



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Executive Summary vom 15.09.2021

EvEmBi - Evaluation und Reduktion von Methanemissionen verschiedener Biogasanlagenkonzepte in Europa: Fokus Schweiz

Quelle: © Ökostrom Schweiz 2018





Fachverband landwirtschaftliches Biogas
Association faîtière des biogaz agricoles

Datum: 15.09.2021

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Bundesamt für Umwelt
Abteilung Klima
CH-3003 Bern
www.bafu.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Ökostrom Schweiz, Fachverband landwirtschaftliches Biogas
Technoparkstrasse 2
CH-8406 Winterthur
www.oekostromschweiz.ch

Autor/innen:

Deborah Scharfy, Genossenschaft Ökostrom Schweiz, deborah.scharfy@oekostromschweiz.ch
Victor Anspach, Genossenschaft Ökostrom Schweiz, victor.anspach@oekostromschweiz.ch

Mitarbeit:

Peter Oester, On-site Messung, Oester Messtechnik GmbH
Samuel Oester, On-site Messung, Oester Messtechnik GmbH
Marcel Bühler, Fernmessung, Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften
Christoph Häni, Fernmessung, Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften
Thomas Kupper, Fernmessung, Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BAFU-Projektbegleitung:

Adrian Schilt, adrian.schilt@bafu.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501679-01

BAFU-Vertragsnummer: 17.0083.PJ/R035-0703

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



Zusammenfassung

Das EvEmBi-Projekt war ein ERA-NET Bioenergy Projekt mit einem Projektkonsortium bestehend aus Fachinstitutionen der Länder Deutschland, Österreich, Schweden, Dänemark und der Schweiz. Hauptziel von EvEmBi war die quantitative Erfassung von Methanemissionen aus Biogasanlagen in den Sektoren Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kläranlagen. Mit den Messergebnissen sollten zum einen Emissionsfaktoren für Biogasanlagen bestimmt und zum anderen Emissionsminderungsmassnahmen abgeleitet und getestet werden, damit Biogasanlagenbetreiber ihre Effizienz erhöhen können. Methodisch wurden Fernmessungen mit On-site-Messungen kombiniert, um sowohl die absoluten Methanemissionen der Biogasanlagen zu bestimmen als auch die Emissionsgrössen von Anlagenkomponenten zu identifizieren. Darüber hinaus erarbeiteten die Projektpartner nationale freiwillige Methanmessprogramme und nationale Positionspapiere zum Umgang mit Methanemissionen bei Biogasanlagen. In Zusammenarbeit mit der European Biogas Association (EBA) wurden die Projekterkenntnisse zudem für die europäische Biogasbranche aufbereitet.

In den Projektjahren 2018-2020 wurden in der Schweiz und den anderen Partnerländern insgesamt über 30 Biogasanlagen in zwei aufeinanderfolgenden Messkampagnen auf Methanemissionen untersucht. Dabei wurden in allen Ländern die beiden Methoden On-site und Fernmessung mit der Inverse Dispersion Modelling Method (IDMM) oder der tracer dispersion method (TDM) angewandt.

In der Schweiz wurden drei landwirtschaftliche Biogasanlagen mit den Methoden On-site Messung und Fernmessung auf ihre Methanemissionen überprüft. Die Biogasanlagen unterschieden sich in der Grösse der Stromproduktion (120-680 kW installierte elektrische Leistung) und in den Anlagenkomponenten. Die Anlagenauswahl wurde hinsichtlich der Durchführbarkeit der Fernmessung getroffen. Mit der Fernmessung wurden Anlagenemissionen von 0.4-3.0 kg CH₄ pro Stunde ermittelt. Die Fernmessungen zeigten, dass die Emissionen einer Anlage innerhalb eines Tages und auch von Tag zu Tag sehr unterschiedlich sein können. Auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Partnerländer wurden mit der Fernmessung Emissionsraten von 0.3-10.4 kg CH₄ pro Stunde ermittelt. Somit lagen die Ergebnisse der Schweizer EvEmBi-Anlagen in einem vergleichbaren Rahmen. Mithilfe der On-site Messungen konnten die Emissionsstärken den Anlagenkomponenten zugeordnet werden. Die gasdichten Behälter (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager) hatten keine oder sehr niedrige Emissionen, so dass sie für die Gesamtemissionen der Anlagen nicht relevant waren. Nicht-gasdichte Gärrestlager, die Blockheizkraftwerk-Abluft und in einem besonderen Fall auch eine defekte Doppelmembran wurden als Hauptemissionsquellen identifiziert. Gesamthaft über alle untersuchten Biogasanlagen in der Schweiz und im Ausland wurde festgestellt, dass die Emissionsraten nicht mit der Methanproduktion korrelierten, d.h. eine hohe Methanproduktivität nicht automatisch zu mehr oder weniger Emissionen führte als eine niedrige Methanproduktivität.

Parallel zu den Messungen wurde als weiterer Output des EvEmBi-Projektes ein Branchenkonzept mit freiwilligem Methanmessprogramm für landwirtschaftliche Biogasanlagen bei Ökostrom Schweiz aufgebaut. Mit eigenen On-site Methanleckagemessgeräten bietet Ökostrom Schweiz allen Mitgliedsanlagen interne Methanemissionskontrollen im Sinne einer Betreiberschulung an. Zusammen mit den externen Methanemissionskontrollen im Rahmen der Klimaschutzprojekte (BAFU Kompensationsprojekte) konnten im Jahr 2020 schon rund 50% der Mitgliedsanlagen von Emissionskontrollen und Schulungen profitieren. Ein Positionspapier zu Methanemissionen wurde von Ökostrom Schweiz verfasst. Im Gesamtkonsortium werden zwei wissenschaftliche Publikationen angestrebt, welche nach Projektabschluss erarbeitet und publiziert werden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Anlagenbeschrieb	6
3 Vorgehen und Methoden	6
3.1 Konsortium.....	6
3.2 Messkampagnen	7
3.3 Methodenbeschrieb Fernmessung	7
3.4 Methodenbeschrieb On-site Messungen.....	8
4 Ergebnisse Schweiz und Partnerländer	9
4.1 Übersicht über die Schweizer Messergebnisse	9
4.2 Messergebnisse der Partnerländer	11
4.3 Kosten-Nutzen-Analyse von Emissionsminderungsmaßnahmen.....	14
5 Diskussion	16
6 Schlussfolgerungen und Fazit	18
7 Literaturverzeichnis	19



1 Einleitung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen produzieren Biogas mit einem Methangehalt von 50-60% aus der Vergärung von Hofdüngern und Co-Substraten. In Blockheizkraftwerken werden anschliessend Strom und Wärme aus der Verbrennung des Biogases erzeugt oder das Biogas wird mittels einer Biogasaufbereitungsanlage zu Biomethan aufgereinigt, welches in das Erdgasnetz eingespeist oder als Treibstoff genutzt wird. Biogasverluste respektive Methanverluste aus Biogasanlagen sind daher sowohl Energie- als auch Einkommensverluste für Biogasanlagenbetreiber. Darüber hinaus ist Methan (CH₄) ein relativ starkes Treibhausgas und der positive Klimaschutzbeitrag der Biogasproduktion kann durch unbeachtliche CH₄-Emissionen vermindert werden.

Methanemissionen aus Biogasanlagen kommen beispielsweise vor, wenn Leckagen auftreten. Es können aber auch Emissionen aufgrund baulich nicht-gasdichter Anlagenbestandteile wie Substratlager oder Gärrestlager auftreten. Obwohl die Zahl der Studien, die Treibhausgasemissionen aus Biogasanlagen untersuchen, in den letzten Jahren gestiegen ist, sind zuverlässige, repräsentative und quantifizierte Messdaten selten. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit von Einzelmessergebnissen auf ein Gesamtbild für eine zuverlässige Emissionsinventur des Biogassektors begrenzt. Unterschiedliche Messmethoden und das Fehlen einer europäischen Norm für die CH₄-Emissionsquantifizierung von Biogasanlagen machen den direkten Vergleich bereits vorhandener Ergebnisse schwer.

Das EvEmBi-Projekt hatte als oberstes Ziel, geprüfte Emissionsfaktoren (EF) auf Basis einer standardisierten Messmethodik zu bestimmen. Gemeinsam wurden vom Projektkonsortium über 30 Biogasanlagen untersucht, ausgewertet und analysiert. Dabei wurden verfahrenstechnisch unterschiedliche Anlagenkonzepte (bspw. landwirtschaftliche Biogasanlagen und gewerblich-industrielle Biogasanlagen) abgedeckt. Die verschiedenen Anlagenkonzepte in den jeweiligen Ländern sollten für die Auswertung klassifiziert und die Emissionsquellen nach bestimmten Komponenten aufgeteilt werden, wie zum Beispiel für die Biogasverwertung im Blockheizkraftwerk oder in der Aufbereitungsanlage. Die Biogasanlagen in den teilnehmenden Ländern waren unterschiedlich aufgebaut in Bauweise, Substrateinsatz und Verarbeitung. In Deutschland und Schweden sind z.B. Gasaufbereitungsanlagen ebenfalls Bestandteil der Biogasanlagen, während das in der Schweiz noch selten der Fall ist.

Die multinationale, harmonisierte Vorgehensweise ermöglichte die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den jeweiligen Partnerländern und trug dadurch zur Sicherung der Repräsentativität bei. Aus den Projektdaten soll ein Quantifizierungssystem für repräsentative EF der ausgewerteten Anlagenkonzepte in Europa erstellt werden, unter Verwendung der harmonisierten Messdaten aus der Messreihe innerhalb des beantragten Projekts sowie zusätzlicher Datenquellen, z.B. aus früheren Messungen, von Dritten oder von Betreibererhebungen. Im Rahmen des Projekts wurden auch die Auswirkungen verschiedener Betriebszustände der Biogasanlagen (z.B. aufgrund eines besonderen Betriebszustandes) auf die Emissionen ausgewertet und in das EF-Quantifizierungssystem miteinbezogen.

Ein weiteres Ziel des Projektes war die Analyse von Emissionsminderungsmassnahmen für die untersuchten Anlagen. Solche Massnahmen beinhalten beispielsweise die Veränderung der Anlagenorganisation oder eine Optimierung von baulichen oder technischen Schwachstellen. Es galt herauszufinden, welche Auswirkungen solche Massnahmen in Bezug auf die Emissionen haben und in welchem Verhältnis die Kosten und der Nutzen stehen. Der individuelle betriebswirtschaftliche Anreiz für jeden Anlagenbetreiber spielt für die Akzeptanz und Umsetzung einer Emissionsreduktionsstrategie in der Praxis eine wichtige Rolle. Nach der Anwendung der entwickelten Emissionsminderungsmassnahmen wurde der Erfolg bei der Reduzierung der CH₄-Emissionen mittels Nachmessung evaluiert und anschliessend mit einer Kosten-Nutzen-Analyse für die einzelnen Massnahmen zur Emissionsbegrenzung aufbereitet.



2 Anlagenbeschreibung

In der Schweiz wurden drei landwirtschaftliche Biogasanlagen für das Projekt ausgewählt. Die Auswahl wurde von der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) aufgrund der Eignung hinsichtlich der Fernmessung getroffen und ergab zunächst sieben Anlagen, die von den Windverhältnissen und den topographischen Voraussetzungen geeignet waren. Von diesen sieben wurden schliesslich drei Anlagen zur Vermessung ausgewählt: CH-01, CH-02 und CH-03. Eine der sieben Anlagen (CH-04) wurde als Reserve für die drei ausgewählten Anlagen vorgesehen.

Tabelle 1. Bezeichnung und Kurzbeschreibung der für EvEmBi ausgewählten landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz.

CH-01	Eine kleine Anlage mit 120 kW _{el} installierter Leistung, mit thermophilem Fermenter, einem Nachgärer mit einfacher Membran und nicht-gasdicht gedecktem Gärrestlager.
CH-02	Eine mittlere Anlage mit 280 kW _{el} installierter Leistung, mit grossem Fermenter, Nachgärer und gasdicht abgedecktem Gärrestlager, besonders geeignet für die Vergärung grosser Mengen Hofdünger. Ab Mitte 2018: Erweiterung der Anlage auf total 680 kW _{el} installierte Leistung.
CH-03	Eine grosse Anlage mit 440 kW _{el} installierter Leistung, mit grossen Fermentern und dem Einsatz verschiedener, energiereicher Co-Substrate. Offenes Gärrestlager.
CH-04	Reserveanlage. Eine mittlere Anlage mit 220 kW _{el} , halb unterirdischen Fermentern, und gasdicht abgedecktem Gärrestlager.

3 Vorgehen und Methoden

3.1 Konsortium

Das Konsortium bestand aus dem Projektkoordinator DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum) und weiteren Projektpartnern aus Deutschland, Österreich, Schweden, Dänemark und der Schweiz. Die Projektpartner waren für die Umsetzung der Projektziele auf nationaler Ebene zuständig. Folgende Institutionen haben zur Durchführung des EvEmBi-Projekts in den einzelnen Ländern beigetragen:

Deutschland: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart, Fachverband Biogas e. V.

Österreich: Institut für Abfallwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), BIOENERGY 2020+ GmbH, AAT Biogas Technology, Kompost & Biogas Verband Österreich

Schweiz: Genossenschaft Ökostrom Schweiz, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Oester Messtechnik GmbH

Schweden: RISE Research Institutes of Sweden AB, Avfall Sverige, Svenskt Vatten

Dänemark: Technische Universität Dänemark. Hinweis: In Dänemark wurden aufgrund fehlender nationaler Finanzierung schlussendlich keine Messungen durchgeführt.

Zusätzlich war die EBA, die European Biogas Association, als länderübergreifender Projektpartner im Konsortium dabei. Die Aufgaben der EBA waren die Bekanntmachung der Projektergebnisse auf europäischer Ebene und die Aufbereitung für die Biogasindustrie.



3.2 Messkampagnen

Eine Übersicht der Messkampagnen ist in Tabelle 2 aufgeführt. In der Schweiz liegen im Gegensatz zu den meisten europäischen Ländern überwiegend schwachwindige Verhältnisse vor (d.h. Windgeschwindigkeit von rund 1 m s^{-1}). Für die Anwendung des Dispersionsmodells wird eine Schubspannungsgeschwindigkeit von mindestens 0.15 m s^{-1} empfohlen. Aus diesem Grund wurden in der Schweiz Messkampagnen von mehreren Tagen bis Wochen durchgeführt.

Tabelle 2 Übersicht der durchgeführten Methanemissionsmessungen auf den ausgewählten Biogasanlagen

Biogasanlage	Fernmessung 2018	On-site Messung 2018	Fernmessung 2019	On-site Messung 2019
CH-01	21.02.-28.04.	11.10.	30.05.-19.06.	06.06.
CH-02	07.06.-23.07.	15.06.	01.07.-19.07.	12.07. & 06.12.
CH-03	10.08.-11.09.	13.09.	Keine Messung	13.11.
CH-04	Keine Messung	30.10.	02.12.-18.12.	02.10.

3.3 Methodenbeschrieb Fernmessung

Messung der Gaskonzentrationen und der Turbulenz

Für die Bestimmung der Methanemissionen von einer Quelle wie z.B. einer Biogasanlage mittels Fernmessung sind (i) Messungen der Gaskonzentrationen in rund 130 m Entfernung im Luv und Lee der Anlage und (ii) Messungen der Turbulenz (Luftbewegung auf der x-, y- und z-Achse) nahe bei den Geräten zur Gasmessung erforderlich.

Bestimmung der Emissionen mittels Ausbreitungsmodellierung

Um repräsentative Emissionsflüsse aus einzelnen (oder mehreren) Konzentrationsmessungen in der Abwindfahne der zu betrachtenden Quellfläche zu berechnen, müssen die beiden Grössen Gaskonzentration in der Luft der Emissionsfahne und der Emissionsfluss (d.h. Emission pro Zeiteinheit) einer räumlich begrenzten Fläche in Beziehung gesetzt werden. Dies wurde mittels eines state-of-the-art „backward Lagrangian stochastic“ Dispersionsmodells (bLS) realisiert (Häni_2018). Das Modell ist frei verfügbar unter <http://www.agrammon.ch/documents-to-download/blsmodelr/>.

Trennung der Tierhaltungsemissionen von den Emissionen der Biogasanlagen

Mittels der Fernmessmethode wurden auch Emissionen der Tierhaltung erfasst. Mit dem Ansatz der Dispersionsmodellierung lassen sich einzelne Quellen, welche die Konzentrationsmessungen beeinflussen, nicht unterscheiden. Um die Emissionen der Biogasanlage unabhängig von den Tieremissionen bestimmen zu können, wurden die Tierbestände aufgenommen und die Tieremissionen mittels des Treibhausgasemissions-Modells der Agroscope, welches für das Treibhausgasinventar der Schweiz verwendet wird, errechnet. Die Unsicherheit in den berechneten Tieremissionen beträgt ca. 20%.



Abbildung 1. Luftbild der Biogasanlage CH-01. Eingezeichnet in hellroten Kreisen sind die Standorte der GasFinder mit deren Retroreflektoren. Einer befindet sich im Südwesten der Anlage, zwei weitere im Nordosten und Osten der Anlage. Die gestrichelten Linien zeigen die Messpfade an. In grünen Dreiecken sind die beiden Ultraschallanemometer eingezeichnet, wobei Sonic1 im Nordosten und Sonic2 im Ostrnordosten steht. In einem blauen Overlay sind die Methanquellen Weide, Stall und Biogasanlage eingezeichnet. Die Biogasanlage ist weiter unterteilt in Festlager, Gül-lager und in Rot der Nachgärer. Zusätzlich ist Verteilung der vor Ort gemessenen Windrichtung (10° Intervalle) und Windgeschwindigkeit (Einteilung: 0-1 m/s, 1-2 m/s, 2-4 m/s und 4-9 m/s) eingezeichnet. (Quelle: HAFL)

3.4 Methodenbeschrieb On-site Messungen

Im EvEmBi-Projekt wurde versucht, die Messungen so standardisiert wie möglich durchzuführen. Bei den On-site Messungen folgten die Messungen in Deutschland und Österreich und auf zwei Anlagen auch in Schweden dem Metharmo-Protokoll (Claus_2019). In der Schweiz wurden die On-site Messungen durch die Firma Oester Messtechnik GmbH durchgeführt. Die Methodik stimmt mit dem Metharmo-Protokoll teilweise überein, konkret bei der Leckagedetektion und der Ermittlung von Methanemissionen bei definiertem Volumenstrom. Bei den punktuellen Messungen und den Flächenmessungen wurde die firmeneigene Herangehensweise gewählt (Oester_2018), da der Metharmo-Ansatz sehr zeitaufwendig und entsprechend kostenintensiv ist.

Die Vor-Ort-Messungen (On-site) von Oester Messtechnik GmbH erfolgten mittels Flammenionisations-Detektor (FID; Portafid M3-K von Sewerin) oder Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD; Ex-TEC SR 6 von Sewerin) zur Messung der Methankonzentration an den Emissionsstellen im ppm Bereich resp. im Vol.-% Bereich (Abbildung 4). Die Analyse der aktuellen Zusammensetzung des Biogases erfolgt mittels kombiniertem Analysegerät (NDIR für CO₂ + CH₄, Elektrochemisch für O₂; Multitec 540 von Sewerin). Bei den Leckage-Messungen wird jedes gasführende Bauteil hinsichtlich Leckagen untersucht und auch flächige Emissionen gemessen und quantifiziert. Die On-site-Messungen sind ein wichtiger Baustein zur Detektion und Reduktion der Methanemissionen, da die exakte Emissionsquelle identifiziert werden kann.

Bei der On-site Messung findet keine halbstündliche Überwachung der Emissionstätigkeit der Anlage statt und es können daher keine Aussagen zu Schwankungen innerhalb eines Tages gemacht werden und auch nicht zur Schwankungsbreite, also der Unsicherheit von Emissionsdaten. Schwankungen können z.B. durch Substratlieferungen oder Rühraktivitäten ausgelöst werden. Die Hochrechnung auf die Gesamtanlage erfolgte zur Berechnung der Komponentenanteile am Emissionsgeschehen.



4 Ergebnisse Schweiz und Partnerländer

4.1 Übersicht über die Schweizer Messergebnisse

Die detaillierten Messergebnisse finden sich im Schlussbericht und werden hier nur zusammenfassend dargestellt. In Tabelle 3 sind die aus den Fernmessungen ermittelten Emissionsraten und Emissionsfaktoren der Schweizer EvEmBi-Biogasanlagen für die Jahre 2018 und 2019 zusammenfassend aufgeführt. In der Abbildung 2 sind anschliessend die gemessenen Emissionsraten aus der Fernmessung für die drei landwirtschaftlichen Biogasanlagen grafisch dargestellt. Zwei Anlagen wurden im Normalbetrieb gemessen. Bei einer Anlage trat ein Fermenterschaden auf. Die Messergebnisse wurden daher in Normalbetrieb und OTNOC (Nicht-Normalbetrieb) unterteilt. In Tabelle 4 und Abbildung 3 sind die Emissionsraten und die Anteile der Anlagenkomponenten an den Emissionen dargestellt, ermittelt mit den On-site Messungen.

Tabelle 3 Methanemissionswerte von den drei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, welche im EvEmBi-Projekt mittels Fernmessung in den Jahren 2018 und 2019 ermittelt wurden. Die Emissionsraten sind sowohl absolut als auch relativ zur produzierten Biogasmenge (d.h. als Produktionsanteil) dargestellt.

Methode	Einheit	Jahr	CH-01	CH-02	CH-04
			Normalbetrieb	OTNOC	Normalbetrieb
IDMM	Median kg CH ₄ h ⁻¹	2018	0.39	2.22	NA
		2019	0.44	1.89	0.60
IDMM	Mittelwerte kg CH ₄ h ⁻¹	2018	0.44 ± 0.50	2.99 ± 2.62	NA
		2019	0.48 ± 0.35	2.11 ± 1.10	0.57 ± 0.41
IDMM	% CH ₄ (Produktionsanteil)	2018	2.52 ± 2.82	5.41 ± 4.76	NA
		2019	2.85 ± 1.96	3.44 ± 1.80	1.52 ± 1.08

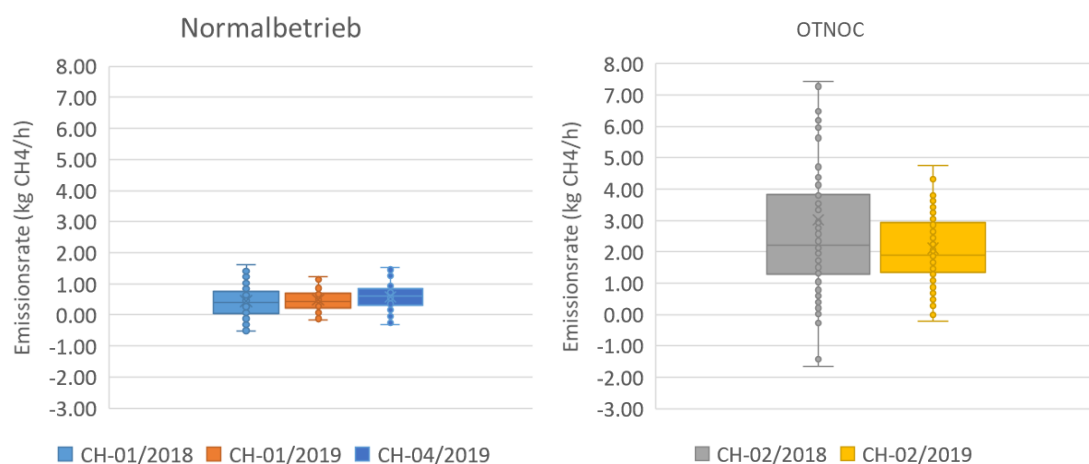


Abbildung 2 Aus den Fernmessungen ermittelte Emissionsraten der Schweizer EvEmBi-Anlagen. Die Boxplots zeigen die Verteilung der Daten in Quartilen. Die Mittellinien entsprechen den Medianen und die Kreuzmarkierungen entsprechen den Mittelwerten. In der linken Abbildung sind die Anlagen im Normalbetrieb gezeigt, in der rechten Abbildung die Anlage im OTNOC-Betrieb (Schadensfall).



Tabelle 4 Methanemissionswerte von den vier landwirtschaftlichen Biogasanlagen, welche im EvEmBi-Projekt mittels on-site Messung in den Jahren 2018 und 2019 ermittelt wurden.

Methode	Einheit	Jahr	CH-01	CH-02	CH-03	CH-04
On-site	Emissionsrate (kg CH ₄ h ⁻¹)	2018	0.09	0.01	0.30	0.06
On-site	Emissionsrate (kg CH ₄ h ⁻¹)	2019	0.10	2.00	0.19	0.15

Mithilfe der On-site Messungen konnten den Anlagenkomponenten Emissionsstärken zugewiesen werden. Je nach Anlage und Betriebszustand traten unterschiedliche Anlagenkomponenten als Emissionsquellen auf (Abbildung 3). Bei CH-02 wird deutlich, dass der OTNOC-Zustand vor allem dem Fermenter zugeordnet werden konnte. Bei den anderen Anlagen tauchte der Fermenter nicht als Emissionsquelle auf. Gärrestlager, Vorgrube und BHKW waren die wichtigsten Emissionsquellen bei den Anlagen im Normalbetrieb.

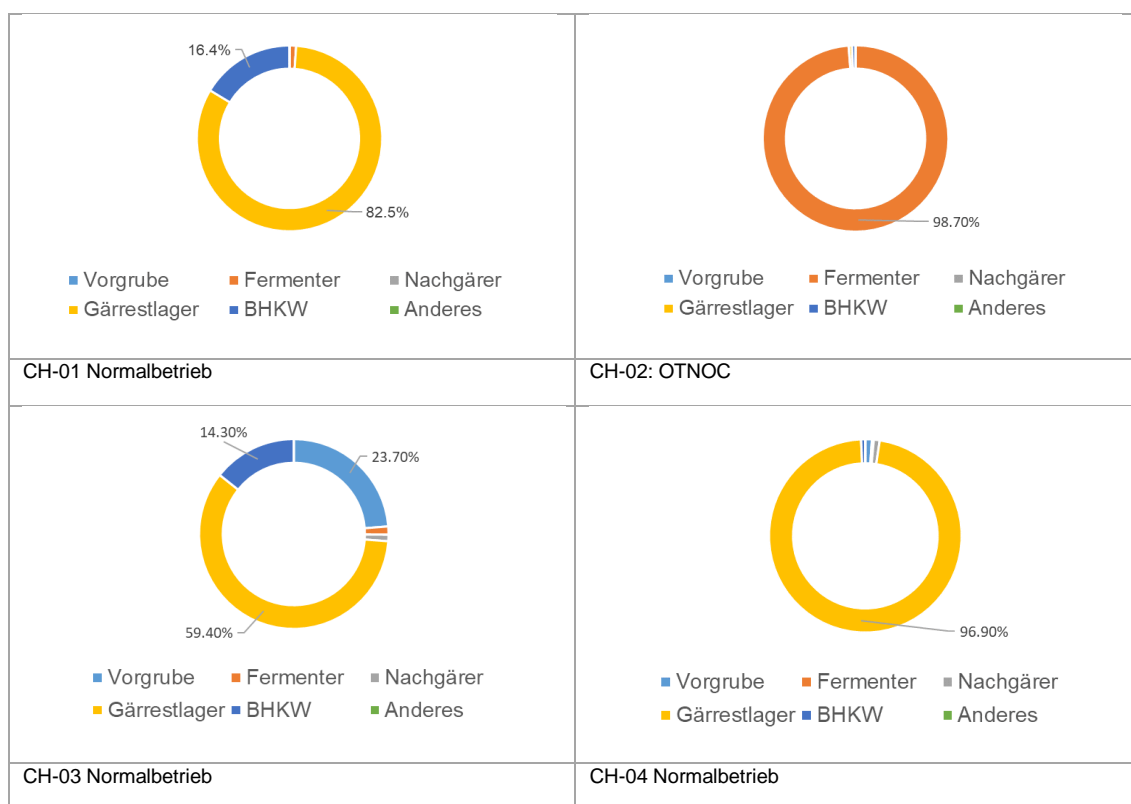


Abbildung 3 Kreisdiagramme zur visuellen Veranschaulichung der komponentenbezogenen Emissionsstärken der Schweizer EvEmBi-Biogasanlagen. Die Anteile der Anlagenkomponenten an den Emissionsmengen variieren von Anlage zu Anlage und wurden mit der On-site Methode im Jahr 2019 bestimmt.



Abbildung 4 Oester Messtechnik GmbH beim Messen der Methankonzentrationen an den Schaugläsern eines Fermenters mit einem Flammenionisationsdetektor.

4.2 Messergebnisse der Partnerländer

Mittels Fernmessung wurden insgesamt 22 Biogasanlagen in den Partnerländern Deutschland (n=12), Österreich (n=5) und Schweden (n=5) auf Methanemissionen kontrolliert. Es wurden insgesamt weniger Anlagen im Projekt gemessen als geplant, da die Trennung der Anlagenemissionen von anderen Methanquellen, d.h. tierischen Emissionen, auf einigen Anlagen nicht sichergestellt werden konnte. In Deutschland wurden im Normalbetrieb Methanemissionen von 0.4 bis 4.0% der Methanproduktion gemessen, in Österreich waren es 0.4-8.8% und in Schweden 3.6-13.4%. Die Schweizer Fernmessergebnisse liegen somit in einem vergleichbaren Rahmen wie die Ergebnisse aus Deutschland und Österreich für landwirtschaftliche Biogasanlagen.

Mittels On-site Messung wurden insgesamt 32 Biogasanlagen im EvEmBi-Projekt untersucht (inklusive vier Schweizer Anlagen). Die Höhe der Emissionen wurde den Prozessschritten der Biogasanlage zugeordnet und unterteilt in Normalbetrieb und Nicht-Normalbetrieb (OTNOC = other than normal operating conditions). Geringe Emissionen im Normalbetrieb wurden bei den Doppelmembrandächern gefunden, bei der Biogasaufbereitung mit chemischer Wäsche, bei der Abgasbehandlung und auch bei den Vorbehandlungsschritten (siehe Abbildung 5).

Erhöhte Emissionen im Normalbetrieb wurden dagegen bei nicht-gasdichten Gärrestlagern, bei den BHKW-Abgasmessungen und bei der Biogasaufbereitung mit Wasserwäsche gefunden. Leckagen zählen zu den OTNOC-Betriebszuständen und können zu den Emissionen in unterschiedlicher Höhe beitragen. Im Median waren diese relativ gering, mit Emissionsfaktoren von 0.01% für Doppelmembranen, 0.05% für chemische Wäsche bei der Gasaufbereitung und 0.3% für Betonbehälter und Gasaufbereitung mit Wasserwäsche. Für die verschiedenen Anlagenkomponenten wurden aufgrund der Vielfalt an gemessenen Anlagentypen auch eine unterschiedlich grosse Zahl an Anlagen in der Auswertung berücksichtigt (siehe Angaben in Abbildung 5).

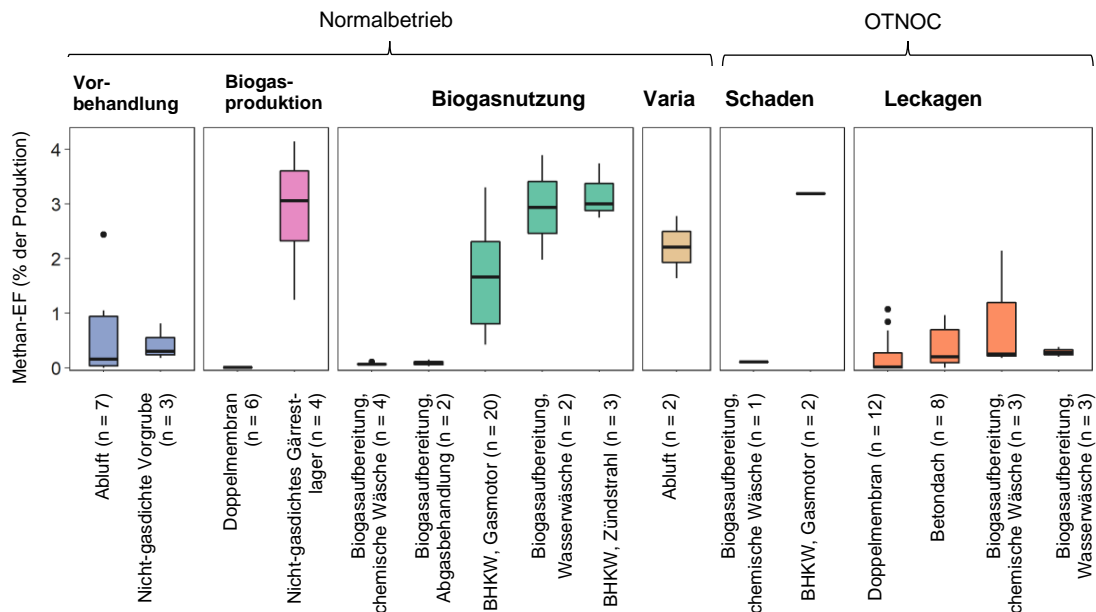


Abbildung 5 Darstellung der Methanemissionsfaktoren unterschiedlicher Anlagenkomponenten im Normalbetrieb und bei OTNOC-Events, ermittelt aus den On-site Messungen im EvEmBi Projekt (2018-2021). Die Anzahl Biogasanlagen, welche zur Auswertung der Prozessschritte herangezogen wurden, ist jeweils in Klammern angegeben.

Bei der Übersicht der Messergebnisse aus allen Ländern liess sich anhand der On-site Ergebnisse zu den Leckagebefunden (d.h. ein Methanverlust > 0.1 Vol% oder 1000 ppm CH₄) eine Rangordnung der leckagesensiblen Biogasanlagenbestandteile erstellen. Die am häufigsten gefundene, undichte Stelle war die Membrananbindung, also die Stelle des Übergangs von der Folie zur Behälterwand (Abbildung 6). An zweiter Stelle stehen die Betonbehälter, welche ebenfalls immer wieder Leckagen auf den Betondächern aufwiesen. Relativ betrachtet waren es ähnlich viele Doppelmembranbehälter wie Betonbehälter, welche mindestens 1 Leckage aufwiesen, nämlich 38% respektive 35% der untersuchten Behälter. Bei den Einfachmembranbehältern waren es verhältnismässig weniger Leckagen, mit nur 15% der untersuchten Behälter. Eine weitere Frage bei den Auswertungen war, ob es einen Zusammenhang zwischen Methanemissionen und der Grösse der Biogasanlagen gab. In Abbildung 7 sind die absoluten Emissionsraten – ermittelt über alle Fernmessungen aus dem EvEmBi-Projekt – in Abhängigkeit der Anlagenproduktivität aufgetragen. Ein eindeutiger Trend in Zusammenhang mit der Anlagengrösse wurde nicht gefunden. Die EvEmBi-Anlagen in Deutschland deckten die grösste Bandbreite an Biogasanlagen in Bezug auf die Anlagengrösse ab, mit einer Methanproduktion von 35-530 kg CH₄ h⁻¹. Der mittlere Emissionsfaktor der deutschen EvEmBi-Anlagen lag bei 1.6%. Die österreichischen EvEmBi-Anlagen hatten eine Produktivitätsbandbreite von 77-146 kg CH₄ pro Stunde und einen mittleren Emissionsfaktor von 5%. Die schwedischen EvEmBi-Anlagen waren in der Grössenordnung 82-230 kg CH₄ h⁻¹ der Anlagenproduktivität vertreten, mit einem mittleren Emissionsfaktor von 7.2%. Die Schweiz lag mit ihrer Stichprobe von zwei Anlagen im Normalbetrieb bei einem mittleren Emissionsfaktor von 2.3% und einer Produktivität von 18-62 kg CH₄ h⁻¹.

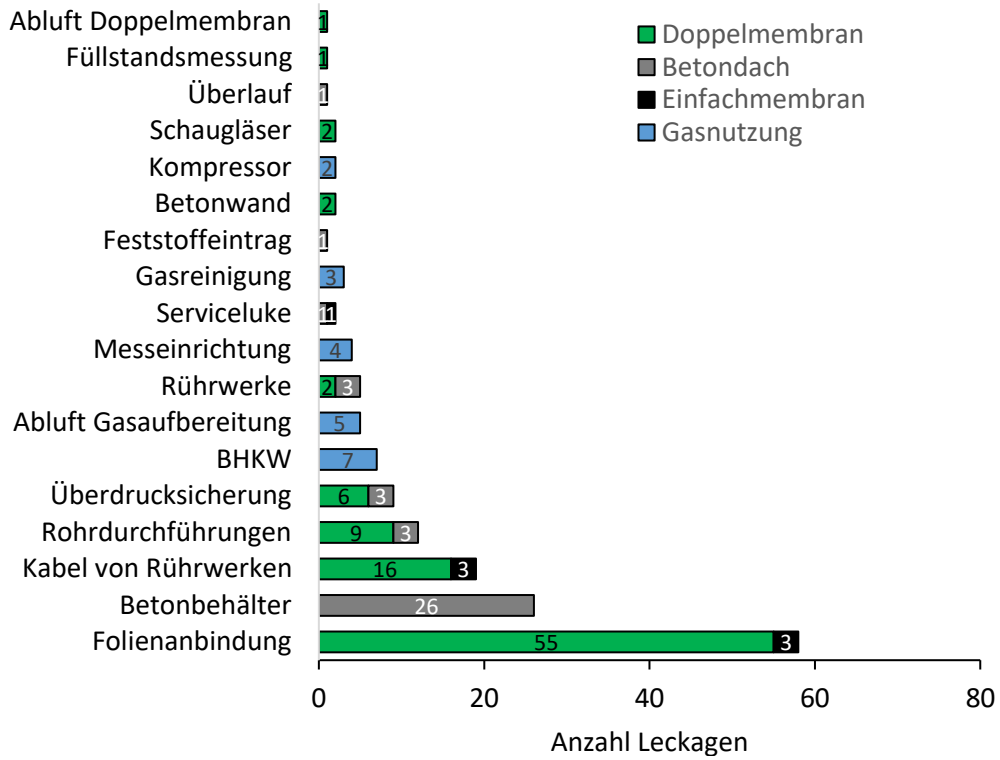


Abbildung 6 Anzahl der an unterschiedlichen Bauteilen von EvEmBi-Biogasanlagen gefundenen Leckagen, ermittelt anhand der on-site Methodik. Auswertung von allen 32 gemessenen Biogasanlagen in Deutschland, Österreich, Schweden und der Schweiz.

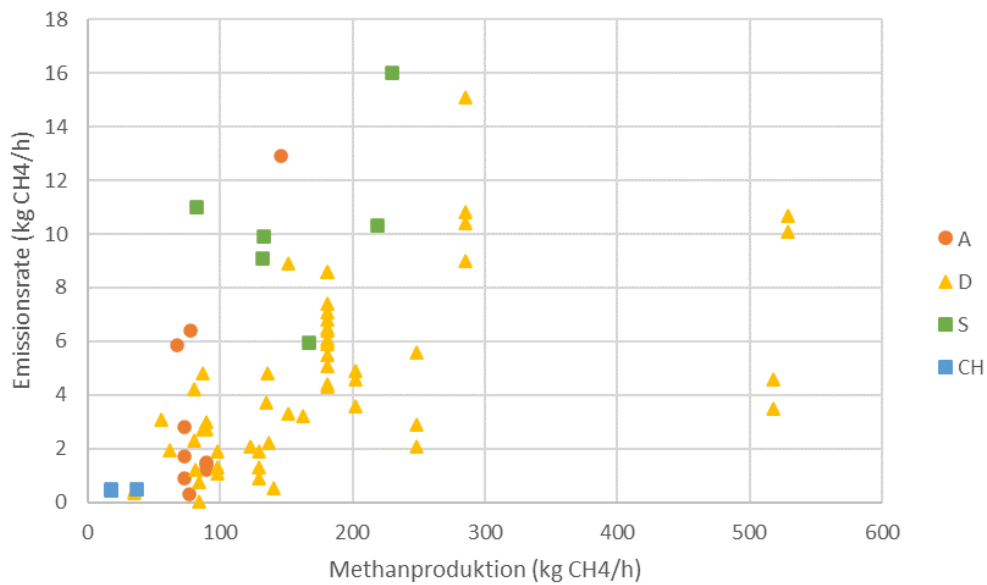


Abbildung 7 Absolute Emissionsraten (Fernmessung) von EvEmBi-Biogasanlagen in Abhängigkeit der Anlagengrösse, angegeben als Methanproduktionsrate. Die Werte stammen aus den EvEmBi-Projektländern Deutschland (D), Österreich (A), Schweden (S) und der Schweiz (CH). Die Punkte stehen für eine Anlage, wobei die Ergebnisse bei zwei Messkampagnen an derselben Anlage separat aufgetragen wurden. Es wurden nur Emissionswerte ohne OTNOC verwendet.



4.3 Kosten-Nutzen-Analyse von Emissionsminderungsmassnahmen

Im Projekt wurden fünf Massnahmen umgesetzt und der Effekt der Emissionsminderung kontrolliert. Auf diesen Ergebnissen wurde folgendes Modell einer Kosten-Nutzen-Analyse erstellt:

Als 'Nutzen A' wurde der ökonomische Nutzen eines Anlagenbetreibers definiert, der eine Reparatur-Investition tätigt und damit Methanemissionen reduziert, wodurch er mehr Methan für den Verkauf hat. Als 'Nutzen B' wurde der ökonomische Nutzen aus einer Reparatur-Investition plus einer zusätzlichen CO₂-Zertifikatsverkauf definiert (= Nutzen A plus Gewinn aus CO₂-Emissionshandel). Um den Nettogewinn zu errechnen, wurden die Investitions- bzw. Reparaturkosten von Nutzen A bzw. B abgezogen. Eine Massnahme wurde als sehr positiv bewertet (***) , wenn der Nettogewinn A und B grösser als 0 waren, positiv (**) wenn der Nettogewinn B grösser als 0 war und schwach positiv (*), wenn der Nettogewinn A und B kleiner 0 war.

Annahmen für die Berechnung:

- Ökonomische Laufzeit: 10 Jahre
- Zinssatz: 2 %
- Emissionshandel: Emissionshandelswert: 40 €/t CO_{2eq} (40.74 €/t CO_{2eq} am 12.03.2021, <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>)
- Umweltwirkung: CO_{2eq} CH₄: 28

Treibhausgasemissionen, welche durch die Massnahmen verursacht wurden, wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Die folgenden Massnahmen wurden evaluiert:

Tabelle 5 Kosten-Nutzen-Analyse von Methanemissionsminderungsmassnahmen auf EvEmBi-Biogasanlagen

	Minderungsmassnahme	Emissionsreduktion	Kosten	Evaluation
1 (1.1. und 1.2.)	Erneuerung der Innenmembran eines Doppelmembrandachs (A-11)	5.3 Tonnen CH ₄ /Jahr = 99.7% (reduziert von 0.7% auf 0%)	15.000-18.000 € Kostenszenario mit (1.1) und ohne verlorenem Biogas (1.2) aufgrund beschädigter Innenmembran	**/**
2	Gasdichte Abdeckung eines Gärrestlagers (DE-08)	7.9 Tonnen CH ₄ /Jahr = 98.5% (reduziert von 1.3% auf 0.02%)	90.000 €	**
3	Austausch eines BHKW-Katalysators (A-06)	6.2 Tonnen CH ₄ /Jahr = 34.9% (reduziert von 3.2% auf 2.1%)	0 € (im Wartungsvertrag enthalten)	***
4	Austausch des Aminwäschers bei einer Gasaufbereitung (S-01)	67 kg CH ₄ /Jahr = 10.5% (reduziert von 0.076% auf 0.068%)	0 € (im Wartungsvertrag enthalten)	***
5	Abdichtung einer Leckage an einer Gasaufbereitungsanlage (S-01)	17 Tonnen CH ₄ /Jahr = 98.6% (reduziert von 2.3% auf 0.035%)	0 € (im Wartungsvertrag enthalten)	***



Bei den Massnahmen handelte es sich sowohl um sehr kostengünstige Massnahmen als auch um Massnahmen mit einem grossen Investitionsbedarf. Bei der Evaluation der Nettogewinne A zeigte sich, dass die teuren Massnahmen, also die Abdeckung eines Gärrestlager oder die Erneuerung einer Innenmembran, nur dann amortisiert werden können, wenn die Vergütung für das Energieprodukt hoch genug ist oder der Verlust aufgrund einer Leckage nicht zu gross ist (Abbildung 8). Finanziell lohnend sind dementsprechend vor allem Massnahmen, welche günstig umzusetzen sind und ein hohes Emissionsminderungspotential haben. Bei den untersuchten EvEmBi-Massnahmen war dies vor allem für Massnahme 5 der Fall, wo eine Leckage an einer Gasaufbereitungsanlage abgedichtet werden konnte und dadurch die Emissionen stark reduziert wurden.

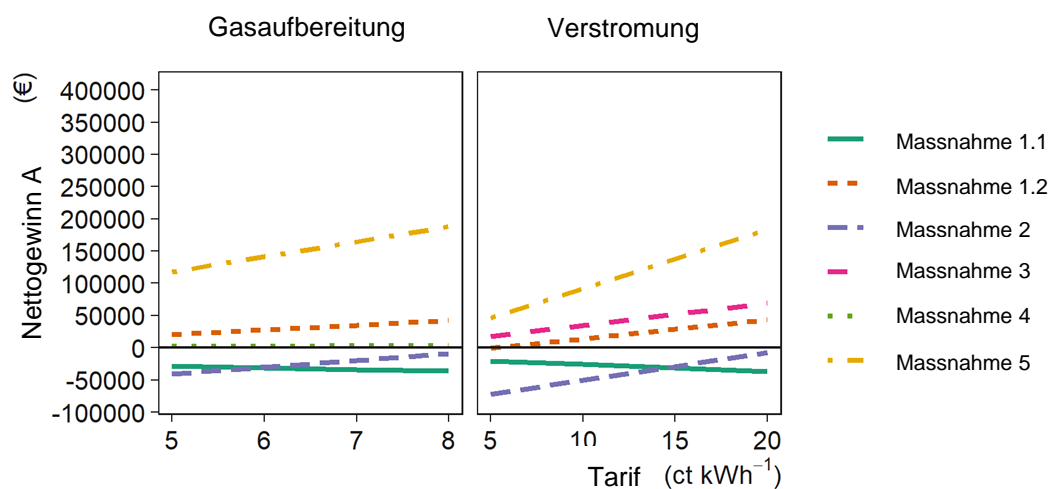


Abbildung 8. Kosten-Nutzen-Analyse der fünf untersuchten Minderungsmaßnahmen. Aufgetragen ist der Nettogewinn A, der mit den Massnahmen je nach Vergütung des Energieprodukts erreicht werden kann. Die Massnahmen sind nummeriert gemäss Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.4.

Das Fazit aus der Kosten-Nutzen-Analyse der Minderungsmaßnahmen ist:

- Regelmässige Leckagekontrollen sind wichtig, meistens kosteneffizient und die Basis für einen effizienten und sicheren Betrieb.
- Investitionen in die Behebung von Leckagen sind umso sinnvoller, wenn das Einsparen von Methanemissionen einen monetären Wert hat. Das Modell der Vergütung von eingesparten Treibhausgasemissionen im Rahmen von Klimaschutzprojekten ist aktuell zwar nur in der Schweiz Realität, die Aussagen aus diesen Berechnungen sind dafür also besonders zutreffend für die Schweiz.
- Investitionen, welche bauliche Veränderungen oder neue Ausrüstung erfordern, mögen aus rein ökonomischer Sicht nicht immer vorteilhaft erscheinen, aber aus Sicht der Nachhaltigkeit und dem zukünftigen Betrieb sind sie wichtig.
- Minderungsmaßnahmen sind in vielen Fällen ökonomisch sinnvoll. Ein Breakeven wird insbesondere dann erreicht, wenn die Emissionsreduktion mit einem monetären Wert verbunden ist.



5 Diskussion

Das EvEmBi-Projekt hat das Ziel der Erhebung von vergleichbaren Methanemissionsdaten auf unterschiedlichen Biogasanlagentypen erreicht. Es wurden mehr als 30 Biogasanlagen in Deutschland, Österreich, Schweden und der Schweiz mit Methoden der Fernmessung und der On-site Messung untersucht. Basierend auf den Erfahrungen aus Schweden wurden ein freiwilliges Methanmessprogramm in Österreich und in der Schweiz auf- bzw. ausgebaut. In Zusammenarbeit mit der European Biogas Association (EBA) wurden Erkenntnisse auf europäischer Ebene kommuniziert und diskutiert. Das EvEmBi-Projekt zeigte auf, dass sich Investitionen zur Minderung von Methanemissionen lohnen.

Die Haupteckdaten aus EvEmBi sind:

- Die Kombination von Fernmessungen und On-site Messungen eigneten sich gut zur Erhebung von Emissionsdaten auf Anlagenebene und zur Lokalisierung der Emissionsquellen auf Komponentenebene.
- Die Bandbreite der Methanemissionsraten pro Anlage und pro Komponente war sehr gross. Dies bedeutet auch, dass es teilweise ein grosses Reduktionspotential gibt.
- Die Gründe für Methanemissionen auf Biogasanlagen sind vielfältig, aber es gibt ein paar «übliche Verdächtige», die regelmässig kontrolliert werden sollten. Dies sind:
 - o Die Folienanbindung von Doppelmembranen
 - o Betondächer und -wände wegen Rissen
 - o Rohrdurchführungen und Kabeldurchführungen bei Rührwerken
 - o Überdrucksicherungen
 - o BHKW und Gasaufbereitungsanlagen
- Für den Neubau von Anlagen weisen die Ergebnisse zudem darauf hin, dass Gärrestlager möglichst gasdicht konstruiert werden sollten.
- Für die Vermeidung und Behebung von OTNOC-Ereignissen ist die regelmässige Leckagedetektion wichtig.
- Bei der Gasaufbereitung zeigte die Methode mit chemischer Wäsche und die Abgasnachbehandlung die geringsten Methanemissionen, während die Wasserwäsche deutlich höhere Emissionsraten verzeichnete.
- Im Rahmen von EvEmBi konnten die Abschätzungen der CH₄-Emissionen aus einzelnen Komponenten sowie gesamten Biogasanlagen verbessert werden. Für die noch detailliertere Bestimmung von repräsentativen Emissionsfaktoren auf Anlagen-, aber auch auf Komponentenebene, braucht es dennoch weitere Messungen/Studien, vor allem für gewerblich-industrielle Biogasanlagen.

Wichtig für die Einordnung der Schweizer Fernmessergebnisse ist, dass die im Normalbetrieb gemessenen Emissionsfaktoren von 1.5-2.8% für CH₀₁ und CH₀₄ in einer ähnlichen Grössenordnung lagen wie die landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland mit 0.4-4.0% und wie die landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Österreich mit 0.4-8.8%. Auch im Vergleich mit bisherigen Studien liegen die Ergebnisse in einer ähnlichen Grössenordnung. Die bisher umfangreichste Studie wurde vor kurzem in Dänemark durchgeführt, mit 13 landwirtschaftlichen Biogasanlagen, für welche ein durchschnittlicher Methanemissionsfaktor von 2.4% mit der Tracer dispersion method (TDM) ermittelt wurde (Scheutz_2019). Auch die Studien von Clauss_2019, Westerkamp_2014 und Flesch_2011, welche mit der Inverse Dispersion Modelling Method (IDMM) durchgeführt wurden, ermittelten



Methanemissionsfaktoren für landwirtschaftliche Biogasanlagen, ergaben allerdings mit 0.5-15% eine grössere Bandbreite als im aktuellen EvEmBi-Projekt.

Die Auswertung der On-site Messungen zeigte anhand der gefundenen Leckagen pro Anlagenkomponente auf, welche Komponenten häufig Leckagen aufwiesen. Es sind jedoch nicht nur die Leckagen, welche zu den Emissionen der Biogasanlagen beitragen. Die Häufigkeit von Leckagen sagt auch noch nichts über die Höhe der Emissionen pro Komponente aus. Mit den On-site Messungen wurde in der Schweiz bei den Anlagen CH-01 und CH-04 das Gärrestlager als emissionsstärkste Quelle identifiziert. Bei der Anlage CH-03 tauchte in einem Jahr die BHKW-Abluft als emissionsstärkste Quelle auf und im anderen Jahr das Gärrestlager. Bei dieser Anlage war das Gärrestlager nicht-gasdicht gedeckt. Die Fermenter und Nachgärer waren bei diesen drei Anlagen emissionsarm. Bei Anlage CH-02 hingegen, mit gasdichtem Gärrestlager, war es die Fermenterabluft (aufgrund der defekten Doppelmembran), welche als emissionsstärkste Quelle detektiert wurde. Auch in den Messungen der Partnerländer zeigten sich nicht-gasdichte Gärrestlager als emissionsstarke Quellen, mit einem Emissionsfaktor von 2.97% des produzierten Methans (Wechselberger_2021, in Vorbereitung). Interessanterweise trägt die am häufigsten aufgetretene Leckage, die Folienanbindung bei Doppelmembranen, nur geringfügig zu den Emissionsfaktoren der Biogasanlagen bei - mit im Median 0.01% der Methanproduktion (Wechselberger_2021, in Vorbereitung).

Eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der beiden Methoden wäre an sich wünschenswert, ist aber aus mehreren Gründen nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Systemgrenzen erfassen die beiden Methoden unterschiedlich viele Methanquellen. Bei der Fernmessung müssen z.B. die Emissionen von nahe bei der Biogasanlage liegenden Tierställen modellhaft berücksichtigt werden, wenn diese messtechnisch nicht getrennt vermessen werden können. Umliegende Methanquellen sind für die Fernmessung nicht immer trennbar von den Anlagenemissionen. In der Schweiz wurden die tierischen Emissionen so gut wie möglich mit dem Treibhausgasemissionsmodell der Agroscope abgeschätzt und bei der Emissionsmodellierung berücksichtigt. Auch in den Partnerländern gab es teilweise Schwierigkeiten bei der «Isolation» der Biogasanlagen. Es wurden dadurch enorm hohe Emissionsfaktoren ermittelt, welche in die weitere Auswertung nicht miteinbezogen wurden. Es wurde danach bei der Auswahl der anderen landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland und Österreich darauf geachtet, dass sie keine Tierbestände in der Nähe der Biogasanlage aufwiesen. Die Ergebnisse der Schweiz sind demnach mit einer etwas grösseren Unsicherheit behaftet als die Fernmessergebnisse aus den Partnerländern. Bei der On-site Messung hingegen (nach Metharmo-Protokoll) können häufig aufgrund der zeitintensiven Methodik nicht alle Anlagenkomponenten vermessen werden. Man konzentriert sich daher auf die wichtigsten Leckagen. Dadurch gibt es Unsicherheiten bei der Hochrechnung auf die Gesamtanlage und man verwendet die On-site Ergebnisse besser für die Entwicklung von komponentenbezogenen Emissionsfaktoren. Für die Schweizer On-site Messungen wurden Anlagenemissionen auch nur deswegen ausgewiesen, weil jeweils die gesamte Anlage vermessen wurde. Von einem Vergleich der Fernmess- und On-site Ergebnisse pro Anlage wurde daher abgesehen.

Die Ergebnisse des EvEmBi-Projekts zeigten keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Methanproduktivität einer Biogasanlage und des Methanemissionsfaktors. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Studie von Flesch_2011, welche feststellte, dass zwar im Durchschnitt 3.1% der Biogasproduktion bei der untersuchten Anlage verloren gingen, dass allerdings kein Zusammenhang zwischen Gasproduktion und Emissionsrate festgestellt werden konnte. Scheutz_2019 hingegen stellten bei ihren Untersuchungen der Methanemissionsraten von landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Abwasserreinigungsanlagen einen Zusammenhang zwischen Grösse der Anlage und Höhe der Emissionen fest. Dabei waren die Emissionsraten bei grösseren Anlagen niedriger als bei kleineren Anlagen. Die Autoren vermuteten, dass grössere Anlagen aufgrund einer erfolgreicherer Wirtschaftlichkeit eine bessere Wartungsleistung erzielen.



Der Zusammenhang zwischen Methanproduktion und Methanverlusten war auch bei Scheutz_2019 für die landwirtschaftlichen Biogasanlagen allein nicht sehr eindeutig. Es ist dennoch üblich, z.B. für die Klimabilanz und für den Vergleich verschiedener Biogasanlagen die Emissionsfaktoren mit Bezug auf die produzierte Menge Methan anzugeben. Die Auswertungen für die Publikationen im Gesamtprojekt werden daher auch mit den Emissionsfaktoren in % CH₄ der Produktion gemacht.

Die Auswertung der Emissionsminderungsmassnahmen im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse zeigte, dass sich Investitionen in Reparaturen immer lohnen. Je höher die finanzielle Vergütung des Energieprodukts, desto besser. Investitionen in bauliche Massnahmen lohnen sich vor allem dann, wenn nicht nur das Energieprodukt finanziell vergütet wird, sondern auch die Klimaschutzwirkung im Sinne der eingesparten CO₂-Äquivalente. Dieses Ergebnis ist für die Betreiber sehr interessant und könnte auch entscheidungsrelevant werden. Es würde sich daher lohnen, bei Reparaturmassnahmen und baulichen Massnahmen jeweils eine Kontrollmessung hinterherzuschalten, damit mit der Zeit noch mehr Massnahmen ausgewertet werden können. Die Sensibilisierung der Anlagenbetreiber führt ebenfalls dazu, dass Massnahmen frühzeitig ergriffen werden. Die internen, von Ökostrom Schweiz durchgeführten, Leckagedetektionen haben gezeigt, dass die Anlagenbetreiber der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz das Angebot (zur Leckagedetektion) und den Verleih von Messgeräten rege nutzen und auch Massnahmen ergriffen werden. Die exakte Lokalisierung der Emissionsstellen ist insbesondere zur Behebung der Leckagen und für die Definition von Massnahmen zur gezielten Emissionsverminderung von zentraler Bedeutung.

6 Schlussfolgerungen und Fazit

Auf methodischer Ebene hat EvEmBi einen wichtigen Beitrag zum verbesserten Verständnis und zur Einordnung des optimalen Einsatzbereichs der Fernmess- und On-site-Methodik bei Emissionsmessungen auf landwirtschaftlichen und gewerblich-industriellen Biogasanlagen geleistet. Auf inhaltlicher Ebene hat EvEmBi die Aufmerksamkeit auf die Dichtigkeit von Biogasanlagen erhöht und das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Emissionsminderungsmassnahmen ermittelt. Dabei zeigte die Auswertung der Emissionsmessungen in den Ländern Deutschland, Österreich, Schweden und der Schweiz, dass eine Unterscheidung in Normalbetrieb und Nicht-Normalbetrieb für die Interpretation der Emissionen relevant ist. Zur Minderung von Emissionen im Normalbetrieb sind bauliche oder technische Investitionen nötig, für nicht-normalbetriebliche Emissionen wie z.B. Leckagen können Investitionen in Reparaturen nötig werden, es sei denn sie können durch Wartungsarbeiten behoben bzw. vermindert werden. Darüber hinaus wurden in Österreich und der Schweiz freiwillige Methanmessprogramme auf- bzw. ausgebaut, welche über das Projektende hinweg Bestand haben und für die Branchen wichtig sind.



7 Literaturverzeichnis

- Clauss_2019 Recommendations for reliable methane emission rate quantification at biogas plants. Clauss, T., Reinelt, T., Lietrau, J., Vesenmair, A., Reiser, M., Flandorfer, C., Stenzel, S., Piringer, M., Fredenslund, A., Scheutz, C., Hrad, M., Ottner, R., Huber-Humer, M., Innocenti, F., Holmgren, M., Yngvesson, J. DBFZ Report No. 33 (2019)
- EBA_2020a Minimum requirements for European voluntary systems for self and external inspection of possible methane emissions on biogas and biomethane plants. European Biogas Association, Brüssel, Belgien (2020). [Minimum-requirements-for-European-voluntary-systems.pdf \(europeanbiogas.eu\)](#)
- EBA_2020b Methane emission mitigation strategies. Information sheet for biogas industry. European Biogas Association, Brüssel, Belgien (2020). [Methane emission mitigation strategies – information sheet for biogas industry | European Biogas Association](#)
- Flesch_2011 Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. Flesch, T.K., Desjardins, R.L., Worth, D. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3927-3935 (2011).
- Häni_2018 Accounting for field-scale dry deposition in backward Lagrangian Stochastic dispersion modelling of NH₃ emissions. Häni, C., Flechard, C., Neftel, A., Sintermann, J., Kupper, T. *Atmosphere* 9 (4): 146 (2018).
- Liebetrau_2013 Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. Liebetrau, J.; Reinelt, T.; Clemens, J.; Hafermann, C.; Friehe, J.; Weiland, P. *Water Science and Technology* 67: 1370-1379 (2013).
- Oester_2018 Methodenbeschrieb Emissionskontrolle Biogas. (V1.0), Oester Messtechnik GmbH, Thun, Schweiz (2018).
- Ökostrom_2021 Positionspapier Methanemissionen: Die Reduktion von Treibhausgasen als Zielsetzung. Genossenschaft Ökostrom Schweiz, Winterthur, Schweiz (2021). [ÖS_Positionspapier_CH4_final.pdf \(oekostromschweiz.ch\)](#)
- Scheutz_2019 Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. Scheutz, C. & Fredenslund, A.M. *Waste Management* 97, 38-46 (2019).
- TRAS 120_2018 TRAS 120. Sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Bonn. (2018)
- Westerkamp_2014 KlimaCH4. Klimaeffekte von Biomethan. Westerkamp, T., Reinelt, T., Oehmichen, K., Ponitka, J., Naumann, K. DBFZ Report Nr. 20 (2014)
- Wechselberger_2021 Methane losses from different biogas plant technologies. Wechselberger, V., Scharfy, D., Anspach, V., Reinelt, T., Dahl, J., Hrad, M. *Chemical Engineering & Technology* (2021). In Vorbereitung.