

Gasanalytik der Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG

**Entwicklung eines Gas-Sensor-Arrays für die kontinuierliche
Überwachung gasförmiger Emissionen aus Biogasanlagen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert durch Az: 34929/01-24 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Fanny Finger & Hagen Amboldt

September 2021

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	34929/01	Referat	24	Fördersumme	147.900,00 EUR
----	-----------------	---------	-----------	-------------	-----------------------

Antragstitel **Entwicklung eines Gas-Sensor-Arrays für die kontinuierliche Überwachung gasförmiger Emissionen aus Biogasanlagen**

Stichworte Emissionen, Überwachen, Messtechnik, Biogasanlagen

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
2 Jahre	01.08.2019	31.07.2021	1

Bewilligungsempfänger Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG
Zwenkauer Straße 159
04420 Markranstädt

Tel 034205/755-0
Fax 034205/755-40

Projektleitung
Hagen Amboldt

Bearbeiter
Dr. Fanny Finger

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Studien Dritter belegen, dass an zahlreichen Biogasanlagen vermeidbare Emissionen auftreten, die es zum Schutz der Umwelt zu vermeiden gilt.

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Biogassensors, der eine kontinuierliche Überwachung der Emissionen von Biogasanlagen in Echtzeit ermöglicht. Dafür sollte ein virtuelles Gas-Sensor-Array (VGSA) auf Basis eines Metalloxid-Sensors zum Einsatz kommen. Anhand der damit erzielbaren Messergebnisse (48 Messwerte) sollte ein Abgleich mit Geruchsmustern in einer Datenbank und eine Auswertung erfolgen. Daraus resultieren sollte die verlässliche Detektion einer Leckage auf der Biogasanlage.

Wesentlich für den Erfolg der Entwicklung war, dass der Sensor keine signifikanten Querempfindlichkeiten gegenüber Bestandteilen der Umgebungsluft und Witterungseinflüssen (Luftfeuchte) aufweist. Letzteres ist wichtig, um präzise Ergebnisse beim ganzjährigen Außeneinsatz zu gewährleisten.

Um den Einsatz der Sensoren an einer Vielzahl von Biogasanlagen machbar zu machen, sollte die Investition in einen Sensor < 1.000 EUR betragen. Weitere Kriterien für die Technologie waren eine kompakte Bauweise, einfache Installation und Vernetzung mehrerer Sensoren sowie eine intuitive Bedienung.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Auf der Grundlage eines virtuellen Gas-Sensor-Arrays (VGSA) wurde der Prototyp eines Biogas-Messgeräts aufgebaut. Dieser Prototyp wurde im Labor mit Testgasen und mit Biogas ausgiebig charakterisiert. Die Querempfindlichkeit zu Feuchte wurde untersucht.

Nach den sehr erfolgversprechenden Versuchen mit dem Prototypen wurden 10 seriennahe Prototypen aufgebaut (Biogas Sensor Device, BSD 20). Diese wurden zunächst in einer Klimakammer auf Temperatur- und Feuchteinfluss untersucht.

In die BSD 20 wurde ein mesh-fähiges WLAN-Modul integriert. Diese wurden so programmiert, dass sich die BSD 20 direkt miteinander verbinden können und somit auf einfache Art und Weise eine robuste Datenverbindung sicherstellen.

Vor Beginn des Feldtests wurden die 10 Prototypen in einem Technikum installiert, um den Feldtesteinsatz zu simulieren. Mit diesem Aufbau wurden Tests (z.B. gezielte Biogasfreisetzung) durchgeführt, Software und Konfigurationsparameter optimiert.

Nach dem Abschluss der Labortests wurden die BSD 20 im Feld bei einem Industriepartner getestet. Hierzu wurden alle 10 Sensorboxen rund um das Gelände einer Biogasanlage aufgestellt und über mehrere Monate betrieben. Die Messdaten wurden durch das Mesh-Netzwerk gesammelt und vom Mesh-Master via Internet auf eine Datenbank übertragen.

Sobald die Daten in der Datenbank waren, konnte die Auswertung und Visualisierung erfolgen.

Ergebnisse und Diskussion

Es wurde mit den Prototypen in Laborversuchen gezeigt, dass der eingesetzte USM-VGSA V2.0 Sensor Biogas von anderen Gaskomponenten unterscheiden kann. Der Sensor zeigt keine signifikanten Quersensitivitäten gegenüber Feuchte oder anderen zu erwartenden Messgaskomponenten. Im Feldtest hat sich gezeigt, dass das Sensorsystem eine stabile und langlebige Performance aufweist sowie die möglichen Drifteffekte ausreichend korrigiert werden können.

Mit dem Feldtest konnte zudem gezeigt werden, dass sich die Methode für eine kontinuierliche Überwachung einer Biogasanlage eignet. Biogas-Ereignisse sind in den Felddaten gut zu erkennen. Ein Rückschluss auf eine quantifizierbare Menge an freigesetztem Biogas kann nicht getroffen werden. Mittels einer speziellen Auswertemethodik und anschließender komponentenspezifischer Skalierung konnte jedoch das Biogassignal hinreichend modifiziert werden. Somit wird dem Anlagenbetreiber anhand eines Ampelsystems eine Entscheidungshilfe hinsichtlich möglicher Gasleckagen zur Verfügung gestellt.

Die entwickelte WLAN-Mesh-Technik zur Datenübertragung hat sich im Feldtest als praktikabel erwiesen. Der Installationsaufwand an einer Anlage wird dadurch stark vereinfacht, die Datenübertragung funktioniert zuverlässig. Die Daten der 10 Prototypen im Feldtest konnten auf anschauliche Weise visualisiert werden. Somit ist ein intuitives Verständnis der großen Datenmengen möglich.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Während der Projektlaufzeit wurden erste Ergebnisse bei der DBFZ Jahrestagung "Bioenergie zwischen Klimapaket und Bioökonomiestrategie" präsentiert. Mit Abschluss des F&E-Projektes ist geplant, die Ergebnisse auf der Website und dem Unternehmensprofil bei LinkedIn bekannt zu machen. Es ist weiterhin geplant, den BSD 20 auf der ACHEMA 2022 auszustellen. Eine erneute Beteiligung bei der DBFZ Jahrestagung ist in Vorbereitung.

Fazit

Es wurde ein kostengünstiger und kompakter Biogassensor (BSD 20) für die stationäre Messung von Emissionen an Biogasanlagen entwickelt.

Der Sensor ist geeignet in Kombination mit Windsensoren (Gas-Sensor-System) Emissionen zu detektieren und damit Leckage frühzeitig anhand von biogastypischen Geruchsmustern in der Umgebungsluft zu detektieren.

Wenn mehrere Biogassensoren als Sensorsystem auf oder um das Gelände einer Biogasanlage installiert werden, dann können Rückschlüsse auf den Ort bzw. die Lage der Leckage erfolgen. Die Entwicklung weist eine sehr stabile und dauerhafte Messleistung auf. Mittels speziellem Datennetzwerk und Visualisierung werden dem Anlagenbetreiber die Messdaten in Echtzeit sowie geeigneter Art und Weise zur Verfügung gestellt.

Vorteilhaft für den vollumfänglichen Nachweis der Eignung des Biogassensors, für die Detektion von unplanmäßigen Emissionen, wäre die messtechnische Begleitung eines tatsächlichen Ereignisses bei dem signifikant Biogas emittiert wird.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	7
2.	Einleitung	8
3.	Vorhabensdurchführung und Ergebnisse	11
3.1	Entwicklung des Prototyps und Laborexperimente	11
3.2	Mesh-Netzwerk	20
3.3	Feldtest	21
3.4	Bewertung der Technologieentwicklung	30
4.	Übertragbarkeit der Lösung auf weitere Anwendungen	31
5.	Fazit	31
6.	Literatur	32

Anlagen

Anlage 1: Biogasanlage des Industriepartner - Standortbesichtigung und Probenahme am 15.10.2019

Anlage 2: Prototyp und Feldtest-Equipment

Anlage 3: Sicht- und Funktionskontrolle Biogassensoren zum Abschluss des Feldversuchs

Anlage 4: Lageplan Feldtest

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Virtuelles Gas-Sensor-Array (VGSA) [3].	10
Abbildung 2: Prototyp des Biogassensors im 19“-Gehäuse.	12
Abbildung 3: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit trockenen Gasen.	12
Abbildung 4: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche Methankonzentrationen als Polardiagramm.	13
Abbildung 5 Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche CO ₂ -Konzentrationen als Polardiagramm.	14
Abbildung 6: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit Feuchte.	15
Abbildung 7: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche relative Feuchten als Polardiagramm.	16
Abbildung 8: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit Biogas.	17
Abbildung 9: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für verschiedene Biogaskonzentrationen als Polardiagramm.	17
Abbildung 10: Experiment mit Biogasfreisetzung	19
Abbildung 11: Experiment mit Biogasfreisetzung	21
Abbildung 12: Biogassignal von BSD 20 – Nr. 1 ohne Grundlinien-Korrektur (rot) und zugehörige, berechnete Grundlinie (schwarz).	23
Abbildung 13: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 2.	24
Abbildung 14: Biogas-Amplitudenhäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung von BSD 20 – Nr. 2.	25
Abbildung 15: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 2.	26
Abbildung 16: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 6.	27
Abbildung 17: Visualisierung aller Biogassignale auf dem Lageplan der Biogasanlage.	27
Abbildung 18: Taupunkt, Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 3.	28
Abbildung 19: Korrelation Biogas zu Taupunkt unter der Voraussetzung, dass der Wind nicht aus Richtung der Biogasanlage kommt.	29
Abbildung 20: Korrelation Biogas zu Taupunkt unter der Voraussetzung, dass der Wind aus Richtung der Biogasanlage kommt.	29

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

AP:	Arbeitspaket
A. U.:	Willkürliche Einheit (arbitrary units)
BSD:	Biogas Sensor Device
CO ₂ :	Kohlenstoffdioxid
CH ₄ :	Methan
GWP:	Global warming potential, Treibhauspotential im Vergleich zu CO ₂
IR:	infrarot (infrared)
MOX:	Metalloxid
SnO ₂ :	Zinndioxid
UART:	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
VGSA:	Virtuelles Gas-Sensor-Array

1. Zusammenfassung

Die Erzeugung von Energie aus Biomasse in Biogasanlagen ist mit Emissionen (u. a. Methan) verbunden. Ein Teil der Emissionen sind anlagenbedingt, ein anderer Teil wird durch Leckagen und Undichtigkeiten verursacht. Um Leckagen zu erkennen sind periodisch wiederkehrende Kontrollen an den Anlagen empfohlen. Die vollautomatische Überwachung einer kompletten Biogasanlage ist bisher nicht möglich, da die entsprechende Sensortechnik nicht verfügbar ist.

Das Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines Biogassensors, der eine vollautomatische Leckage-Überwachung kompletter Biogasanlagen ermöglicht. Die Sensoren müssen hierzu kostengünstig, kompakt, wartungsarm und einfach zu installieren sein.

Im Biogassensor wurde ein virtuelles Gas-Sensor-Array (VGSA) auf Basis eines Metalloxid-Sensors integriert. Ein solcher Sensor liefert 48 unterschiedliche Messwerte (virtuelle Kanäle) pro Messung. Für jedes Gas ergibt sich so ein individuelles Muster, das zur Gasidentifikation verwendet wird.

Im Projekt wurde mit dem VGSA ein erster Prototyp aufgebaut und im Labor erfolgreich charakterisiert. Es wurden Messungen mit unterschiedlichen Gasen und unterschiedlicher Luftfeuchte durchgeführt. Aus diesen Messungen wurde eine Formel entwickelt, mit der sich aus den 48 Kanälen ein Biogassignal ableiten lässt. Mit dem Wissen aus der Charakterisierung wurde ein seriennaher Prototyp (Biogas Sensor Device, BSD 20) entworfen und in einer Serie von zehn Stück gefertigt.

Diese Version wurde mit einer mesh-fähigen WLAN-Schnittstelle ausgestattet. Hierdurch wird der Installationsaufwand stark reduziert, die BSD 20 müssen zum Betrieb nur noch mit Spannung versorgt werden. Die zehn BSD 20 wurden in der Klimakammer getestet. Es hat sich keine signifikante Abhängigkeit des Biogassignals von Feuchte oder Temperatur gezeigt.

Als Vorbereitung für den Feldtest wurden im Technikum alle zehn Sensoren an Traversen installiert und einem Dauerlauf unterzogen. Mit diesem Aufbau wurden Tests (z.B. gezielte Biogasfreisetzung) durchgeführt, Software und Konfigurationsparameter optimiert.

Im Feldtest wurden die BSD 20 im Umfeld der Biogasanlage des Industriepartners aufgestellt und betrieben. Die Messdaten wurden über das Mesh-Netzwerk gesammelt und vom Mesh-Master via Internet auf eine Datenbank übertragen.

In der Analyse der Daten wurde dann für jede Sensorbox/jeden Biogassensor ein Biogassignal berechnet und unter Berücksichtigung von Windgeschwindigkeit und -richtung ausgewertet und dargestellt.

Der Feldtest hat gezeigt, dass sich das entwickelte Sensorsystem (bestehend aus Biogassensoren und Wettersensoren) sowie die genutzten Auswertemethoden für eine kontinuierliche Überwachung von Emissionen an Biogasanlagen eignen. Eine genaue Quantifizierung der Frachten ist nicht möglich, jedoch sind Emissionsquellen gut lokalisierbar.

2. Einleitung

An Biogasanlagen entstehen je nach verwendeter Technologie sowie Art und Weise des Anlagenbetriebes temporär oder dauerhaft Emissionen. Zu den Emissionen zählen klimarelevante Verbindungen wie Methan, Kohlenstoffdioxid und Lachgas sowie Ammoniak und Schwefelwasserstoff.

Emissionen können bei einem unplanmäßigen Betrieb, Leckagen und/oder Undichtigkeiten auftreten. Häufige Ursache von Emissionen sind Gasverluste, die auf undichte Folienabschlüsse zurückzuführen sind, durch Löcher in der Folie des Fermenterdachs entstehen oder an Verrohrungen auftreten.

Untersuchungen zeigen, dass durch Undichtigkeiten an Biogasanlagen Gasverluste in Höhe von bis zu 1% auftreten, die in der Regel nicht zu vermeiden sind. Bei einem nicht unerheblichen Anteil an Biogasanlagen entweichen jedoch durchschnittlich etwa 5% des produzierten Biogases unkontrolliert in die Atmosphäre [1]. Gasleckagen bedeuten nicht nur eine erhöhte Explosions- und Brandgefahr (sicherheitstechnischer Aspekt), sondern auch erhebliche Umweltrisiken und dauerhafte wirtschaftliche Einbußen.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie hat einen Leitfaden zur Überwachung von Biogasanlagen veröffentlicht, der unter anderem folgende Maßnahmen zur Emissionsminderung aus dem Fermentationsprozess empfiehlt [2]:

- Eigenüberwachung durch den Betreiber
- regelmäßige Kontrolle (täglich/wöchentlich/monatlich) nach Leckagen
- optische und olfaktorische Kontrolle der exponierten Stellen
- falls vorhanden, Konzentrationsbestimmung von Methan mit einem Handmessgerät
- Visualisierung der Leckagen mittels Gaskamera (Positionsermittlung)

Um Gasverluste an gasbeaufschlagten Anlagenteilen zeitnah zu erkennen und zu beheben, ist eine kontinuierliche, automatische Überwachung von Biogasanlagen notwendig. Eine entsprechende Empfehlung ist in dem Leitfaden des Sächsischen Landesamtes nicht enthalten. Dies liegt u.a. daran, dass eine entsprechende Messtechnik aktuell auf dem Markt nicht verfügbar ist.

Zu den verfügbaren Techniken zur Leckagebestimmung zählen u.a.:

- Geruchskontrolle (erfordert Begehung der Biogasanlage)
- Messung mittels Handmessgerät für Methan (erfordert Begehung der Biogasanlage) und
- bildgebende Messtechnik mit IR-Kamera (ist mit hohen finanziellen Aufwendungen verbunden)

Die vorgenannten Technologien eignen sich jedoch nicht für eine flächendeckende, kontinuierliche und automatische Überwachung von Biogasanlagen.

Um eine kontinuierliche Überwachung von Biogasanlagen mit vertretbarem Aufwand zu realisieren, bedarf es einer möglichst einfach zu installierenden, zu bedienenden und zu betriebsenden, aber dennoch genauen und langzeitstabilen Messtechnik. Für die industrielle Applikation sollte die Technologie/Messtechnik keine unverhältnismäßigen Aufwendungen für die Sicht-/Funktionskontrolle und Wartung sowie den Service erfordern.

Wenn eine solche Installation dem Anlagenbetreiber einen wirtschaftlichen Vorteil bringt (reduzierter Personalaufwand zur Anlagenüberwachung, Reduzierung der Biogasverluste), dann ist auf Seiten des Betreibers eine Akzeptanz zu erwarten.

Wie im Antrag für das F&E-Projekt dargestellt, existieren und/oder befinden sich mobile Geräte für die Überwachung von Leckagen in der Entwicklung. Diese nutzen optische Methoden für die Detektion gasförmiger Komponenten in der Umgebungsluft. Die für die temporäre Emissionsmessung eingesetzten mobilen Geräte geben jedoch nur eine Aussage zur Dichtigkeit der Anlage und damit zu den Emissionen zum Zeitpunkt der Messung. Potenziell nach der Messung eintretende Leckagen bleiben im schlechtesten Fall bis zur nächsten temporären Messung unerkannt.

Optische Messverfahren (insbesondere IR-basierte Methoden) haben grundsätzlich den Nachteil, dass die Lufttemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Präzision des Messergebnisses hat. Weiterhin bedürfen optische Verfahren in der Regel einer aufwendigen Konditionierung der Luft (Messgas).

Fernmesstechnische Technologien gehen dagegen mit vergleichsweise hohen Messunsicherheiten einher. Wenn damit Emissionen detektiert werden, dann ist nachfolgend für die genaue Lokalisierung der Leckage zusätzlich der Einsatz mobiler Technik notwendig. Die mit diesem Ansatz verbundenen Kosten stehen einem „flächendeckenden“ Einsatz langfristig entgegen.

In den letzten Jahren wurden weiterhin kostengünstige Sensoren zur Überwachung von Gasen u.a. für die Luftgütebestimmung im Innenraum, für die Atemdiagnostik (Medizin) und Branderkennung entwickelt. Dabei kommen sowohl IR-Detektoren als auch Metalloxidsensoren zum Einsatz. Diese sind aber nicht für die kontinuierliche Überwachung gasförmiger Emissionen aus Biogasanlagen geeignet.

Im vorliegenden Projekt wurde ein Sensorsystem für das kontinuierliche Monitoring von Emissionen von Biogasanlagen entwickelt und im Feld getestet, welches auf virtuellen Gas-Sensor-Arrays (VGSA, Halbleitersensoren auf Basis von Metalloxiden (MOX)) basiert. Die verwendeten Metalloxide reagieren sensitiv auf reduzierbare Gase.

Derartige MOX-Gassensoren werden im Allgemeinen auf einen gleichbleibenden Wert temperiert. Ändert sich die Gaszusammensetzung, dann bewirkt dies innerhalb der Sensorschicht eine Veränderung der Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit wird mit einer geeigneten elektronischen Schaltung gemessen.

Zur Differenzierung der Gaskomponenten wurden bisher mehrere unterschiedliche Sensoren zu einem Multi-Sensor-Array kombiniert. Jeder einzelne Sensor im Array reagiert dabei auf unterschiedliche Art und Weise auf die reduzierbaren Gase.

Die Sensorbox enthält einen VGSA (Abbildung 1), bestehend aus nur einem einzigen Metalloxid-Sensor. Das Sensorelement wird nicht bei konstanter Temperatur betrieben, sondern es wird fortwährend ein Temperaturprofil realisiert, um eine Sensitivität für unterschiedliche Gaskomponenten zu erreichen. Bei jeder Temperaturstufe wird ein spezifischer virtueller Sensor „erzeugt“ und ein Messwert ermittelt. Die dann insgesamt 48 Messwerte werden ausgewertet und als gasförmige Komponenten bzw. Geruchsmuster identifiziert.

Um eine räumliche Auflösung zu erzielen, sind mehrere Sensorboxen (Sensor-System) einzusetzen.

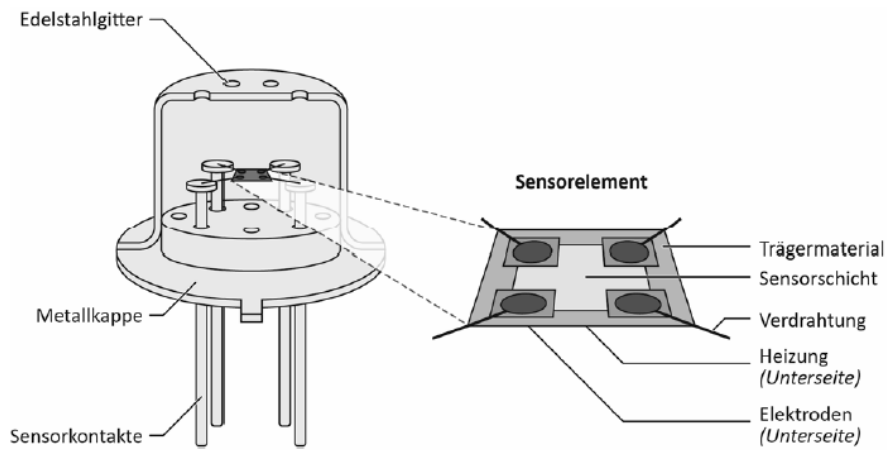


Abbildung 1: Virtuelles Gas-Sensor-Array (VGSA) [7].

3. Vorhabendurchführung und Ergebnisse

3.1 Entwicklung des Prototyps und Laborexperimente

3.1.1 VGSA-Sensor

Die Entwicklung basiert auf einem VGSA-Sensor (Virtual Gas Sensor Array) der Firma UNITRONIC: den USM-VGSA V2.0. Der Sensor verwendet ein Zinndioxid (SnO_2)-Sensorelement. Der Sensor mit Trägerplatine zur Ansteuerung hat die Abmessungen $40 \times 30 \times 25$ mm. Das Modul wird mit einer Spannung von 5 V betrieben und über eine UART-Schnittstelle gesteuert und ausgelesen.

Das Sensorelement wird innerhalb von 19 Sekunden auf 48 unterschiedliche Temperaturen zwischen $300 - 400^\circ\text{C}$ geheizt. Bei ein und demselben Gasgemisch werden in einem Messzyklus 48 verschiedene Messwerte aufgenommen werden. Da Chemi- und Physio-Sorptionsvorgänge am Metalloxid temperaturabhängig sind, kann aus den 48 verschiedenen Messwerten ein Muster ermittelt werden, das einen Rückschluss auf die Gaszusammensetzung und Konzentration erlaubt (Unitronic, 2019).

Die Verwendung eines einzigen Sensorelements im VGSA hat gegenüber Sensor-Arrays mit unterschiedlichen Sensorelementen den Vorteil, dass nur eine Querempfindlichkeit (z.B. zu Feuchtigkeit) und ein Langzeitdrift untersucht und ggf. kompensiert werden muss.

Das USM-VGSA V2.0 ist in der Lage, eine Vielzahl unterschiedlicher Gase zu detektieren. Dazu gehört unter anderem auch Methan. Somit eignet sich das USM-VGSA V2.0 für die Entwicklung und den Einsatz in dem Biogassensor.

3.1.2 Prototyp

Der erste Prototyp des Biogassensors wurde in einem 19“-Gehäuse (Abbildung 2) aufgebaut. Das Messgas wird mittels einer Pumpe über einen Filter ins Gerät gesaugt. Anschließend wird es über ein Drosselventil (zur Einstellung des Gasflusses) und über einen weiteren Filter zum USM-VGSA geleitet. Dieser ist in einem dichten Gehäuse gefasst, so dass er ausschließlich mit dem Messgas in Kontakt kommt. Nach dem USM-VGSA geht die Gasströmung durch einen Durchflusssensor, bevor sie das Gerät verlässt. Im Gehäuse sind auch die Spannungsversorgung, die Pumpenansteuerung und die Auswerteelektronik integriert.

3.1.3 Charakterisierung des Prototyps

Für die Untersuchungen zur Charakterisierung der Eigenschaften des Prototyps wurde ein Laborcontainer ausgerüstet und im Außenbereich aufgestellt. Damit wurden Beeinträchtigungen des Geschäftsbetriebes (Fertigung, Kalibrierung und Prüfung) durch z.B. Freisetzung von Biogas ausgeschlossen.

Im Laborcontainer wurde der Prototyp mit unterschiedlichen Gasen und auch Biogas beaufschlagt und charakterisiert.

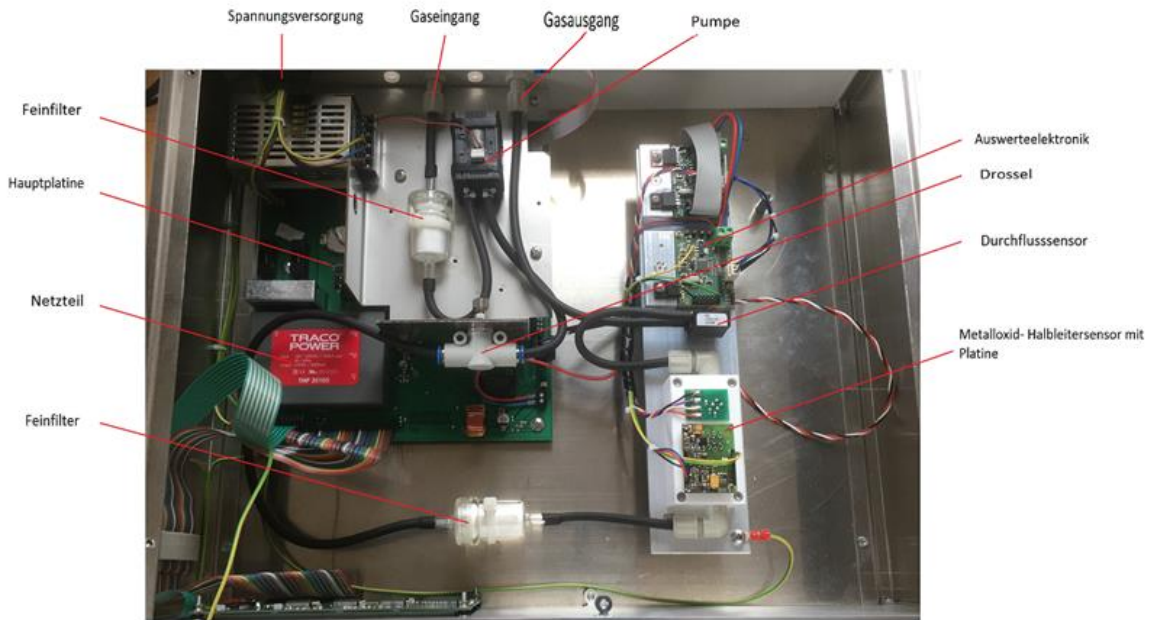


Abbildung 2: Prototyp des Biogassensors im 19"-Gehäuse.

Zur Charakterisierung trockener Gasgemische wurde der Aufbau gemäß Abbildung 3 verwendet. Als Trägergas diente jeweils Stickstoff (N_2), da dieser mit dem MOX-Sensor nicht oxidiert werden kann und somit keine Signaländerung am MOX-Sensor hervorruft.

Mittels des Kalibrierungsgasgenerators HovaCal der Firma IAS GmbH wird ein Gemisch aus Stickstoff und Messgas hergestellt. Der Volumenstrom des gemischten Gases ist grösser als der Gasfluss im Prototypen: das Messgerät wird überströmt.

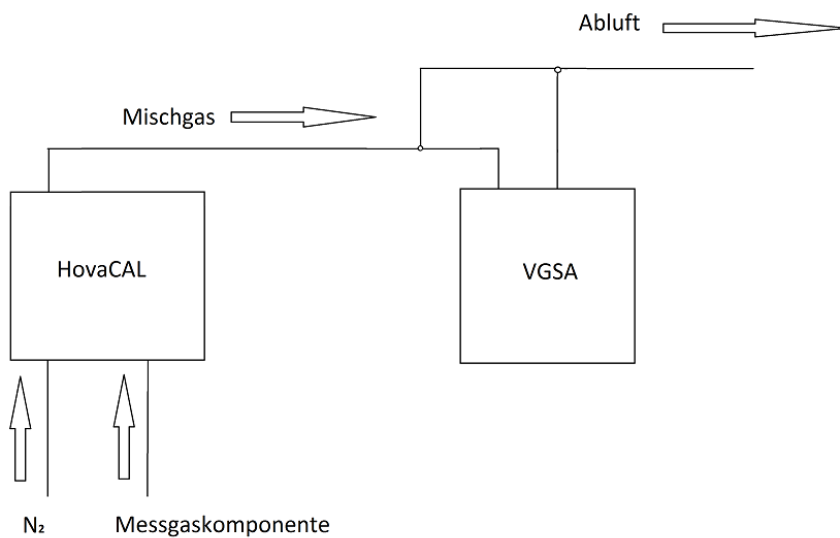


Abbildung 3: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit trockenen Gasen.

Die Messwerte des VGSA-Sensors werden in Polardiagrammen dargestellt (Abbildung 4).

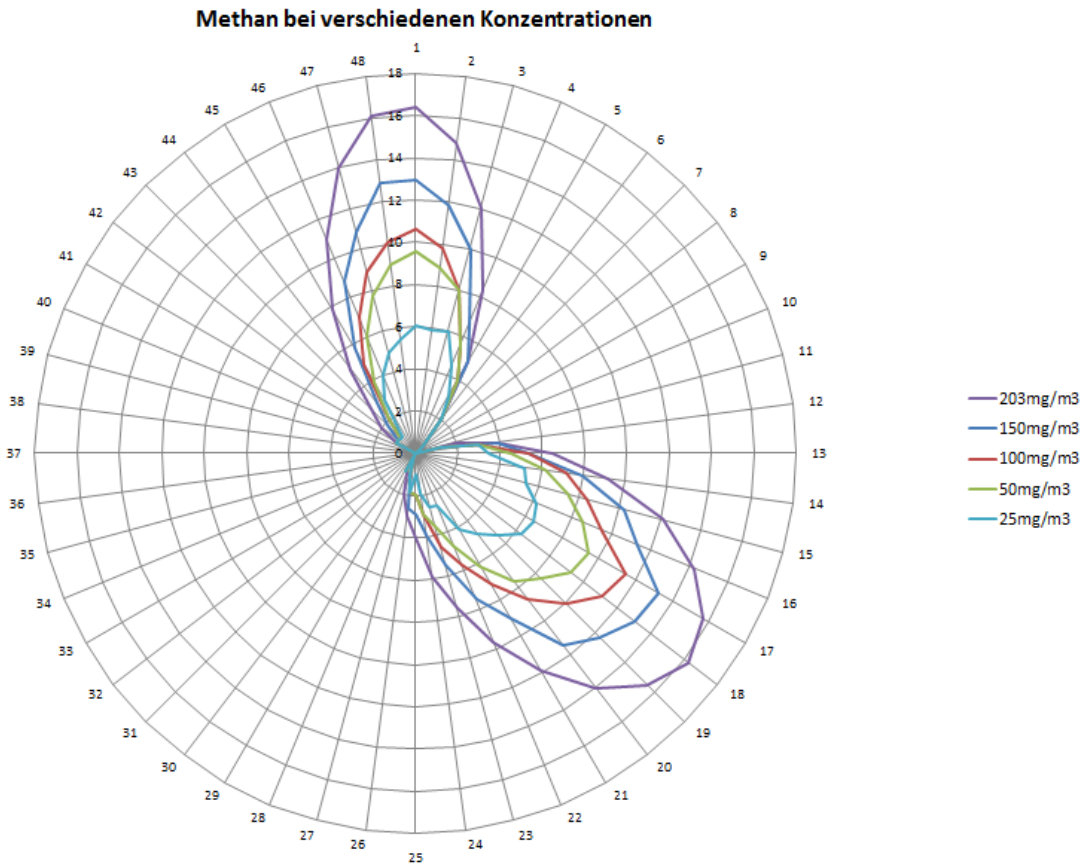


Abbildung 4: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche Methankonzentrationen als Polardiagramm.

Zur Darstellung der charakteristischen Antwort des USM-VGSA auf ein Gas werden die Messwerte für jeden der 48 Kanäle jeweils unter einem anderen Winkel in einem Polardiagramm aufgetragen. Je größer die Amplitude eines jeweiligen Kanals ist, umso größer ist der Abstand zum Mittelpunkt. Ein Wert von 0 entspricht jeweils der Antwort eines jeden Kanals bei 100 Vol.% Stickstoff. In Abbildung 4 ist die VGSA-Antwort für unterschiedliche Methankonzentrationen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass

- einige Kanäle klar auf Methan reagieren,
- mit zunehmender Konzentration das Signal zunimmt
- und sich ein Muster ergibt, das zwei Keulen gleicht, die ihr Maximum bei Kanal 1 und 48 sowie 17 und 18 haben.

Somit ergibt sich ein charakteristisches Muster für die Detektion von Methan. Der Prototyp wurde auch mit Kohlenstoffdioxid (CO_2) charakterisiert, da CO_2 ebenfalls einen signifikanten Bestandteil von Biogas darstellt.

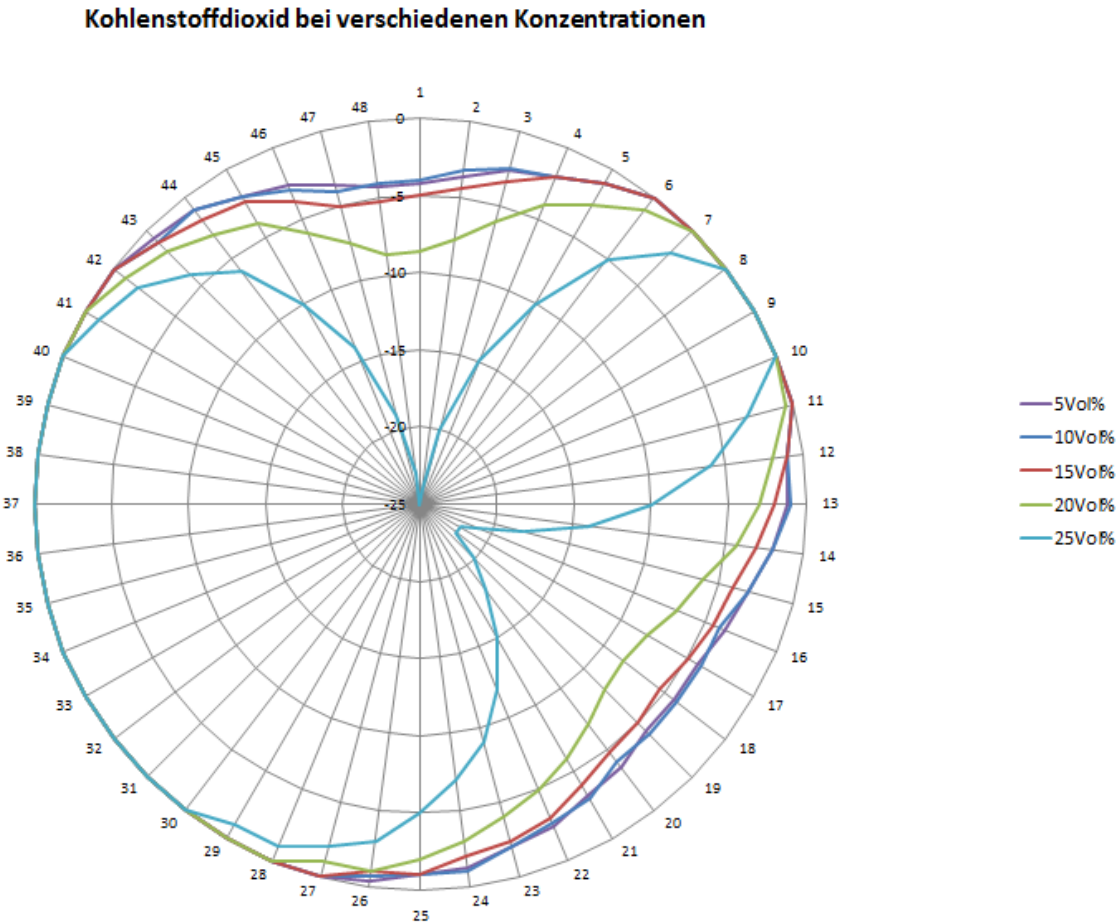


Abbildung 5 Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche CO_2 -Konzentrationen als Polardiagramm.

Für CO_2 ergibt sich ebenfalls ein charakteristisches Muster (Abbildung 5):

- Alle Werte, die von Null abweichen, sind negativ.
- Im Vergleich zu Methan sprechen andere Kanäle auf CO_2 an.
- Die Signal-Amplitude ist nicht linear abhängig von der Konzentration.

Zur Charakterisierung des Einflusses von Feuchte auf den USM-VGSA wurde ein leicht modifizierter Aufbau verwendet (Abbildung 6). Der Stickstofffluss wird aufgeteilt, ein Teilfluss wird befeuchtet, anschließend werden die Flüsse wieder gemischt. Auch hierbei wird der Prototyp überströmt.

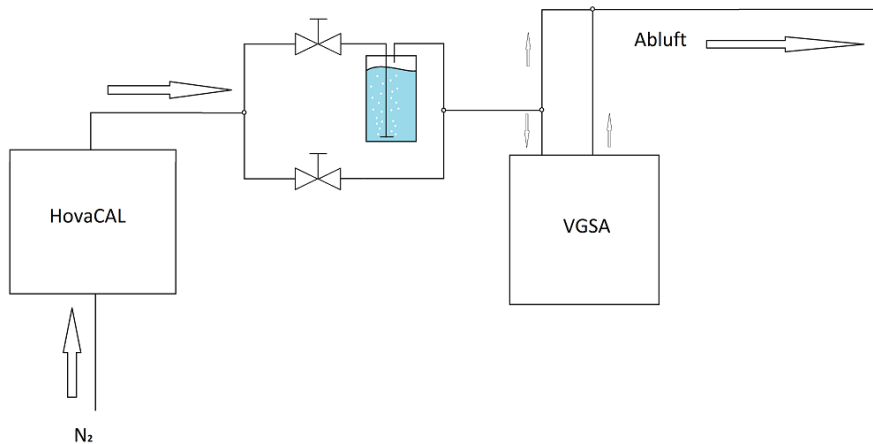


Abbildung 6: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit Feuchte.

Für befeuchteten Stickstoff (Abbildung 7) ergibt sich, dass

- einige Kanäle klar auf den befeuchteten Stickstoff reagieren,
- mit zunehmender Feuchte das Signal zunimmt,
- sich ein Muster ergibt, das zwei Keulen gleicht, die ihr Maximum bei Kanal 47 sowie 19 und 20 haben,
- und sich die Muster von befeuchtetem Stickstoff und Methan leicht unterscheiden.

Im Projekt wird deshalb immer ein Augenmerk auf die Unterscheidbarkeit von Feuchte und Methan/Biogas gelegt. Sollte diese nicht machbar sein, wäre eine Biogas-Leckage-Detektion auf der Grundlage des USM-VGSA V2.0 nicht möglich.

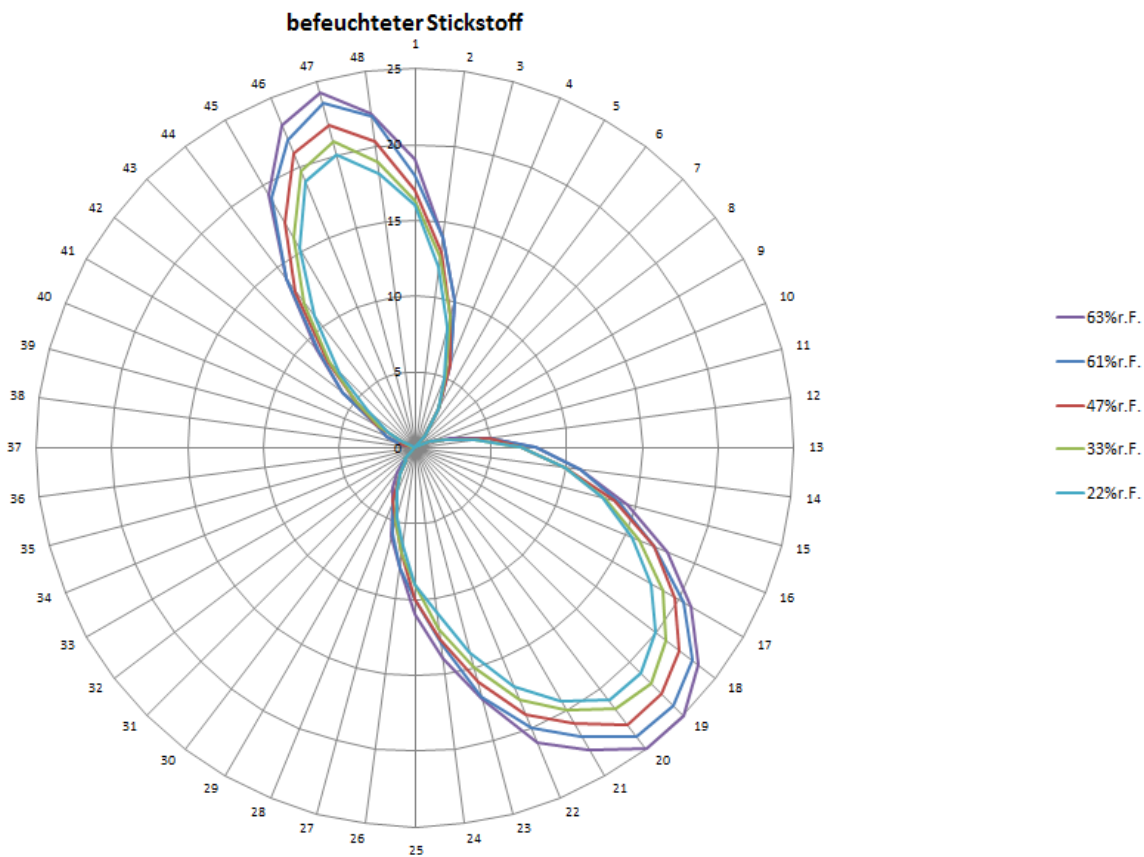


Abbildung 7: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für unterschiedliche relative Feuchten als Polardiagramm.

Für die Laborversuche mit Biogas wurden Biogasproben an der Biogasanlage des Industriepartners entnommen. Die Gasproben wurden in Probenbeuteln transportiert und gelagert. Da die Probenbeutel nicht unter Druck stehen, muss der experimentelle Aufbau im Vergleich zu dem voran beschriebenen Aufbau geändert werden (Abbildung 8). Die Überströmung wird entfernt und der Stickstofffluss am Gasteiler wird kleiner eingestellt als der Gasfluss, der durch die Pumpe im Prototyp erzeugt wird. Somit wird die Differenz des Flusses (zwischen Prototyp und Gasteiler) aus dem Probenbeutel entnommen.

Für Biogas ergibt sich ebenfalls ein charakteristisches Signal-Muster des USM-VGSA (Abbildung 9), dass

- sich klar von Methan und CO_2 unterscheidet,
- mit zunehmender Konzentration stärker wird
- und für zwei unterschiedliche Proben (bei gleicher Konzentration) leicht unterschiedliche Muster liefert.

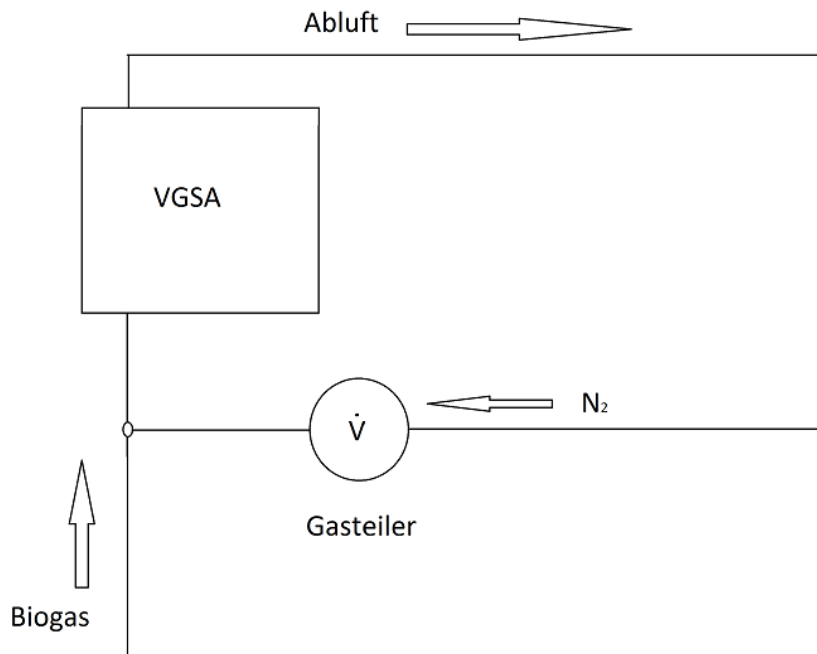


Abbildung 8: Aufbau zur Charakterisierung des Prototyps mit Biogas.

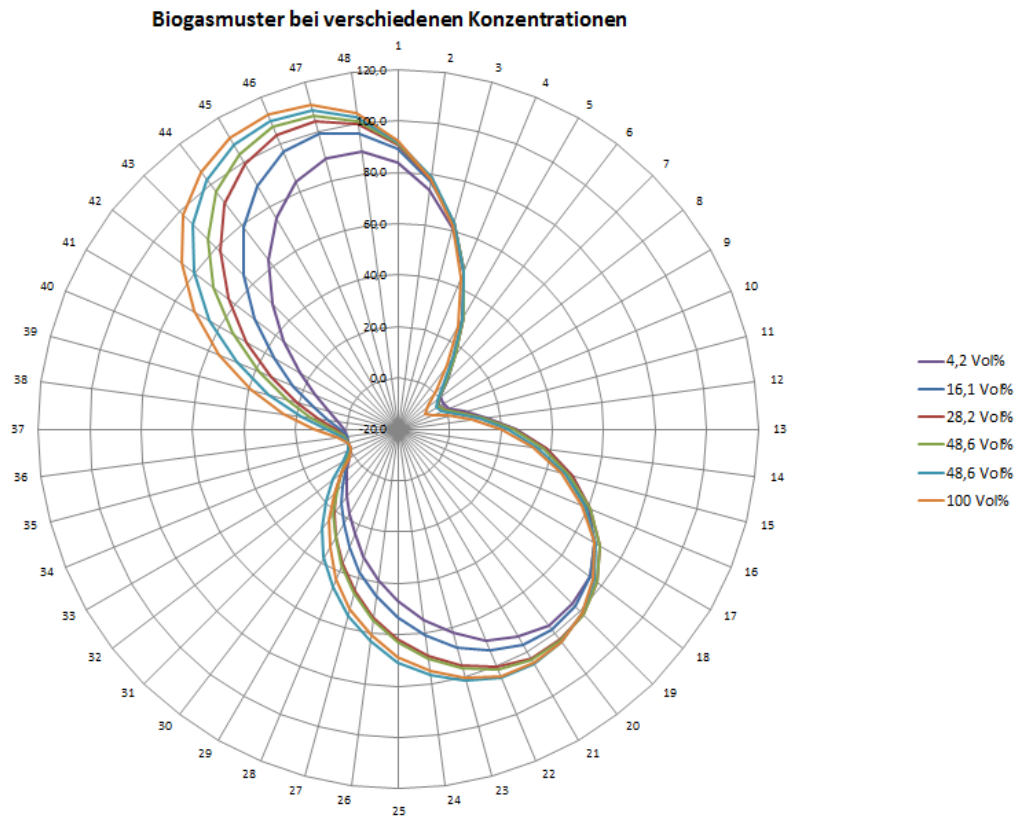


Abbildung 9: Darstellung der 48 VGSA-Messwerte für verschiedene Biogaskonzentrationen als Polardiagramm.

Mittels der Messdaten aus den oben beschriebenen Laboruntersuchungen wurde eine Berechnungsgrundlage entwickelt, um aus den 48 Messkanälen $VGSA_n$ des USM-VGSA ein Biogassignal C_{Biogas} zu berechnen:

$$C_{Biogas} = \sum_{n=1}^{48} |VGSA_n * f_n|.$$

Zu ermitteln waren außerdem die Wichtungskoeffizienten f_n , welche so gewählt wurden, dass Querempfindlichkeiten zu anderen Komponenten wie CO_2 oder Feuchte möglichst gering ausfallen. Die Grundlage hierfür bildet ein chemometrisches Modell, welches mit der Vereinfachung auskommt, dass die Koeffizienten f_n nur die Werte 0 oder 1 annehmen können.

Wenn diese Berechnungsformel für Biogas auf die Messungen mit befeuchtetem Stickstoff angewendet wird, erhält man weiterhin ein Biogassignal $\neq 0$. Somit ist eine Querempfindlichkeit des Biogassignals auf Feuchte gegeben. Dies lässt sich auf Grund der ähnlichen Signal-Muster nicht komplett vermeiden und wurde im weiteren Vorgehen weiter untersucht.

3.1.4 Seriennaher Prototyp

Nach der erfolgreichen Charakterisierung des ersten Prototyps im Labor wurde ein neuer Prototyp entworfen, der dem zukünftigen Serienprodukt sehr ähnelt. Dieser seriennahe Prototyp unterscheidet sich in folgenden Punkten vom ersten Prototypen.

- Das gesamte Gerät wurde in einem kompakten Gehäuse (115 × 80 × 90 mm) aufgebaut, an dem zwei Einlassfilterkartuschen (hergestellt im 3D-Druck-Verfahren) angebracht sind.
- Das Messgas wird am Geräteeingang durch einen großen Fließfilter statt durch einen Inline-Filter von Partikeln gereinigt. Das erhöht die Filter-Standzeit.
- Die Messgasförderung wird mit zwei Lüftern realisiert, da Lüfter wesentlich kostengünstiger und kompakter als eine Pumpe sind und das Messgas im Betrieb automatisch über zwei unterschiedliche Filter geleitet werden kann.
- Es wurde kein Durchflusssensor verbaut. Für die Messungen ist der Volumenstrom nicht relevant, da ein kontinuierlicher Gasaustausch mit der Umgebung stattfindet.
- Es wurde eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle integriert.

Es wurden insgesamt 10 Sensorboxen des BSD 20-Prototyps (Biogas Sensor Device 20) aufgebaut (Abbildung 10, siehe Anlage 2 und 3). Anhand dieser Prototypen konnten weitere Laboruntersuchungen stattfinden als auch ein komplettes Sensorsystem für den Feldtest aufgestellt werden.



Abbildung 10: Experiment mit Biogasfreisetzung.

3.1.5 Nullgasfilter-Test

Um einen möglichen Drift und auch Querempfindlichkeiten im automatischen Messbetrieb erkennen und korrigieren zu können, kann eine regelmäßige Nullpunktsetzung durchgeführt werden. Üblicherweise wird die Nullpunktsetzung durchgeführt, indem ein definiertes Nullgas (z.B. Stickstoff) aus einer Gasflasche periodisch auf den Sensor gegeben wird. Der Einsatzzweck und avisierte Verkaufspreis erlauben jedoch keine Nullgasaufgabe mittels einer Gasflasche. Aus diesem Grund wird ein anderer Ansatz gewählt. Der BSD 20 ist mit zwei Eingangsluftfiltern ausgestattet, die jeweils mit einzeln schaltbaren Lüftern ausgestattet sind. Somit kann das Messgas entweder über den Partikelfilter ins Gerät gelangen, oder es kann über einen Partikelfilter und zusätzlichen Biogasfilter eingebracht werden.

Es wurden im Labor verschiedene Filtermaterialien (z.B. Aktivkohle, Atemkalk (eine Mischung aus Calciumhydroxid und Natriumhydroxid)) auf ihre Funktion als Nullgasfilter für Biogas getestet. Keines der getesteten Filtermaterialmischungen war jedoch in der Lage Biogas ausreichend zu filtern, sodass sich das gefilterte Gas zur Nullpunktgeneration hinreichend eignet.

Um trotzdem ein stabiles Messsignal gewährleisten zu können, wurde auf mathematische Filtermethoden zurückgegriffen, welche erfolgreich im Feldtest eingesetzt werden konnten (siehe 3.3.3).

3.1.6 Klimakammer-Tests

Die 10 Sensorboxen wurden in einem Temperaturbereich von 5 bis 50 °C und einem relativen Feuchtebereich von 22 bis 63 % in der betriebseigenen Klimakammer getestet. Hierbei wurde keine Temperaturabhängigkeit der Sensoren festgestellt, ein störender Temperatureinfluss konnte somit ausgeschlossen werden.

Jedoch hat sich bestätigt, dass die Geräte eine leichte Sensitivität auf Feuchte aufweisen. Die erwartete Feuchte-Querempfindlichkeit sollte im Feldeinsatz aber deutlich schwächer sein als ein mögliches Biogassignal. Insofern stellte die Feuchte-Querempfindlichkeit kein Problem für den folgenden Feldtest dar.

Sonstige Auffälligkeiten (wie z.B. Drift, Signalinstabilität, untypisches Signalrauschen) wurden in den Klimakammer-Tests ebenfalls nicht festgestellt.

3.2 Mesh-Netzwerk

Die Entwicklung und Integration einer drahtlosen Schnittstelle für den BSD 20 wurde im Zeitplan vorgezogen, um so den Aufbau des Feldversuchs vereinfachen zu können. Des Weiteren konnte die entwickelte Technologie im anschließenden Feldversuch erprobt werden.

Das Ziel der Integration einer drahtlosen Schnittstelle ist es, die Installation und den Betrieb mehrerer BSD 20 für eine kontinuierliche Überwachung mit Live-Datenanzeige so einfach und günstig wie möglich zu gestalten.

Hieraus ergeben sich folgende Anforderungen an die Vernetzung:

- keine Installation von Daten-Leitungen
- Abdeckung einer größeren Fläche mit abschirmenden Bauten (Stahl / Stahlbeton behindern die Ausbreitung von Funkwellen)
- geringe Betriebskosten
- einfache und robuste Installation
- kein Komplettausfall durch Ausfall einzelner Sensoren

Nach dem Abwägen unterschiedlicher Technologien ist die Wahl auf die Verwendung eines WLAN-Mesh-Netzwerks gefallen. Jeder BSD 20 wurde mit einem WLAN-Modul ausgestattet. Die WLAN-Module wurden so programmiert, dass sie sich vollautomatisch zu einem Mesh-Netzwerk zusammenschließen. Ein BSD 20 wird dabei als Master definiert, die anderen arbeiten als normale Mesh-Knoten. Alle Mesh-Knoten können sich, sofern sie in Reichweite sind, untereinander verbinden und senden ihre Daten an den Master. Sollte ein Mesh-Knoten nicht in direkter Reichweite des Masters sein, dienen die anderen Mesh-Knoten als Relais-Station und reichen die Daten an den Master weiter. Die optimalen Routen von jedem Mesh-Knoten zum Master werden automatisch und adaptiv ermittelt. Es ist keine Konfiguration notwendig, sollte ein Mesh-Knoten ausfallen, wird das Routing automatisch angepasst.

Der Mesh-Master hat die Aufgabe die Daten an eine Datenbank zu übertragen. Dies kann entweder durch eine lokale Installation oder über das Internet erfolgen. Für den Feldversuch wurde dem Mesh-Master ein Mobilfunk-Router mit WLAN-Hotspot zur Seite gestellt. Der

Mesh-Master unterhält eine WLAN-Verbindung ins Mesh-Netzwerk und verbindet sich auf den WLAN-Hotspot. Somit kann der Mesh-Master alle Daten über das Internet an eine Datenbank senden.

3.3 Feldtest

3.3.1 Vorbereitung

Zur Vorbereitung des Feldtests wurden alle 10 Sensorboxen in einer Halle der Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG in einem Abstand von 1,5 Metern aufgebaut und wie im Feldtest geplant angeordnet. Dieser Aufbau diente der Optimierung der Sensor-Software, der Geräte-Konfiguration sowie der Datenübertragung.

Es wurden auch erste Langzeit-Messungen über 14 Tage in der Halle durchgeführt. Es konnten dabei keine unerwarteten Auffälligkeiten oder Probleme festgestellt werden. Insbesondere war kein Driftverhalten der Sensoren zu beobachten.

In einem weiteren Experiment wurde in der Halle gezielt eine kleine Menge Biogas in der Nähe einer Sensorbox freigesetzt. Die nächstgelegene Sensorbox hat wie erwartet stark auf das freigesetzte Biogas angesprochen (Abbildung 11). Auch bei weiter entfernten Geräten war mit einer leichten zeitlichen Verzögerung ein Biogassignal erkennbar, jedoch in abgeschwächter Form. Das entspricht den Erwartungen, dass sich das freigesetzte Biogas mit der Umgebungsluft vermischt und somit verdünnt wird.

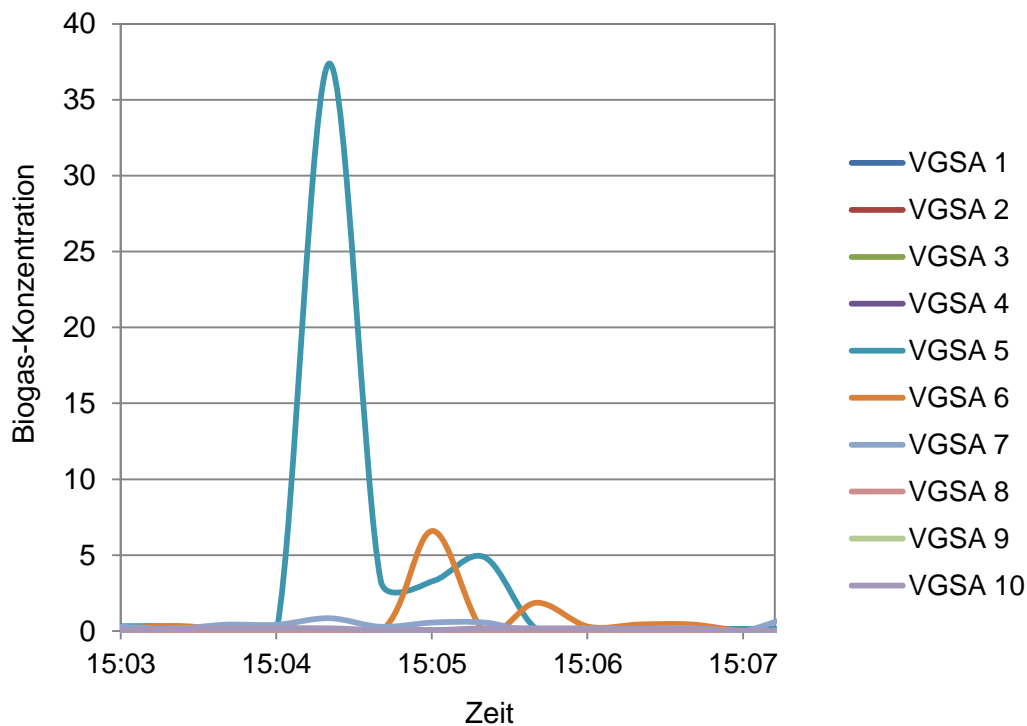


Abbildung 11: Experiment mit Biogasfreisetzung.

3.3.2 Durchführung

Der Feldtest wurde auf der Biogasanlage des Industriepartners durchgeführt. Hierzu wurden die 10 Sensorboxen rund um die Anlage verteilt aufgestellt, die exakten Positionen sind in Anlage 4 angegeben.

Die Sensorboxen wurden freistehend an Masten aufgestellt, sodass sie 2 Meter über dem Boden befestigt waren. Der Sensor Nr. 1 diente als Master-Station, hier ist ein Mobilfunk-Router installiert, der einen WLAN-Accesspoint bereitstellt. Des Weiteren werden an dieser Station die Wind-Daten (Richtung und Geschwindigkeit) gemessen.

Zur Detektion der Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung wurden Sensoren der Firma Meier-NT verwendet. Zur Messung der Windgeschwindigkeit wurde ein Schalensternanemometer mit einer Präzision von 2% FS genutzt. Für die genaue Bestimmung der Windrichtung kam eine Windfahne mit einer Auflösung von 2° zum Einsatz.

Alle Sensor-Stationen verbinden sich untereinander über ein automatisches WLAN-Mesh-Netzwerk und übermitteln die Messwerte an Station Nr. 1, wo sie über das Internet in eine Datenbank übertragen werden.

Die Verwendung eines WLAN-Mesh-Netzwerks ist hier zwingend erforderlich. Durch die Größe der Biogasanlage und die Bauten (Fermenter, Gärbehälter usw.), die sich zwischen den Stationen befinden, ist es nicht möglich alle VGSA-Geräte direkt mittels WLAN auf den Router zu verbinden. Das entwickelte, automatische Mesh-WLAN hat hier den großen Vorteil, dass jeder Sensor die Reichweite des WLANs erhöht und dass keine manuelle Konfiguration des Meshs erfolgen muss.

Zu jedem der 10 Masten wurde eigens für den Feldtest eine 230 V-Leitung verlegt. Am Mastfuß, in einem zusätzlichen Gehäuse, ist ein 12 V-Netzgerät für die jeweilige Sensorbox untergebracht.

3.3.3 Ergebnisse

Der Datensatz, der während des Feldtests gesammelt werden konnte, ist sehr umfangreich und besteht aus insgesamt 325 MB komprimierter Daten. Für eine detaillierte Analyse der Feldtestdaten wurde aus den 48 Kanälen je Sensorbox jeweils das Biogassignal nach bereits beschriebener Methode berechnet. Alle Messdaten (Biogaskonzentration, Windrichtung, Windgeschwindigkeit) wurden anschließend zu Minutenmittelwerten zusammengefasst.

Im Folgenden werden die Verrechnungsschritte und die daraus resultierende Auswertemethodik anhand der ermittelten Feldtestdaten dargelegt.

Baseline-Korrektur:

Es hat sich gezeigt, dass das Biogassignal zwar über einen gewissen Zeitraum eine stabile Grundlinie hat, diese sich aber, z.B. nach einem Neustart des Systems, verändern kann (Abbildung 12). Es wurde eine sogenannte Baseline-Korrektur angewendet, wobei die Grundlinie nachträglich rechnerisch korrigiert wurde. Hierzu können Zeitabschnitte mit einer stabilen Grundlinie genutzt werden. Der Mittelwert dieser Grundlinie wird gebildet und anschließend vom Biogassignal abgezogen. Sobald eine erneute Änderung der Grundlinie erkannt wird, wird ein neuer Mittelwert gebildet und vom Biogassignal abgezogen.

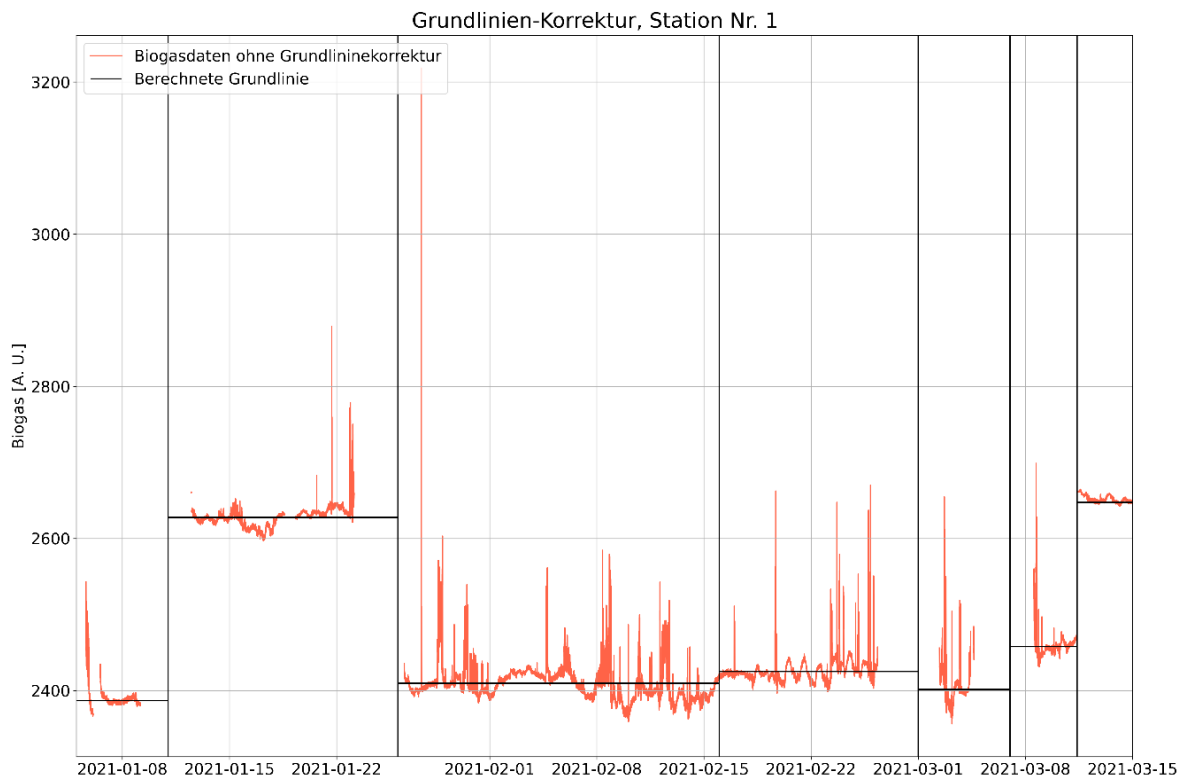


Abbildung 12: Biogassignal von BSD 20 – Nr. 1 ohne Grundlinien-Korrektur (rot) und zugehörige, berechnete Grundlinie (schwarz).

Biogas-Skalierung:

Die Einheit des Biogassignals, das aus den 48 VGSA-Werten berechnet wird, ist erst einmal willkürlich. Jeder VGSA-Wert wird mit 8 Bit dargestellt (ganzzahlige Werte zwischen 0 und 255) und anschließend gemäß Formel 2.1 gewichtet aufsummiert. Damit das Biogassignal im Feldversuch eine intuitive Bedeutung bekommt, wird es anhand eines Experiments skaliert. Dabei wurde vor der Sensorbox Nr. 1 im Luv aus einem Probenschlauch Biogas freigesetzt. Der maximale Biogas-Ausschlag (nach Grundlinienkorrektur) aus diesem Versuch wird gleich einer Biogaskonzentration von 100 % gesetzt. Die Biogassignale aller weiteren Geräte werden mit dem gleichen Faktor skaliert.

Windrichtungsabhängigkeit:

Bei der Bewertung und Interpretation des Biogassignals muss für jeden Sensor der Standort und der Wind berücksichtigt werden. Jede Station hat einen Windrichtungswinkelbereich, bei dem der Wind über das Gelände der Biogasanlage weht, bevor er die Messstation erreicht (Sensorbox „sieht“ die Biogasanlage). Und es gibt einen Windrichtungswinkelbereich, bei dem der Wind nicht über das Gelände der Biogasanlage weht, bevor er die jeweilige Sensorbox erreicht (Sensorbox kann die Biogasanlage nicht „sehen“). Sollte der Wind nicht wehen, ist diese Unterscheidung nicht möglich. Ohne Wind kann keine Richtung angegeben werden, in die eine Sensorbox „sieht“.

Für die folgende Auswertung werden für jede Sensorbox drei Bereiche unterschieden: Sensor kann die Anlage „sehen“, Sensor kann die Anlage „nicht sehen“, Bereich zwischen „sehen“ und „nicht sehen“ (Öffnungswinkel: 20°).

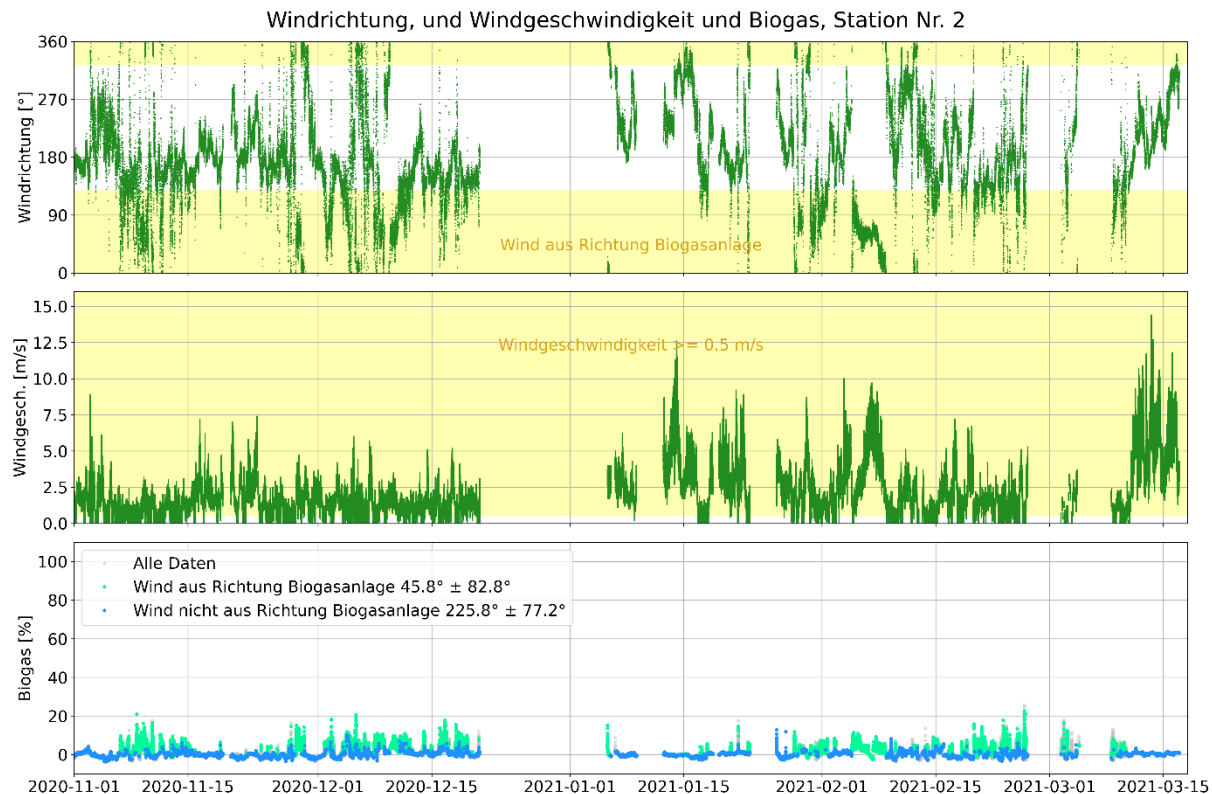


Abbildung 13: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 2.

In Abbildung 13 sind exemplarisch die Biogas- und Windmessdaten einer Station über einen Zeitraum von 4,5 Monaten dargestellt. Die Windrichtungswinkel, unter denen diese Sensorbox die Biogasanlage sehen kann, sind gelb hinterlegt. Windgeschwindigkeiten $> 0,5 \text{ m/s}$ sind ebenfalls gelb hinterlegt. Alle Biogasmesswerte, die ihre Ursache in der Biogasanlage haben können und bei denen die Windgeschwindigkeit $> 0,5 \text{ m/s}$ ist, sind hellgrün im untersten Abschnitt des Diagramms dargestellt. Alle Biogasmesswerte, die ihre Ursache nicht in der Biogasanlage haben können und / oder bei denen die Windgeschwindigkeit $> 0,5 \text{ m/s}$ ist, sind blau dargestellt. Alle Werte, die nicht in die beiden vorhergehenden Kategorien fallen, werden in grau dargestellt. Daraus lässt sich recht klar erkennen, dass die Biogaswerte mit höherer Amplitude meist aus Richtung der Biogasanlage kommen.

Wenn man über den gesamten Messzeitraum ein Histogramm für die Messwerte der beiden ersten Kategorien erstellt, wird dies noch deutlicher (Abbildung 14). Das Maximum der grün schraffierten Verteilung, welche die Messereignisse „nicht aus Richtung der Biogasanlage“ anzeigt, liegt deutlich bei einer Biogaskonzentration um 0%. Die rot schraffierte Verteilung erstreckt sich dagegen bis zu Konzentrationen von maximal 30%. Dies zeigt deutlich die Praktikabilität des Sensorsystems.

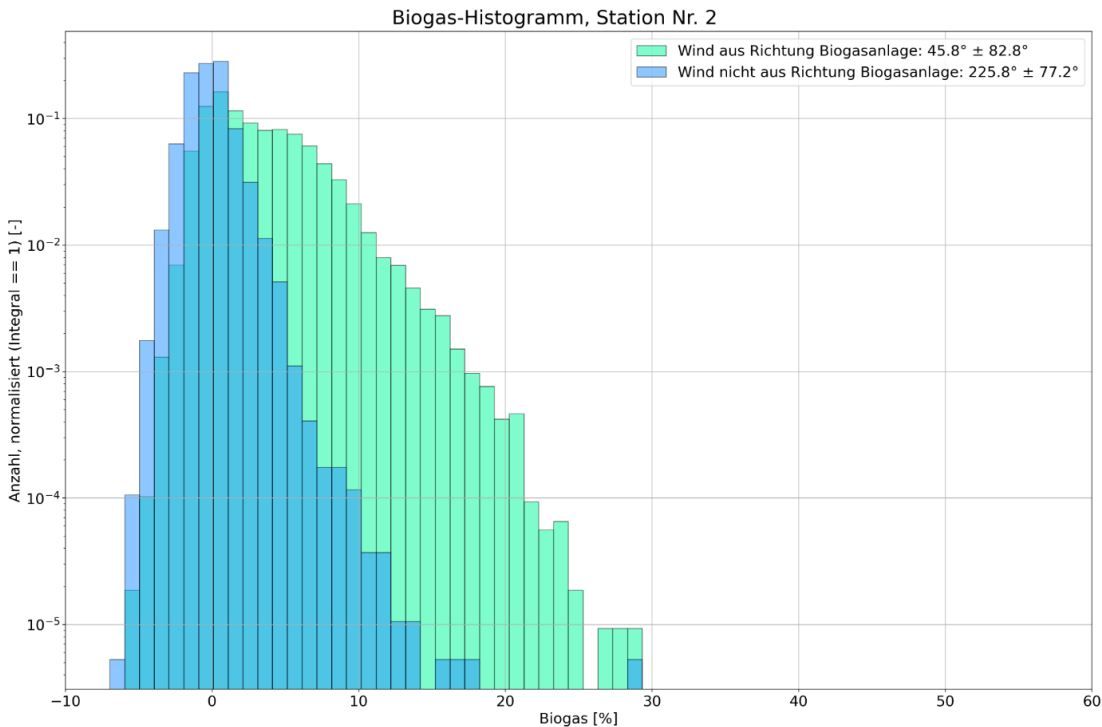


Abbildung 14: Biogas-Amplitudenhäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung von BSD 20 – Nr. 2.

In Abbildung 15 und 16 sind die Biogas- und Winddaten für die Sensoren Nr. 2 und Nr. 6 im selben Zeitraum dargestellt. Hier gibt es ein Vorkommnis, das zu einem Biogassignal von bis zu 8% des Maximalsignals führt (ca. 18.02.2021, 4:10 Uhr). Zudem gibt es einen Winddreher bei einer Windgeschwindigkeit > 0,5 m/s (ca. 18.02.2021, 4:25 Uhr). Hier ist gut zu erkennen, dass jede Sensorbox anspricht, jedoch nur, wenn der Wind jeweils aus Richtung der Biogasanlage weht.

Für eine kundenfreundlichere Visualisierung der Messwerte kann eine Darstellung mittels Lageplan der Biogasanlage verwendet werden (Abbildung 17). Für jede Sensorbox wird der Bereich gekennzeichnet, unter dem sie vom Wind angeströmt wird. Dieser Bereich ist eine mögliche Quelle für ein Biogassignal und wird entsprechend der Biogas-Signalstärke eingefärbt.

Hierzu empfiehlt sich ein Ampelsystem mit drei Stufen:

- grün: sehr niedriges Biogassignal, keine Leckage
- gelb: leicht erhöhtes Biogassignal, Verdacht auf Leckage
- rot: stark erhöhtes Biogassignal, Leckage

Die genaue Zuordnung der Stufen kann mithilfe des Anlagenbetreibers erfolgen, da das Biogassignal ein anlagenspezifischer Parameter und zudem abhängig von der Hintergrundbelastung ist.

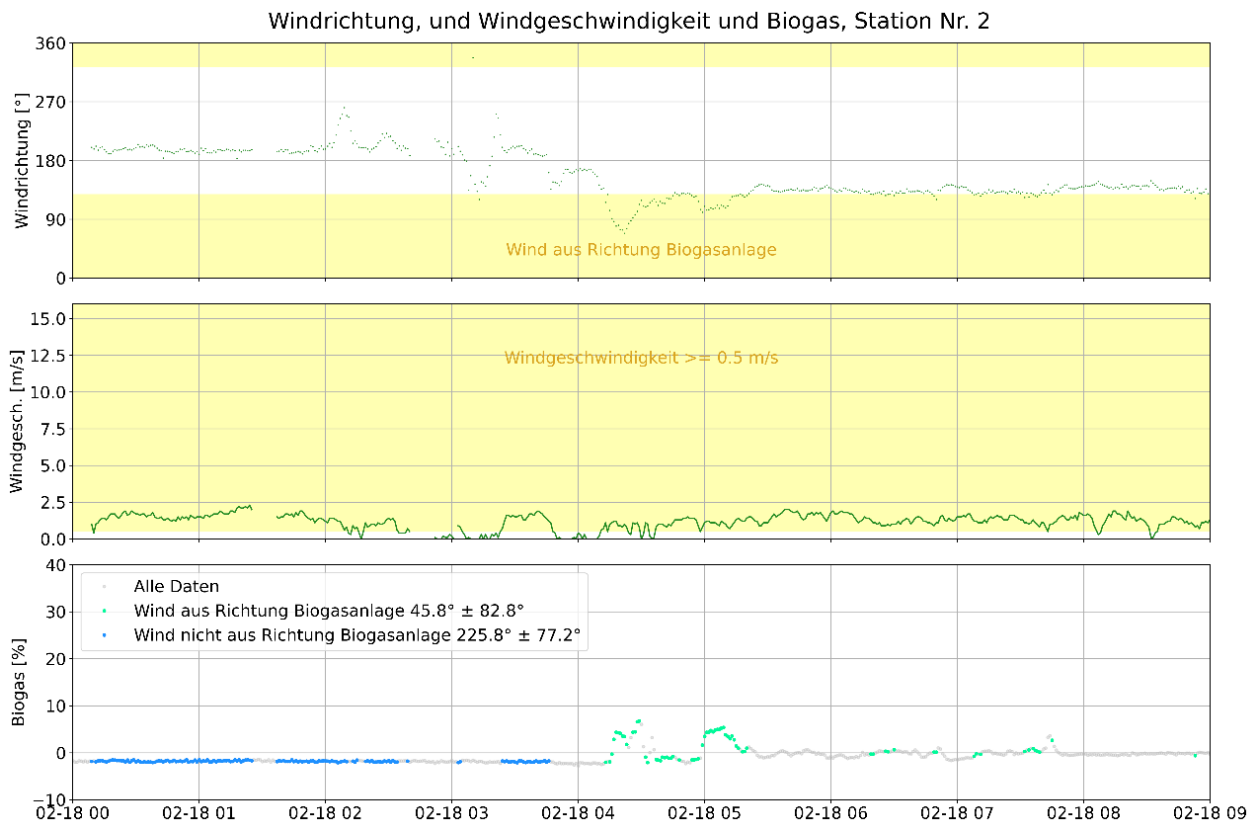


Abbildung 15: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 2.

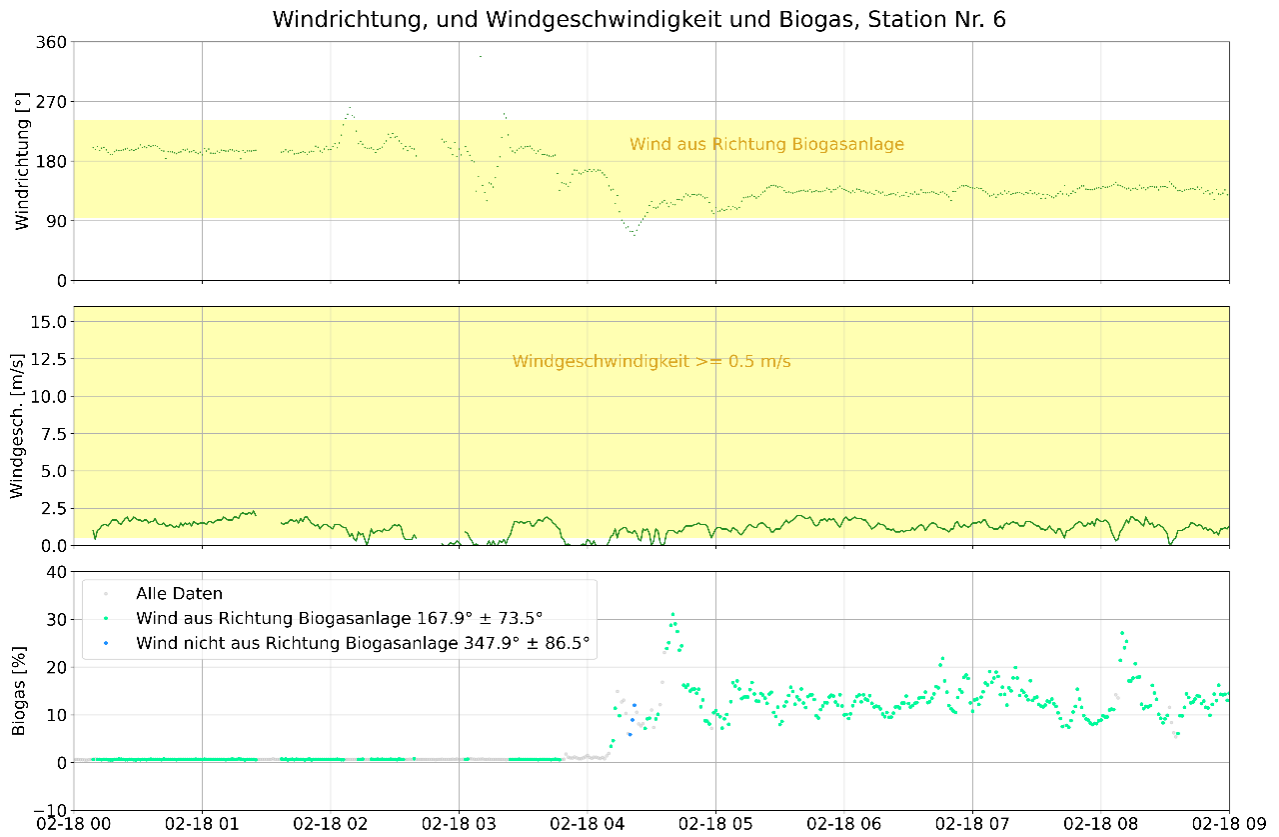


Abbildung 16: Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 6.

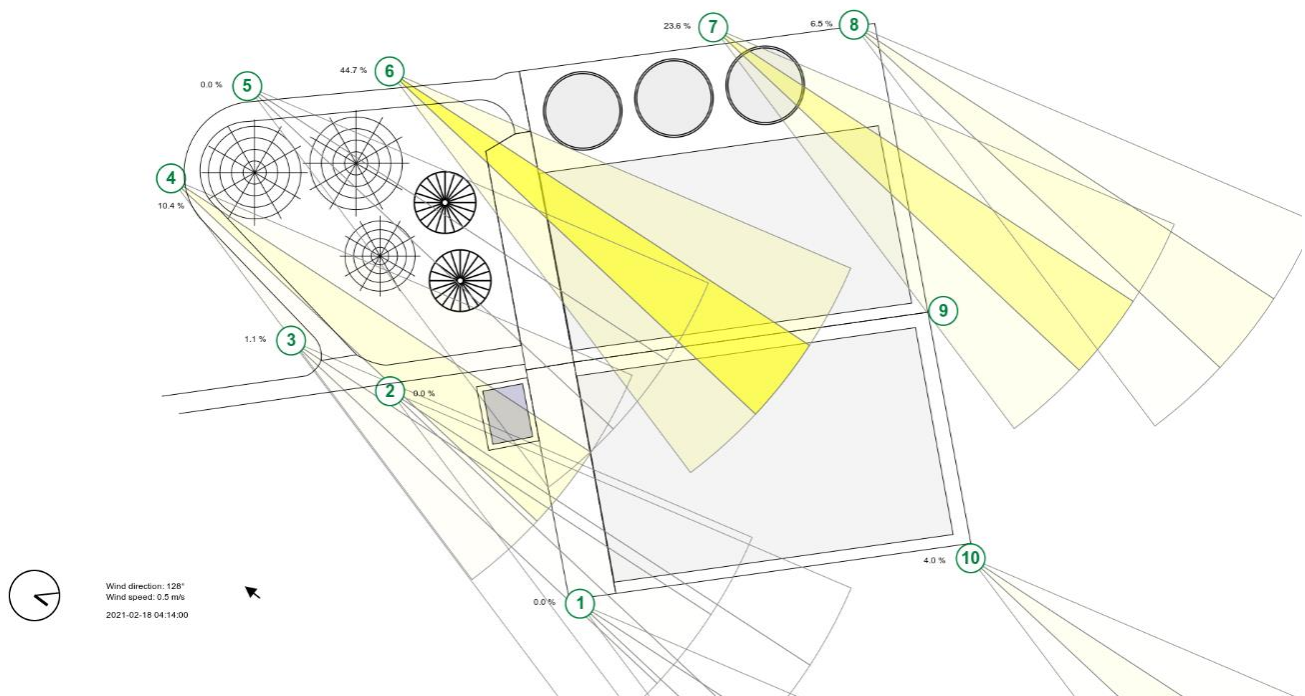


Abbildung 17: Visualisierung aller Biogassignale auf dem Lageplan der Biogasanlage.

Diese Art der Visualisierung kann für zukünftige Anwendungen auch in Echtzeit dargestellt werden.

Feuchte-Analyse:

Da in den Laborversuchen eine Querempfindlichkeit des Biogassignals zur Feuchte festgestellt wurde, ist in Abbildung 18 der Verlauf des Taupunkts dem Biogassignal gegenübergestellt. Für den ausgewählten Zeitraum kann die Sensorbox die Biogasanlage auf Grund der Windrichtung nicht „sehen“, das gemessene Biogassignal entspricht also einer Hintergrundmessung. Man erkennt, dass die Grundlinie des Biogassignals dem Taupunkt folgt, jedoch ist die Änderung mit $\pm 1,5\%$ Biogas recht gering.

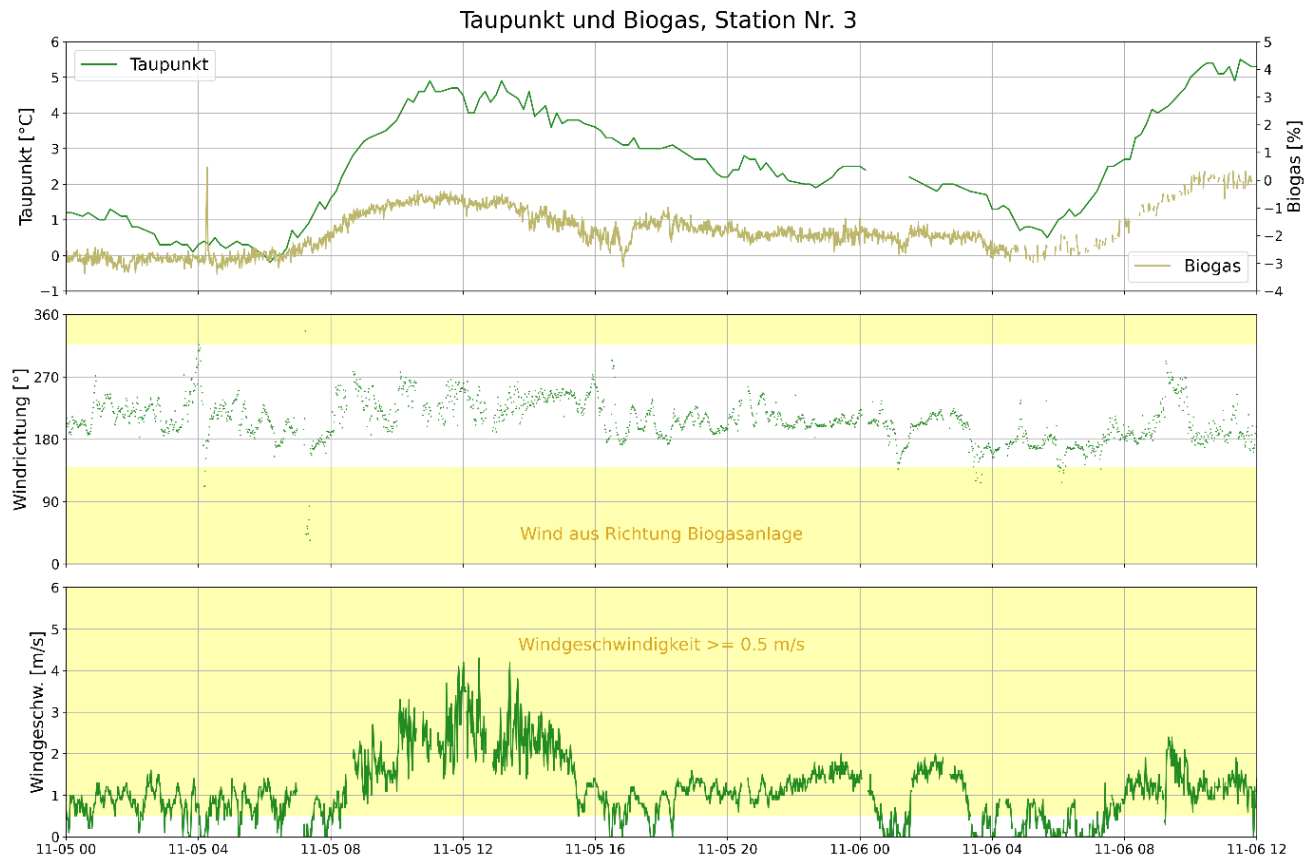


Abbildung 18: Taupunkt, Biogassignal und Windvektor von BSD 20 – Nr. 3.

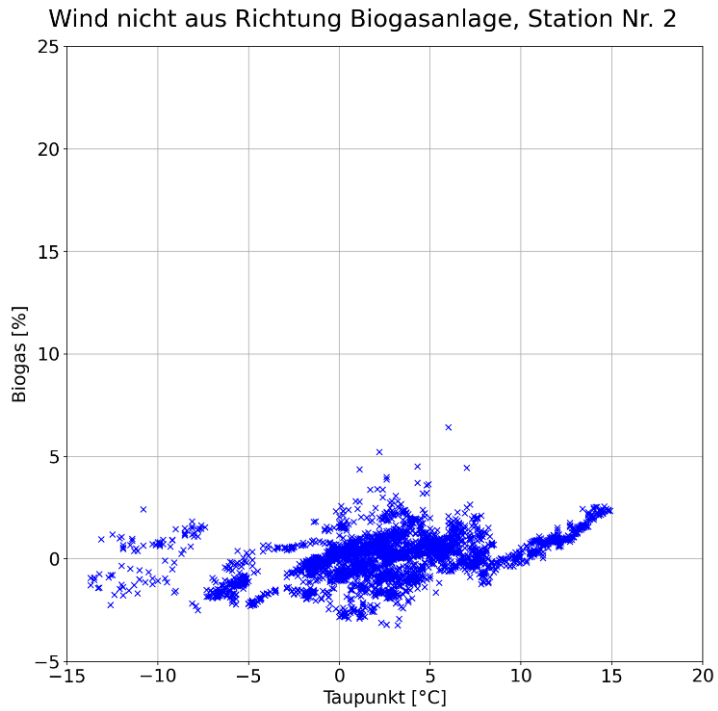


Abbildung 19: Korrelation Biogas zu Taupunkt unter der Voraussetzung, dass der Wind nicht aus Richtung der Biogasanlage kommt.

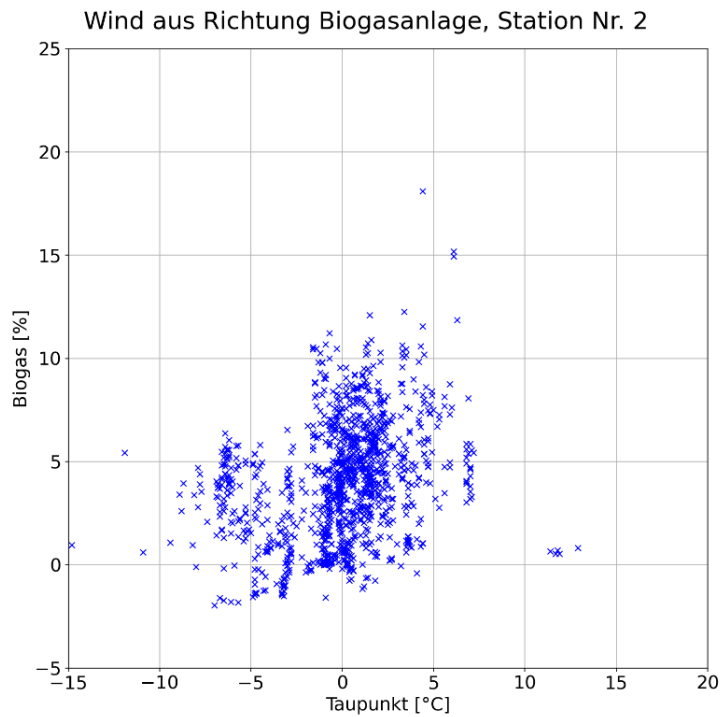


Abbildung 20: Korrelation Biogas zu Taupunkt unter der Voraussetzung, dass der Wind aus Richtung der Biogasanlage kommt.

Zur genaueren Untersuchung eines möglichen Feuchteinflusses wurden folgende Korrelationen herangezogen. Alle Messdaten des Feldversuchs wurden in die Gruppen „Wind aus Richtung Biogasanlage“ und „Wind nicht aus Richtung Biogasanlage“ unterteilt. Anschließend wurden die Korrelationen zwischen dem jeweiligen Biogassignal und dem Taupunkt gebildet (Abbildung 19 und 20). Der Taupunkt dient hierbei als Feuchtemaß.

Es zeigt sich, dass eine schwache Korrelation zwischen Biogas und Taupunkt zu erkennen ist, wenn die Biogasanlage nicht in der nötigen Windrichtung liegt und die Biogaswerte eine eher kleine Amplitude haben. Wenn der Wind jedoch aus Richtung der Biogasanlage weht, die resultierenden Biogassignale also größer sind, ergibt sich keine erkennbare Korrelation.

Dies zeigt, dass die gemessenen Biogassignale nicht signifikant von der Feuchte oder Feuchteänderungen beeinflusst werden. Dies bestätigt zudem die Ergebnisse aus dem Labortest, dass die Abhängigkeit zwischen Sensorsignal und Umgebungsfeuchte vernachlässigbar ist.

3.4 Bewertung der Technologieentwicklung

Im Folgenden wird die Technologieentwicklung bezogen auf die ökologischen, technologischen und ökonomischen Aspekte bewertet.

- Ökologische Aspekte

Eine kontinuierliche Leckageüberwachung von Biogasanlagen hat das Potential unerwünschte Emissionen zu reduzieren. Durch die Reduktion von Leckagen reduziert sich die Freisetzung von treibhausaktivem Methan (GWP_{100} : 28, GWP_{20} : 84) und es erhöht sich der Wirkungsgrad von Biogasanlagen. Somit wird direkt und indirekt ein Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz geleistet.

- Technologische Aspekte

Mit dem entwickelten Sensorsystem ist es möglich, über eine große Fläche hinweg automatisch und günstig Biogas-Emission (ggf. auch andere Emissionen) zu überwachen. Eine aufwendige Installation entfällt. Durch das automatische Mesh-WLAN müssen die Sensoren lediglich mit Spannung versorgt werden, für die Datenübertragung müssen keine zusätzlichen Kabel verlegt werden. Die Geräte haben sich im Feldtest bewährt, sind robust, wartungsarm und leicht nachrüstbar.

- Ökonomische Aspekte

Aktuell werden Biogasanlagen nicht flächendeckend, automatisch und kontinuierlich auf Leckagen überwacht. Häufig wird eine Leckage erst bei periodischen Überprüfungen identifiziert. Hierdurch entstehen dem Biogasanlagenbetreiber Verluste. Durch die automatische, kontinuierliche Überwachung kann der Personalaufwand für periodische Überprüfungen reduziert und der Wirkungsgrad der Anlage erhöht werden.

Die Investitionskosten (Verkaufspreis) für einen Biogassensor liegen aktuell bei manueller Fertigung in einer Kleinserie bei 1.075,00 EUR. Dieser Preis bezieht sich auf die Einzelabnahme von Sensoren. Je nach Umfang und Nebenleistungen von Kundenprojekten sind Projektrabatte möglich. Wenn die Fertigungszahlen die einer Kleinserie übersteigen, dann sind Sensorpreise von bis zu 860,00 EUR zu erwarten.

4. Übertragbarkeit der Lösung auf weitere Anwendungen

Um die klimapolitischen Ziele der EU zu erreichen, gibt es u.a. in Deutschland Strategie zur Minderung der Methanemissionen in den Bereichen Energie, Landwirtschaft und Abfall.

Vorteilhaft für die Entwicklung ist, dass diese neben der Überwachung von Biogasanlagen auch für das Monitoring von Anlagen der industriellen Tierzucht/-haltung, Kläranlagen, Klärschlammverwertungsanlagen (Faulung und Klärgasverwertung) und sonstigen Anlagen bei denen Biogas/Methan emittiert werden können in Frage kommt.

5. Fazit

Im Projekt „Entwicklung eines Gas-Sensor-Arrays für die kontinuierliche Überwachung gasförmiger Emissionen aus Biogasanlagen“ wurde ein kostengünstiger und kompakter Biogassensor (BSD 20) für den stationären Einsatz entwickelt.

Der Sensor ist geeignet in Kombination mit Wettersensoren und einer Auswertesoftware (Gas-Sensor-System) Emissionen von Biogasanlagen zu überwachen und Leckage frühzeitig anhand von biogastypischen Geruchsmustern in der Umgebungsluft zu detektieren.

Wenn mehrere Biogassensoren als Sensorsystem auf oder um das Gelände einer Biogasanlage installiert werden, dann können Rückschlüsse auf den Ort bzw. die Lage der Leckage erfolgen. Die Entwicklung weist eine sehr stabile und dauerhafte Messleistung auf. Mittels speziellem Datennetzwerk und Visualisierung werden dem Anlagenbetreiber die Messdaten in Echtzeit sowie geeigneter Art und Weise zur Verfügung gestellt.

Vorteilhaft für den vollumfänglichen Nachweis der Eignung des Biogassensors, für die Detektion von unplanmäßigen Emissionen, wäre die messtechnische Begleitung eines tatsächlichen Ereignisses bei dem signifikant Biogas emittiert wird.

Biogasanlagen sind nach VDI-Richtlinie 4285 (Blatt 1) sogenannte diffuse Emissionsquellen. Aufgrund der Mischung des Biogases mit Umgebungsluft vom Austrittsort bis zum Sensor (je nach Windrichtung und Stärke) ist ein Rückschluss vom Biogassignal auf eine Austrittsmenge und genauen Austrittsort nicht immer eindeutig möglich. Dies hängt maßgeblich vom Aufbau der Biogasanlage und der Positionierung der Sensorboxen ab.

Um eine schnelle Markteinführung der entwickelten Innovation zu erreichen, ist vorgesehen die Technologieentwicklung durch redaktionelle Beiträge, Vorstellen auf Messen und auf der firmeneigenen Internetseite bekannt zu machen.

Darüber hinaus ist in Zusammenarbeit mit der DBU geplant eine Applikationsnote zu erstellen und direkt an potentielle Multiplikatoren wie die DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH und das Umweltbundesamt zu versenden. Eine Teilnahme am Biogas-Innovationskongress der DBU in Osnabrück ist ebenfalls vorgesehen.

6. Literatur

- [1] IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2016: Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)
- [2] L. u. G. Sächsisches Landesamt für Umwelt, „Leitfaden zur Überwachung von Biogasanlagen,“ 2018.
- [3] I. I. f. E.- u. U. g. i. A. d. Umweltbundesamtes, „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm),“ 2016.
- [4] A. L. u. I. B. i. B. e. V., „Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen,“ 2017.
- [5] G. Wiegand, Gasesstechnik in Theorie und Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [6] VDI-Richtlinie 4285 (Blatt 1)
- [7] Unitronic, „<https://www.unitronic.de/electronics/systeme/sensorik/unitronic-sensor-module/vgsa.html>,“ 2019. [Online]. [Zugriff am 2019]

Anlage 1

Anlage 1: Biogasanlage des Industriepartners - Standortbesichtigung und Probenahme am 15.10.2019



Abbildung 1: Luftbild (Quelle: google maps)



Abbildung 2: Freifläche, linker Hand Wasserspeicher (Blickrichtung Süden)



Abbildung 3: Gärsubstratmischung (Gebäude links im Bild) und im Hintergrund Schrotlagerplatz (Schrot abgedeckt mit Gärresten anstelle mit Folie); Blickrichtung Osten



Abbildung 4: Mischung Gärsubstrat (Betonkuh) und im rechts Hintergrund automatische Dosierung der Fermenter – Schrot plus Gärrestsubstrat (im Bedarfsfall Grundwasser)



Abbildung 5: Massegesteuerte Befüllung der Fermenter mittels Förderschnecken



Abbildung 6: Gärrestbehälter



Abbildung 7: Nördlich der Gärrestspeicher (Blickrichtung Osten)



Abbildung 8: Nördlich der Gasspeicher bzw. Fermenter (Blickrichtung Westen)



Abbildung 9: Gasspeicher und Fermenter



Abbildung 10: Biogaswäsche



Abbildung 11: Nutzung überschüssige Wärme zur Brennholztrocknung (Verweildauer des Holz ca. 14 Tage)



Abbildung 12: Einspeiseanlage (Blickrichtung Westen)



Abbildung 13: Zufahrt/Toranlage (Blickrichtung Westen)



Abbildung 14: Gasspeicher (rechts im Bild) und linker Hand Druckerhöhungsstation (nicht im Bild); (Blickrichtung Nord-Westen)



Abbildung 15: Gasspeicher (rechts im Bild) und in der Mitte die Schaltwarte (Blickrichtung Süd-Westen)

Anlage 2

Anlage 2: Prototyp und Feldtest-Equipment

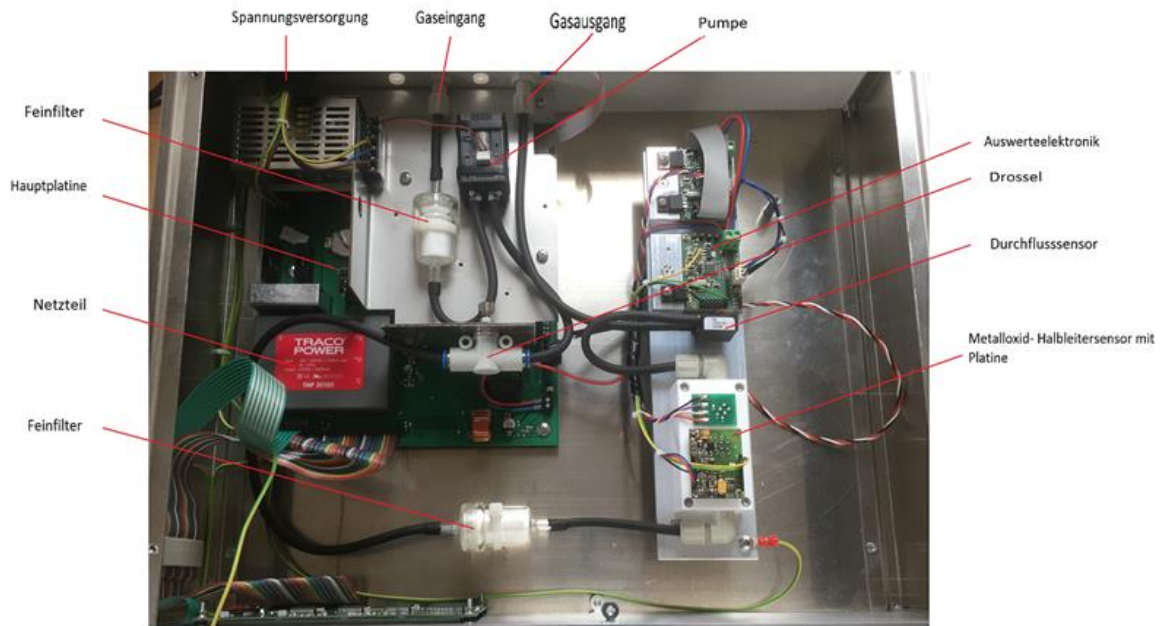


Abbildung 1: erstes Funktionsmuster in einem 19"-Gehäuse

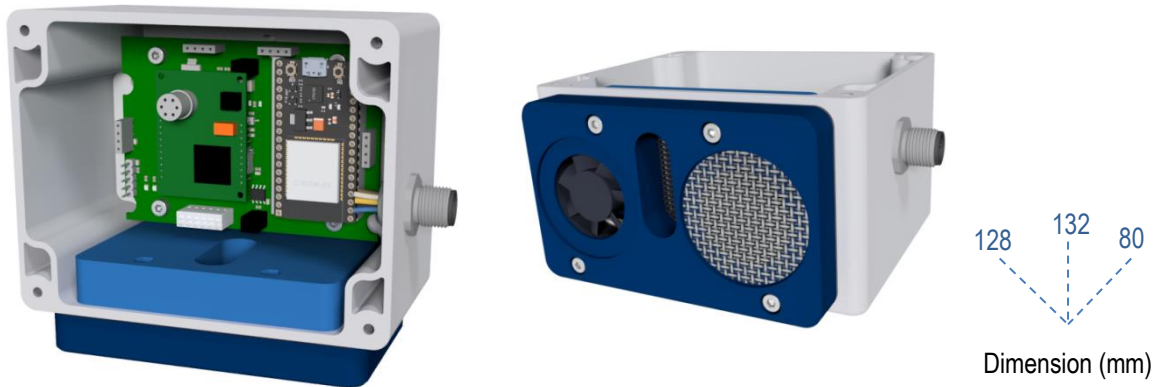


Abbildung 2: Design des deutlich kompakteren Prototyps (Darstellung ohne Kartuschen für die Messgaskonditionierung)

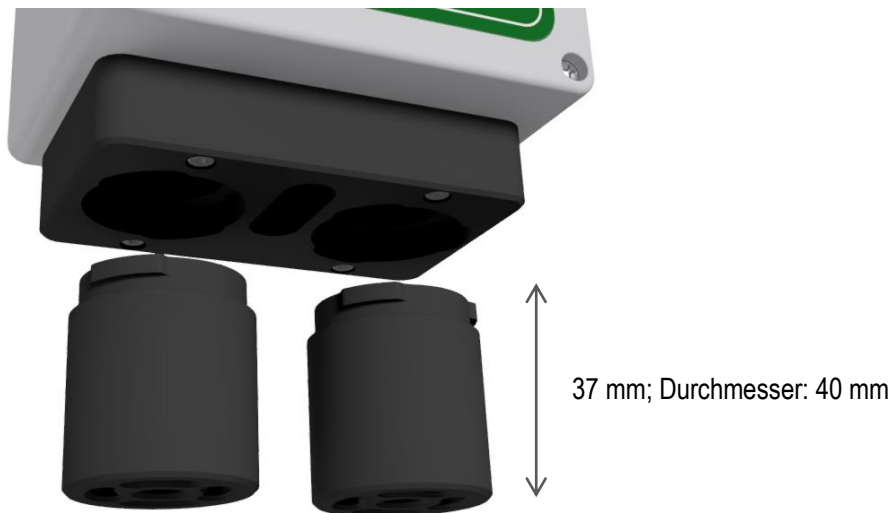


Abbildung 3: 3D-Entwurf der Kartuschen für die Messgas- und Nullgaskonditionierung

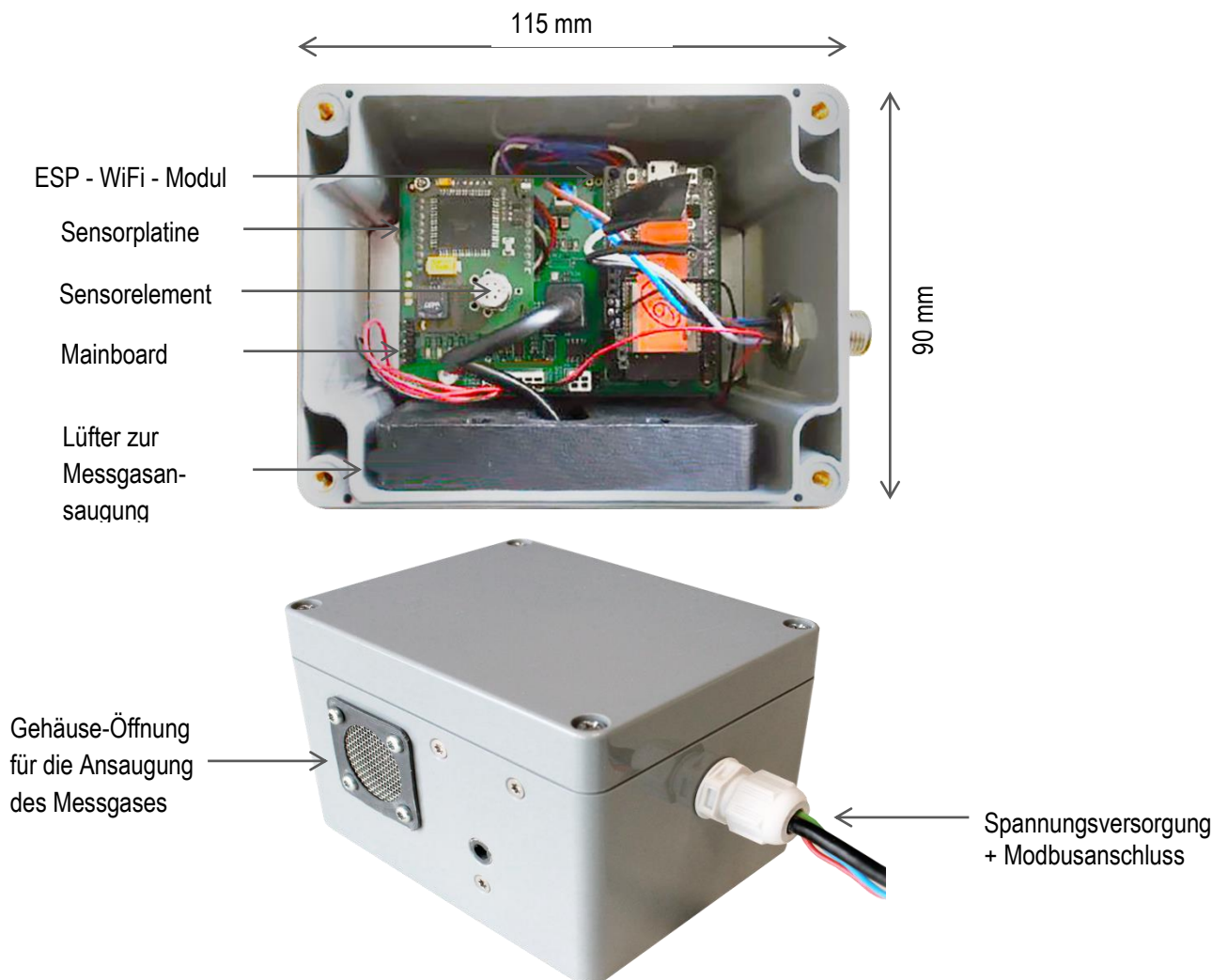


Abbildung 4: erster Prototyp ohne Kartuschen für die Messgas- und Nullgaskonditionierung: Innen- (Bild oben) und Außenansicht Bild unten)



Abbildung 5: erste Funktionstests im Außenbereich



Abbildung 6: Sensoren auf Gestellen montiert für Feldeinsatz



Abbildung 7: Sensor 1 (l. i. B.) mit Windsensoren, ESP-Mastern sowie LTE-Router und Sensor 2 (r. i. B.)



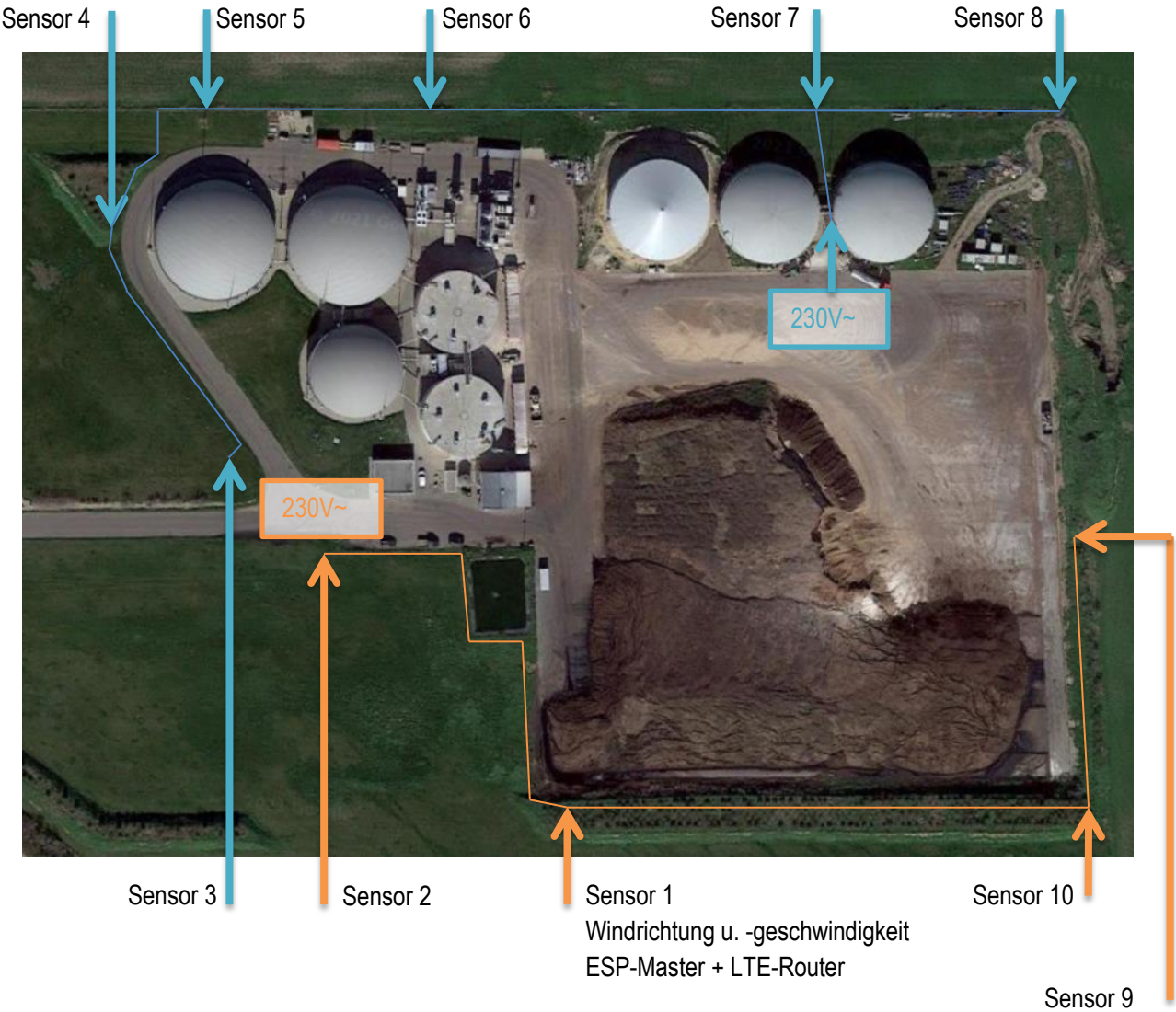
Abbildung 8: Sensor 3 mit Kabelführung per Weidepfosten



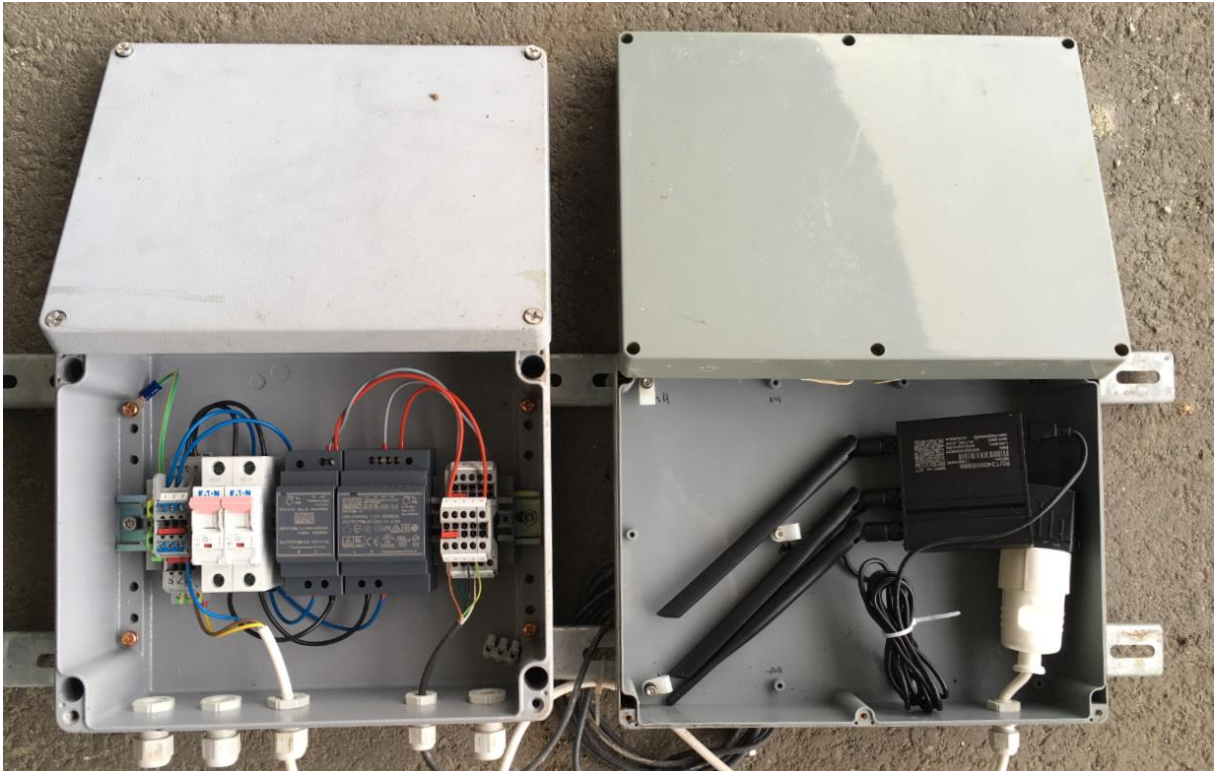
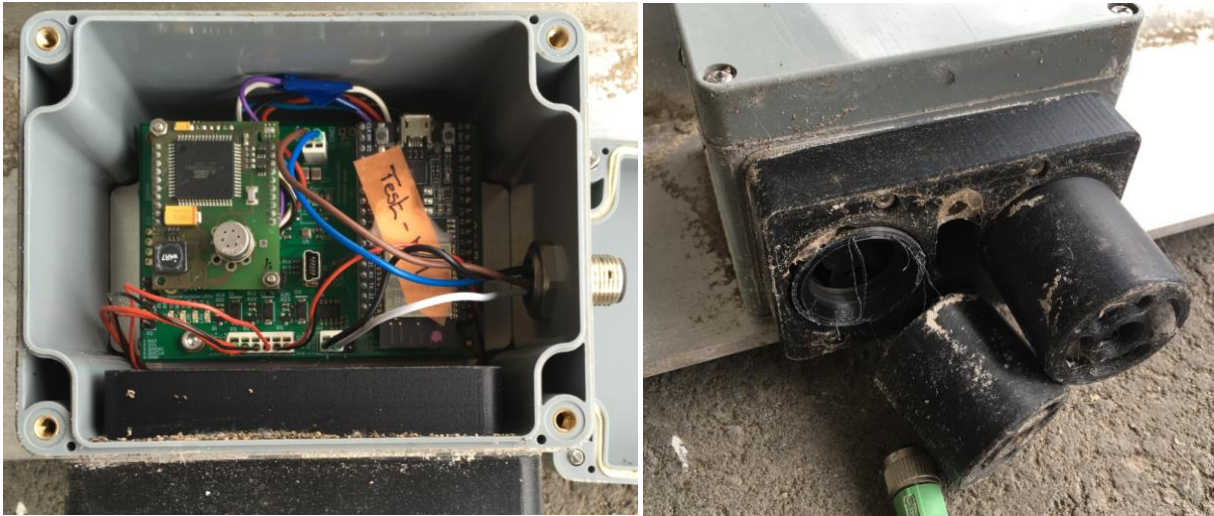
Abbildung 9: Sensor 5, Kabel am Maschendrahtzaun befestigt

Anlage 3

Anlage 3: Sicht- und Funktionskontrolle Biogas-Sensoren zum Abschluss der Feldversuche



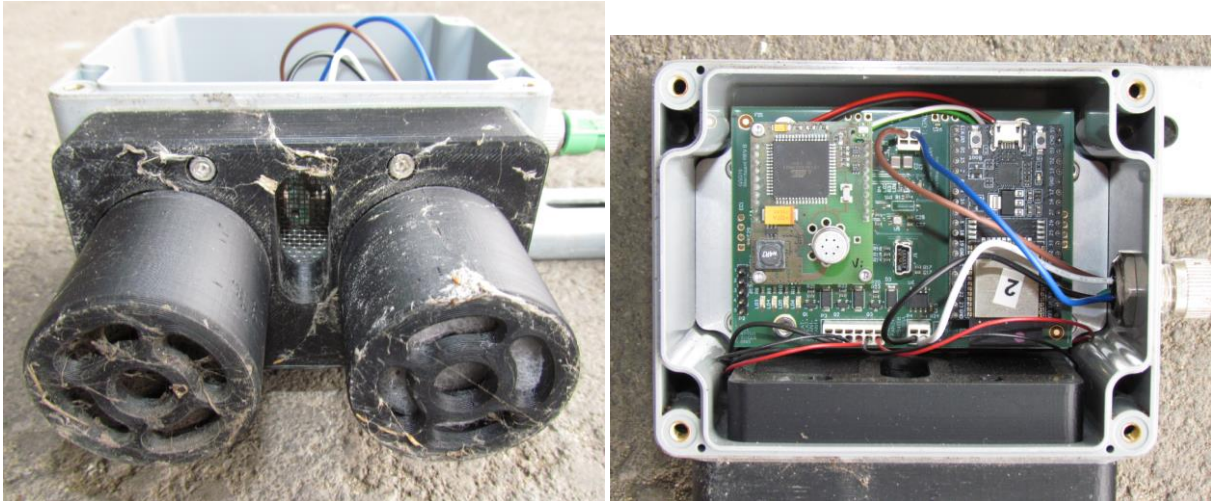
Sensor 1



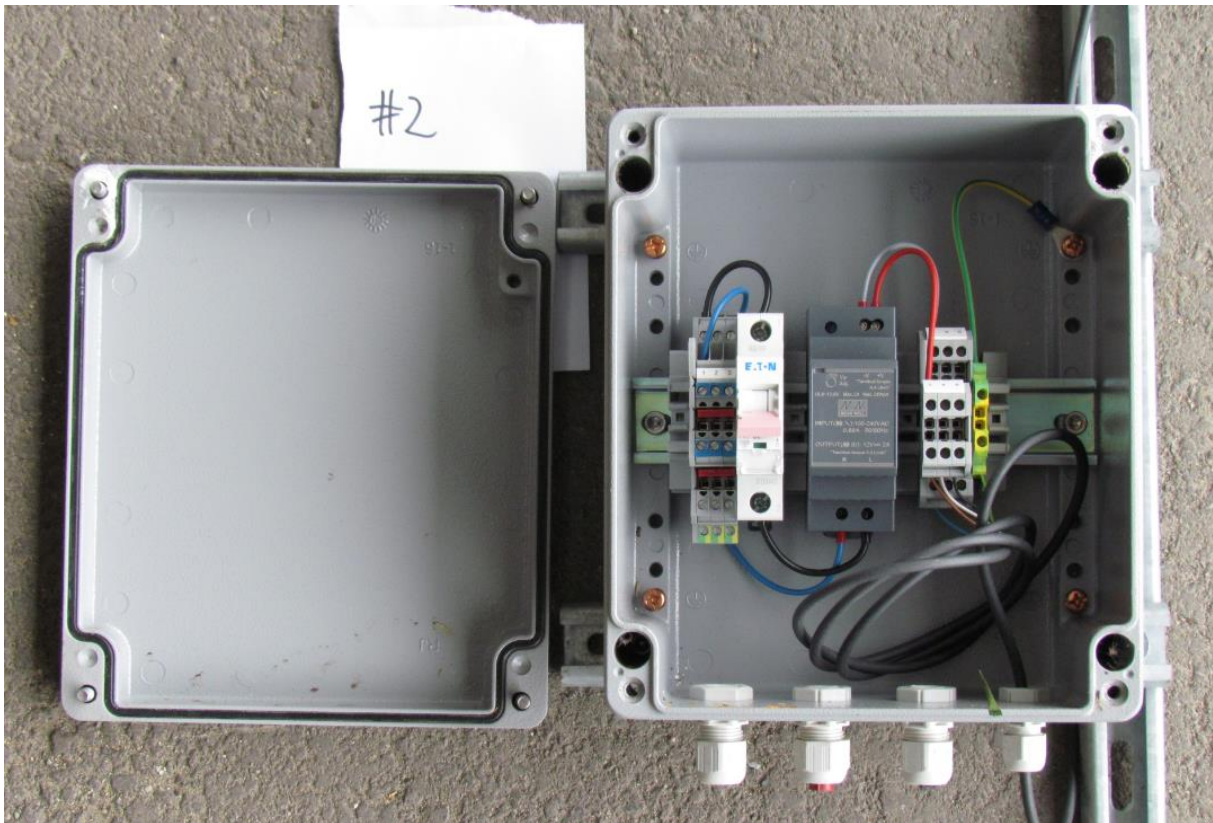
Voll funktionstüchtig. Passabler Gesamtzustand.

Der Wind- und der Windgeschwindigkeitssensor senden ihre Signale per RS485 auf ein GSD-Mainboard ohne Sensor. Dieses wird in das Gesamt-Mesh eingebunden. Der Sensor 1 ist gleichzeitig Master (Root) für das Mesh-Netzwerk und ist als einziger mit dem WLAN des Routers (Bild unten rechts) verbunden.

Sensor 2



Voll funktionstüchtig. Trotz freier Aufstellung recht eingesponnen/mit Spinnweben überzogen.



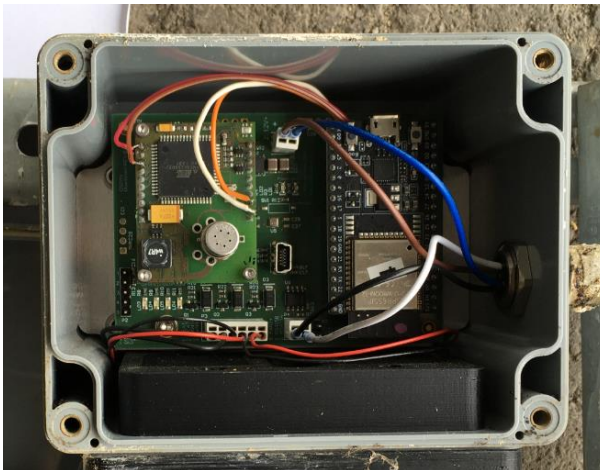
Beispielhaft für alle anderen 12-Boxen Fotos von der Stromeinspeisung, der (Ab-)Sicherung, dem Netzteil und Verteilung vom Sensor 2.

Sensor 3



Voll funktionstüchtig. Sehr freie Aufstellung und dennoch recht stark zugespinnen/mit Spinnweben überzogen.

Sensor 4



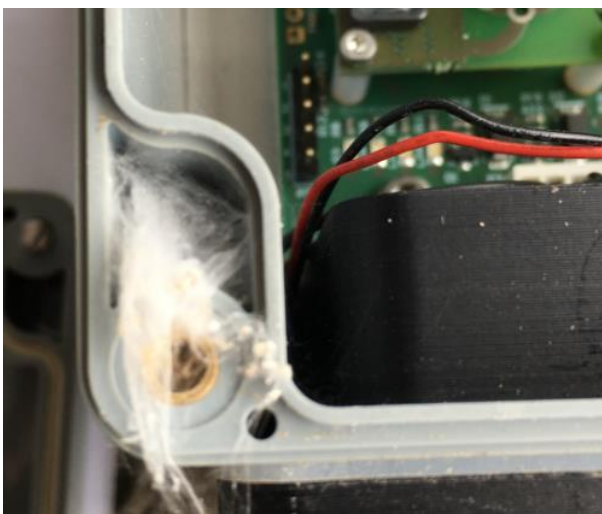
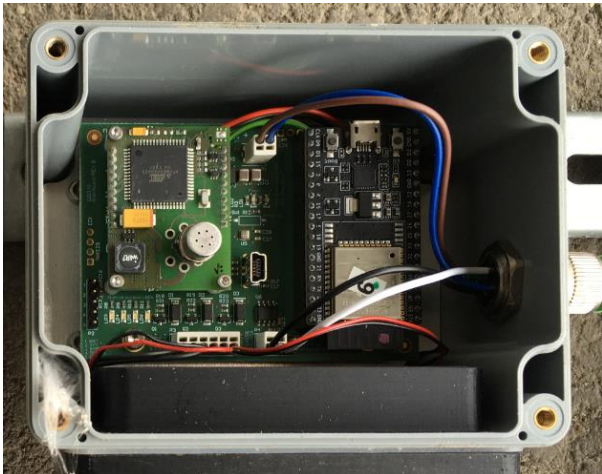
Voll funktionstüchtig. Auf Grund seiner erhöhten Aufstellung auf einem Wall diente der Sensor als Sitzgelegenheit für viele Vögel. Dementsprechend ist er stark verkotet.

Sensor 5



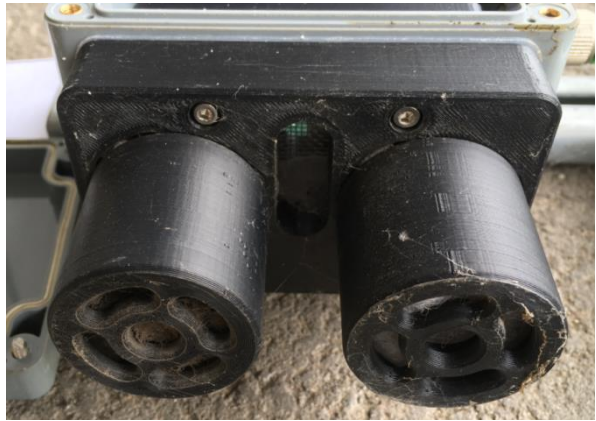
Voll funktionstüchtig. Das Innere des Sensors ist sehr sauber. Äußerlich keine Besonderheiten.

Sensor 6



Voll funktionstüchtig. Kartuschen leicht mit Spinnweben überzogen. In den Gehäuseöffnungen haben sich Insekten eingemischt.

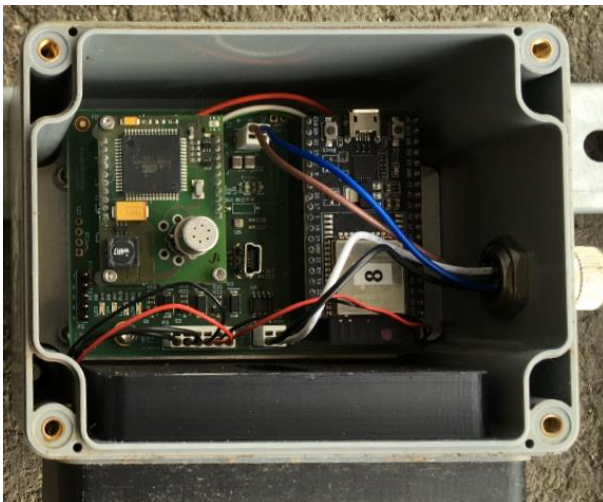
Sensor 7



Voll funktionstüchtig. Das Geräte-/Sensorinnere war sehr sauber. Wenige und kleine Spinnweben am Auslassgitter.

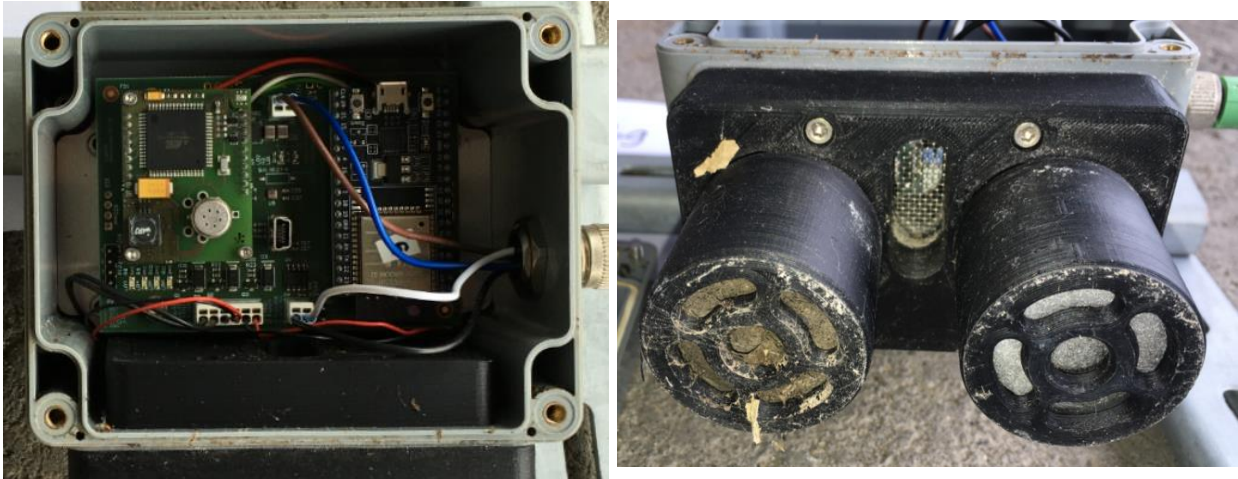


Sensor 8



Voll funktionstüchtig. Der Kunststoff der Kartuschen und der Halterung wiesen Beläge auf.

Sensor 9



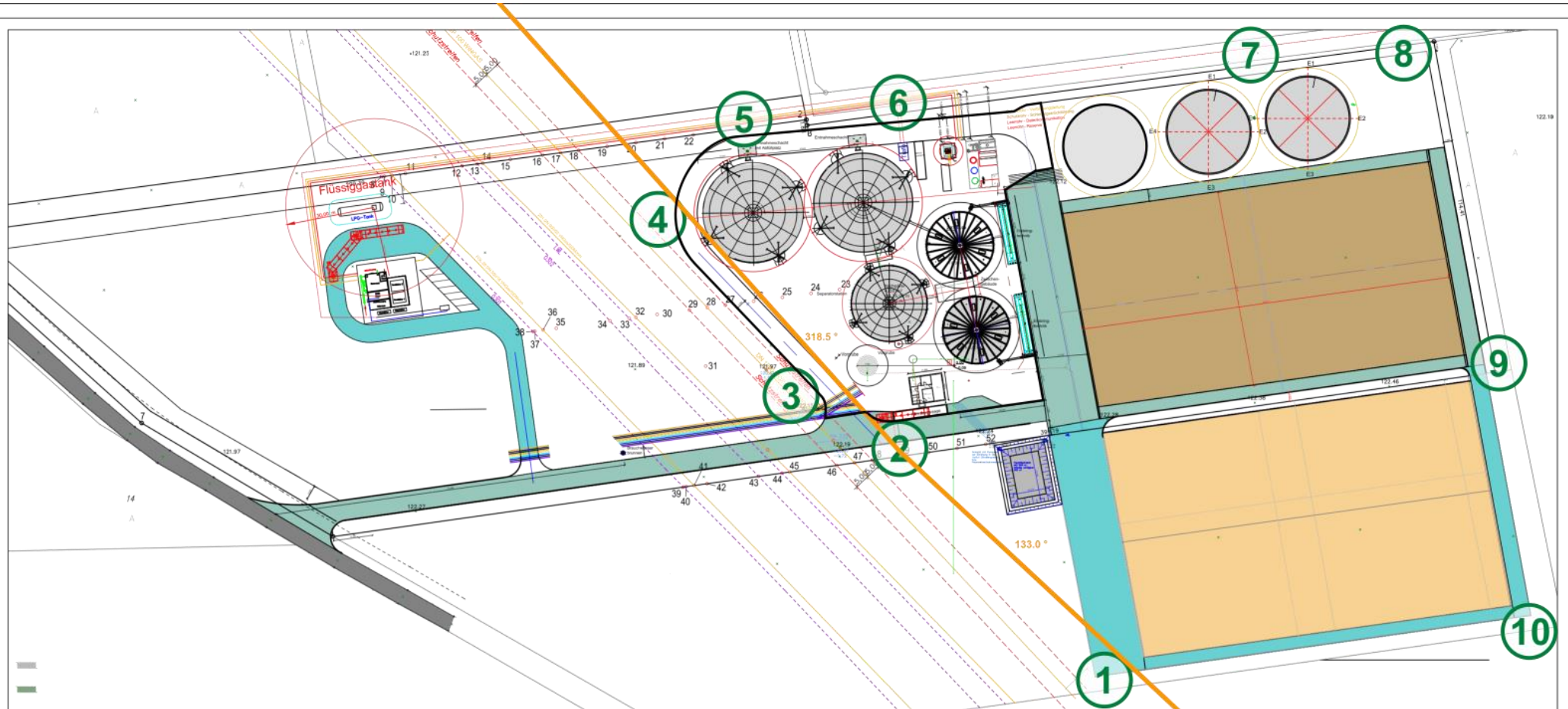
Voll funktionstüchtig. Die Öffnungen der Kartuschen sind stark verdreht – vermutlich wegen der Nähe zur Lagerfläche für das Gärgut.

Sensor 10



Voll funktionstüchtig. Stark mit Spinnweben besetzt. Verpupptes Insekt unten links im Gehäuse - der Zugang erfolgte über das Befestigungsloch von hinten. Die Luftfilter hinter den Kartuschen sind sauber und vollständig funktionstüchtig. Keine Verschmutzung.

Anlage 4



- Legende**
- geplante bauliche Anlagen
 - Abfalldecksflächen
 - Belandflächen
 - Asphaltflächen
 - Flurstücksgrenzen
 - Flurstücksummer
 - Abkürzung NVE III 140**
 - LK Steuerkabel

Bauherr Naturgas Quesitz GmbH Zum Floßgraben 60 04420 Markranstädt OT Quesitz		DAH Energie GmbH An den Eichen 1 16515 Oranienburg Tel.: 03301575192 Fax: 03301575233	
Vorhaben	Landkreis Leipzig Land Sachsen	gemessen	
		kartiert	
		gezeichnet	
		geprüft	
Darstellung	Gemarkung Thronitz Flur 1 Flst. 37	bearbeitet	24.07.2017
		gezeichnet	15.07.2013
		geprüft	17.07.2013
		Maßstab	Blatt-Nr.
			0