist1014.pdf>. Abgerufen am 08.12.2020.

Schuler, J., Bues, A., Henseler, M., Krämer, C., Krampe, L., Kreins, P., Liebersbach, H., Osterburg, B., Röder, N., Uckert, G. (2014). Instrumente zur Stärkung von Synergien zwischen Natur- und Klimaschutz im Bereich Landbewirtschaftung. In: BfN-Skripten 382, Bundesamt für Naturschutz, Bonn. ISBN: 978-3-89624-117-7.

Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko (2007): Agriculture. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter8.pdf>. Abgerufen am 22.12.2020.

Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E., Joensuu, K. (2019). LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate. Journal of Cleaner Production. 235. 10.1016/j.jclepro.2019.06.085.

Trapp, M., Ziegler, C., Laub, K. (2016). Comparison of different digestate processing systems concerning environmental efficiency. Working Paper im Rahmen des FP-7 Projektes INEMAD. http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/INEMAD_WoPa17%20-%20Comparison%20of%20different%20digestate%20processing%20systems%20concerning%20environmental%20efficiency.pdf

UBA – Umweltbundesamt (2020). Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union. [Online]. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#grosste-emittenten>. Abgerufen am 22.12.2020.

WBA- World Biogas Association (2019). Global Potential of Biogas. [Online]. https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/09/WBA-globalreport-56ppa4_digital-Sept-2019.pdf. Abgerufen am 22.12.2020.