

Hermann Sewerin GmbH  
Gütersloh

# Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen Machbarkeitsuntersuchung

Abschlussbericht über das von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
geförderte Kooperationsprojekt

Projektlaufzeit: 04.07.2014 bis 30.09.2016

Az: 31314/01

Datum: November 2016

<b>Zuwendungsempfänger</b>	<b>Autoren</b>
Hermann Sewerin GmbH	Dr. rer. nat. Dominik Klaus, Dipl.-Ing. Carsten Supply
Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel	Dipl.-Ing. Sören Dierks, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll
Fachgebiet Agrartechnik, Universität Kassel	Dr. agr. Stefanie Retz, Univ.-Prof. Dr. Oliver Hensel



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>31314/01</b>	Referat	<b>14</b>	Fördersumme	<b>302.440,00€</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen</b>				
<b>Stichworte</b>	<b>Biogasanlagen, Gasleckagen, Gasmessverfahren, Fernmesstechnik, Emissionsmessung</b>				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>2,25 Jahre</b>	<b>04.07.2014</b>	<b>30.09.2016</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	31.12.2014 30.06.2016	30.06.2015	31.12.2015		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hermann Sewerin GmbH Robert-Bosch-Str. 3 33334 Gütersloh			Tel +49 5241 934-363 Fax +49 5241 934-444	
				Projektleitung Carsten Supply	
				Bearbeiter Patrick Pötter-Saße	
<b>Kooperationspartner</b>	Universität Kassel – Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll, Mönchebergstr. 7, 34127 Kassel				
	Universität Kassel – Fachgebiet Agrartechnik Prof. Dr. Oliver Hensel, Nordbahnhofstr. 1a, 37213 Witzenhausen				

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Ziel dieses Projektes war es, die Machbarkeit einer fernmesstechnischen Quantifizierung von Gasleckagen an Biogasanlagen zu zeigen. Aufgrund einer kontinuierlichen Beanspruchung einzelner Anlagenbereiche (z. B. Abdeckung Fermenter, Rohre, Flansche) und anspruchsvoller Betriebsbedingungen (z. B. Umwelteinflüsse, Produktionsprozess, etc.) ist eine regelmäßige Überprüfung von Biogasanlagen auf vorhandene Leckagen unerlässlich. Dabei sind viele Anlagenteile nur schwer zugänglich und für die Inspektoren besteht ein Gefährdungspotential aufgrund von in austretendem Biogas in der Regel enthaltenen giftigen Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S). Aus diesem Grund sollte ein Messsystem entwickelt werden, welches die Möglichkeit bietet, schnell und aus sicherer Entfernung eine Biogasanlage auf Gasleckagen zu untersuchen und diese Leckagen hinsichtlich ihrer Klimarelevanz zu bewerten. Die fernmesstechnische Quantifizierung der Menge an freigesetztem Methan ist neben dem klimapolitischen Aspekt auch aus sicherheitstechnischer und ökonomischer Sicht von großem Interesse.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die quantitative Abschätzung der ausströmenden Gasmenge aus einem Leck (Leckmassenstrom) wurde durch eine Kombination verschiedener Sensoren realisiert. Zur Bestimmung der Methankonzentration an der Leckagestelle wurde ein auf Laser-Technik basierendes Gasfernmessgerät, der RMLD (Remote Methane Leak Detector) des Bewilligungsempfängers Sewerin, eingesetzt. Für die Visualisierung des austretenden Gases wurde eine IR-Gaskamera verwendet. Außerdem wurden die Windgeschwindigkeit, der Umgebungsluftdruck und die Umgebungstemperatur erfasst. Die Integration der einzelnen Sensoren zu einem portablen Messsystem, welches im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurde, ermöglicht eine synchrone Erfassung und anschließende Verarbeitung der gesammelten Messdaten. Dabei wird aus den einzelnen Messgrößen mittels Messmodell der nicht messbare Leckmassenstrom rechnerisch ermittelt. Zur Validierung des Messsystems und zur Generierung von Referenzdaten ist es notwendig, Messungen im Laborumfeld sowie im Freifeld durchzuführen. Einige dieser Messungen wurden auf der Schulungsstrecke des Bewilligungsempfängers Sewerin vorgenommen. Weitere wurden im Labor, im Freifeld sowie an Biogasanlagen durchgeführt. Diese Ergebnisse flossen sowohl bei der Erstellung des Messsystems als auch bei der Entwicklung des Auswerteverfahrens ein.

## **Ergebnisse und Diskussion**

AP1: Zum Zweck der Schwachstellenanalyse wurden mehrere Biogasanlagen besichtigt und häufige Leckagen ermittelt. Schwachstellen kommen in unterschiedlicher räumlicher Ausprägung und zeitlich schwankender Intensität vor. Materialübergänge wie Dichtungen und Wanddurchführungen sind prinzipiell typische Leckagequellen. Regelmäßige Wartung und Überprüfung sind ausschlaggebend, um Leckagen generell zu vermeiden oder frühzeitig zu erkennen.

AP2: Ein Messsystem wurde entwickelt. Dazu wurden alle Sensoren und der Datenerfassungsrechner auf einem Stativ angebracht. Eine Herausforderung hierbei stellte die Ausrichtung von Gaskamera und RMLD zueinander dar. Die Messdaten der Sensoren werden zeitgleich erfasst, mit entsprechenden Zeitstempeln abgespeichert und visualisiert. Für Tests des Messsystems wurde ein Aufbau entwickelt, mit welchem sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch der Methanmassenstrom einer definierten Gasströmung eingestellt werden kann.

AP3: Die Signifikanz der einzelnen Messgrößen bezogen auf das Messmodell wurde untersucht. Es wurden erste Bildverarbeitungsverfahren entwickelt, um die Strömungsgeschwindigkeit des Gases aus den Bildern der Gaskamera zu schätzen. Mit dem Messsystem und dem erstellten Versuchsaufbau wurden Referenzmessungen im Labor durchgeführt. Diese zeigen die prinzipielle Machbarkeit der fernmesstechnischen Bestimmung des Methanmassenstroms unter Laborbedingungen, wobei die Messergebnisse eine systematische Abweichung von dem eingestellten Massenstrom aufweisen. Die mit den bisher entwickelten Methoden geschätzten Gasgeschwindigkeiten weisen noch signifikante Ungenauigkeiten auf. Diese Ungenauigkeiten können ein Grund für die systematische Abweichung bei der Bestimmung des Methanmassenstroms sein.

AP4: Für gegebene Leckmassenströme wurde berechnet, welches Potential sich hinsichtlich Einnahmeverlusten bzw. Ausgabenersparnissen (z. B. für zusätzliches Substrat) hinter einer Leckage verbirgt. Dies bildet die Grundlage für ein Kalkulations-Tool für Anlagenbetreiber, welches in Form einer Dienstleistung zum Einsatz kommen kann. Die Untersuchung des Leckmassenstrom-Messsystems unter Freifeldbedingungen verdeutlichte die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung der Verfahren zur Bildanalyse, um den Einfluss äußerer Störeinflüsse, wie z. B. bewegter Objekte in der Bildebene, zu reduzieren.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das durch die Bearbeitung des Projekts erlangte Know-how im Bereich der Quantifizierung von Leckagen auf Biogasanlagen konnte bereits mehrfach im Rahmen von Vorträgen auf Fachveranstaltungen und bei Diskussionen mit Experten aus dem Bereich Biogas eingesetzt werden. Es entstanden drei Fachveröffentlichungen. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Statustreffen zur Vorstellung der bisherigen Ergebnisse und des Leckmassenstrom-Messsystems inklusive einer Demonstration veranstaltet. Von den vorgestellten Ergebnissen können Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen im Hause Sewerin direkt profitieren.

## **Fazit**

Im Rahmen des Projektes wurde deutlich, dass der Markt für eine solche Technologie sowohl national als auch international vorhanden ist. Nach aktuellem Kenntnisstand der Projektpartner gibt es bisher kein System, welches vergleichbare Messergebnisse zu dem hier entwickelten Funktionsmuster liefert. Es konnte gezeigt werden, dass eine fernmesstechnische Quantifizierung von Methanleckagen zumindest näherungsweise möglich ist. Die Messergebnisse zeigen dabei noch eine systematische Abweichung. Um das erstellte Funktionsmuster zu optimieren, ist es das Ziel aller Projektpartner die erfolgreiche Arbeit in einem Folgeprojekt weiterzuführen. Ansatzpunkte gibt es sowohl im Softwarebereich durch die Erprobung weiterführender Algorithmen zur verbesserten Abschätzung der Gasgeschwindigkeit oder Identifikation von Fremdbewegungen, aber auch im Bereich der Leckage-Simulation. Hier sollen die vorhandenen Systeme für Labor und Freifeld so weiterentwickelt werden, dass sie die relevanten Leckszenarien möglichst realitätsnah nachbilden können. Außerdem wird das Messsystem durch eine unterwiesene Person im Rahmen einer Felderprobung getestet werden. Zudem wird ein Kalkulations-Tool entwickelt, das eine betriebsindividuelle Berechnung der wirtschaftlichen Verluste („CH<sub>4</sub>-Fußabdruck“) auf Basis der vom Messsystem ermittelten Leckagen ermöglicht.

# Inhalt

Inhalt .....	5
Abbildungsverzeichnis .....	6
Tabellenverzeichnis .....	8
Begriffe, Abkürzungen, Definitionen .....	9
Zusammenfassung .....	11
1 Einleitung .....	13
1.1 Motivation .....	13
1.2 Stand der Technik .....	14
1.3 Vorhabensziel .....	15
2 Szenariendefinition und Anforderungsanalyse .....	17
2.1 Schwachstellenanalyse von Biogasanlagen .....	17
2.2 Definition relevanter Leckszenarien .....	22
2.3 Abschätzung wirtschaftlicher und energetischer Verluste .....	24
2.4 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation .....	25
2.5 Zusammenfassende Bewertung .....	26
3 Aufbau der Messtechnik und Versuchsaufbauten .....	27
3.1 Realisierung des Messmoduls .....	27
3.2 Implementierung der Messdatenerfassung .....	28
3.3 Auswertesoftware .....	30
3.4 Laborversuchsaufbau für Referenzmessungen .....	31
3.5 Zusammenfassende Bewertung .....	34
4 Messmethoden- und Messverfahrensentwicklung .....	36
4.1 Messmodell zur Schätzung des Leckmassenstroms .....	36
4.2 Signifikanztests relevanter Einflussgrößen .....	38
4.3 Verfahren zur Gasgeschwindigkeitsschätzung .....	41
4.4 Zusammenfassende Bewertung .....	43
5 Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse .....	45
5.1 Versuche mit Referenzströmung im Labor .....	45
5.2 Versuche mit offener Strömung im Labor .....	48
5.3 Messtechnische Eigenschaften des Messsystems .....	50
5.4 Versuche im Freifeld .....	51
5.5 Tests in Anlagen .....	55
5.6 Zusammenfassende Bewertung .....	56
6 Abschließende Bewertung .....	58
7 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse .....	60

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Entwicklung der Anzahl an Biogasanlagen in Deutschland seit 1992 [3] ..13
Abbildung 1.2:	Beispiel für eine Gasleckage am Übergang von Foliendach zur Seitenwand eines Fermenters. Links: visuelles Bild. Rechts: Differenzbild der Gaskamera ..... 14
Abbildung 2.1:	Anlage 1: Garagenfermenter .....18
Abbildung 2.2:	Anlage 2: Fermenter und Nachgärer mit Tragluftdächern .....19
Abbildung 2.3:	Anlage 3: Fermenter aus Stahl mit Massivdecke und Nachgärer aus Beton mit Tragluftdach 19
Abbildung 2.4:	Anlage 4: Fermenter und Nachgärer aus Beton mit Tragluftdächern .....20
Abbildung 2.5:	Anlage 5: Fermenter aus Beton mit Massivdecke.....20
Abbildung 2.6:	Beispiele für Leckagestellen, die bei Anlagenbegehungen gefunden wurden. Pfeile kennzeichnen den Leckort. A: Übergang von Foliendach zur Wand eines Nachgärers, B: Seildurchführung in Fermenterwand, C: Auslass des Überdruckventils, D: Durchführung für Substrateinbringung .....22
Abbildung 3.1:	Mechanischer Aufbau des Messsystems bestehend aus Messgeräteträger (1), Stativ (2), RMLD mit Detektor- (3a) und Rechenmodul (3b), Gaskamera (4), Entfernungsmesser (5), Sensor für Umgebungsdruck und -temperatur (6), visueller Kamera (7) sowie Laptop zur Messwerterfassung (8) .....28
Abbildung 3.2:	Grafische Benutzeroberfläche des Messdatenerfassungssystems. Angabe des Dateipfades zur Speicherung (1), Auswahl der angeschlossenen Sensoren (2), Eingabefeld für Messpfadlänge (3), Anzeige des Infrarotbildes (4a) und des Differenzbildes (4b) der Gaskamera mit eingezeichneter Position des RMLD-Messflecks, zeitlicher Verlauf des RMLD-Messwertes (5) und Messwertanzeige des Druck- und Temperatursensors (6).....30
Abbildung 3.3:	Exemplarische Darstellung der zeitlichen Verläufe von integraler Gaskonzentration und geschätzter Gasgeschwindigkeit einer Datenserie. ....31
Abbildung 3.4:	Schematische Darstellung des Laboraufbaus für Referenzmessungen ....32
Abbildung 3.5:	Am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik ausgeführter Laboraufbau für Referenzmessungen .....33
Abbildung 4.1:	Schematische Darstellung der Messszene .....37
Abbildung 4.2:	Schematische Darstellung der Bildverarbeitungsschritte .....41
Abbildung 4.3:	Exemplarische Darstellung der einzelnen Bildverarbeitungsschritte an einem Bildausschnitt mit Gaswolke (von links nach rechts und von oben nach unten): visuelles Bild der Düse vor IR-Strahler, IR-Bild der Gaskamera, Differenzbild, Histogrammspreizung und Normierung, Filterung, Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes durch Pfeile .....43
Abbildung 5.1:	Ergebnisse der am Laboraufbau durchgeführten Versuche.....47
Abbildung 5.2:	Messwerte der mit dem Laboraufbau durchgeführten Versuche nach Korrektur um Offset und Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade mit Fehlerbalken für die dreifache Standardabweichung .....48
Abbildung 5.3:	Versuchsanordnung bei der Messung frei ausströmenden Methans. Links: Versuchsaufbau mit IR-Strahler im Hintergrund sowie Düse für Gasaustritt (roter Pfeil). Rechts: Differenzbild des Auswertevideos mit Messwert des Volumenstroms (oben links) sowie Darstellung des RMLD-Messflecks (roter Kreis), des Bildbereichs zur Schätzung der

Gasgeschwindigkeit (grünes Rechteck) und der bestimmten Gasgeschwindigkeit und -richtung (farbiger Pfeil).	49
Abbildung 5.4: Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche mit frei ausströmendem Methan.	50
Abbildung 5.5: Exemplarische Aufnahmen simulierter Gasleckagen bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen Hintergrund und Gas. Oben: Bilder des Aufbaus bei niedrigem (A) und hohem (B) Temperaturunterschied. Unten: Differenz-Infrarotbilder eines Gasvolumenstroms von 100 l/h bei geringem Temperaturunterschied (C) und von 76 l/h bei hohem Temperaturunterschied (D). Der rote Pfeil kennzeichnet jeweils die Stelle des Gasaustritts.	52
Abbildung 5.6: Versuchsaufbau bei den durchgeführten Freifeldmessungen im Rahmen der Projektverlängerung (links) und Blick von der Position des Messsystems auf den Versuchsaufbau (rechts)	53
Abbildung 5.7: Auswertung über 30 Sekunden der aufgenommenen Datenserien ohne Beachtung von Störfaktoren	53
Abbildung 5.8: Auswertung bei geeigneter Wahl von Zeitintervallen über 10 Sekunden	54
Abbildung 5.9: Links: visuelles Bild der Futtereinbringung in den Fermenter. Rechts: Differenzbild der Gaskamera. Die Position der Leckage ist durch den roten Pfeil, eine Störung im Bild durch ein Insekt durch den roten Kreis gekennzeichnet.	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Betriebstechnische Angaben zu den besichtigten Anlagen .....	17
Tabelle 2.2:	Bauarten der besichtigten Anlagen .....	18
Tabelle 2.3:	Erfasste Leckagen der besichtigten Anlagen .....	21
Tabelle 2.4:	Kategorien von Leckagen an Biogasanlagen mit Beispielursachen .....	23
Tabelle 2.5:	Exemplarische Beispielrechnung zum Einnahmeverlust durch eine Gasleckage	24
Tabelle 2.6:	Exemplarische Beispielrechnung zu Mehrausgaben aufgrund einer Gasleckage	25
Tabelle 3.1:	Verwendete Symbole in den Modellgleichungen (4.3), (4.4) und der schematischen Darstellung des Laboraufbaus (vgl. Abbildung 3.4).....	33
Tabelle 3.2:	Verwendete Abkürzungen in den Modellgleichungen (4.3), (4.4) und der schematischen Darstellung des Laboraufbaus (vgl. Abbildung 3.4).....	34
Tabelle 4.1:	Wertebereiche der Messgrößen zur Untersuchung der Modellempfindlichkeiten und betrachtete Arbeitspunkte für die Worst-Case-Abschätzung und eine typische Messsituation.....	39
Tabelle 4.2:	Empfindlichkeiten des Schätzwertes für den Leckmassenstrom gegenüber den Messgrößen für zwei Arbeitspunkte.....	40
Tabelle 4.3:	Empfindlichkeiten des Schätzwertes für den Lecknormvolumenstrom gegenüber den Messgrößen für zwei Arbeitspunkte.....	40



# Begriffe, Abkürzungen, Definitionen

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\alpha$	Öffnungswinkel des RMLD-Laserkegels	rad
$\bar{\rho}$	Mittlere Dichte des Methans im Messkegelvolumen des RMLD	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$
A	Querschnittsfläche des Lasermesskegels des RMLD	m <sup>2</sup>
C	Kostenfunktion der Blockmatching-Methode	-
C <sub>ppmm</sub>	Integrale Gaskonzentration	ppmm
H	Abstand zwischen Messsystem und Gaswolke	m
i, j	Pixelkoordinaten innerhalb der Bildausschnitte	-
M <sub>M</sub>	Molare Masse von Methan	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
N	Kantenlänge der Bildausschnitte	px
p <sub>N</sub>	Normdruck nach DIN 1343 [1]	Pa
p <sub>U</sub>	Gemessener Umgebungsdruck	Pa
$\hat{q}_m$	Berechneter Methanmassenstrom	$\frac{\text{g}}{\text{s}}$
$\hat{q}_v$	Berechneter Methannormvolumenstrom	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$
q <sub>v,ref</sub>	Eingestellter Methannormvolumenstrom	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$
R	Universelle Gaskonstante	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
T <sub>N</sub>	Normtemperatur nach DIN 1343 [1]	K
T <sub>U</sub>	Gemessene Umgebungstemperatur	K

$\dot{V}$	Volumenstrom durch die Querschnittsfläche des Laser- messkegels	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$v_{\text{Ist}}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Methans im Sichtfenster	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$v_{\text{ref}}$	Mittlere eingestellte Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$\bar{v}_{xy}$	Mittlere per Bildverarbeitung berechnete Gasgeschwin- digkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$x, y$	Pixelkoordinaten des Bildes der Gaskamera	-

### Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AP	Arbeitspunkt
B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub>	Betrachtete Bildausschnitte in Bild 1 bzw. Bild 2
BHKW	Blockheizkraftwerk
CH <sub>4</sub>	Methan
csv	comma-separated values
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
F	Flügelradanemometer zur Messung von $v_{\text{ref}}$
FM	Frischmasse
$l_{\text{N}}$	Normliter, d. h. Volumen von einem Liter bei Normtemperatur $T_{\text{N}}$ und Normdruck $p_{\text{N}}$
M	Motor zum Antrieb des Lüfters bzw. der Absaugung des Laboraufbaus
MB	Mega Byte
MFC	Massenstromregler (engl. mass flow controller)
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
oTM	Organische Trockenmasse
png	portable network graphics
ppm	parts per million
ppmm	parts per million meter
RMLD	Remote Methane Leak Detector
USB	Universal Serial Bus

## Zusammenfassung

Die Zahl der Biogasanlagen in Deutschland liegt aktuell bei ca. 9000 Anlagen. Bedingt durch Alterung, technische Defekte und Konstruktionsmängel können erhebliche Gasleckagen (v.a. Methan) auftreten. Dieser zunehmende Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase und die mögliche Gefährdung durch Gasleckagen erfordert die Entwicklung neuartiger Messsysteme, die eine einfache, zeitnahe sowie fernmesstechnische Quantifizierung der entweichenden Gasmenge durch vorhandene Leckagen ermöglichen.

Ziel dieses Projekts war es, die Machbarkeit der fernmesstechnischen Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen zu zeigen. Zunächst wurden Analysen hinsichtlich der vorherrschenden Schwachstellen in Biogasanlagen durchgeführt und relevante Leckszenarien für unterschiedlichen Anlagentypen dokumentiert. Auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen wurde im Rahmen einer Anforderungsanalyse eine Systemspezifikation ausgearbeitet und anhand dieser ein Funktionsmuster eines portablen Leckmassenstrom-Fernmesssystems mit integrierter Software zur Auswertung der Messdaten entwickelt. Das verwendete Messmodell wurde zudem theoretisch hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber den verschiedenen Einflussgrößen analysiert. Um die Praxistauglichkeit des Systems zu testen, fanden zudem Messungen vor Ort in Biogasanlagen statt. Im Rahmen der Schwachstellenanalyse konnten zahlreiche Leckagen gefunden werden. Eine wichtige Erkenntnis war, dass Leckagen eine unterschiedliche räumliche Ausprägung und eine zeitlich schwankende Intensität aufweisen können. Eine Berechnung der anlagenspezifischen wirtschaftlichen und energetischen Verluste basierend auf theoretisch angenommenen Gasleckagen wurde auf Basis der Gewinneinbußen sowie der Kostenersparnis durchgeführt.

Mit dem entwickelten Messsystem wurden reproduzierbare Referenzmessungen unter Laborbedingungen durchgeführt. Diese zeigen die prinzipielle Machbarkeit der fernmesstechnischen Bestimmung des Methanmassenstroms, wobei für den gemessenen Methanvolumenstrom systematisch ein zu geringer Wert in der Größenordnung von 25% - 50% gemessen wurde. Nach einer Korrektur dieser systematischen Abweichung durch den Offset und die Empfindlichkeit der Ausgleichsgeraden verbleiben Messwertschwankungen um den Referenzvolumenstrom. Dabei liegt die relative Standardabweichung für alle Referenzvolumenströme jeweils unter 20 % des mittleren Messwertes. Somit bietet das entwickelte Messsystem erstmals die Möglichkeit, eine Abschätzung der Klimarelevanz von Leckagen an Biogasanlagen vorzunehmen. Es besteht jedoch der Bedarf das Messsystem weiterzuentwickeln, um so die systematische Messabweichung zu verringern. Bei ersten Messungen auf dem Testgelände der Firma Sewerin und ersten Testmessungen in Biogasanlagen wurden die Herausforderungen bezüglich der Bildverarbeitung deutlich. Sowohl für das Schätzen der Gasgeschwindigkeit aus den Bildern der Gaskamera als auch bei der Erkennung von Fremdbewegungen bspw. durch Insekten besteht der Bedarf weiterführende Algorithmen zu implementieren und zu testen.

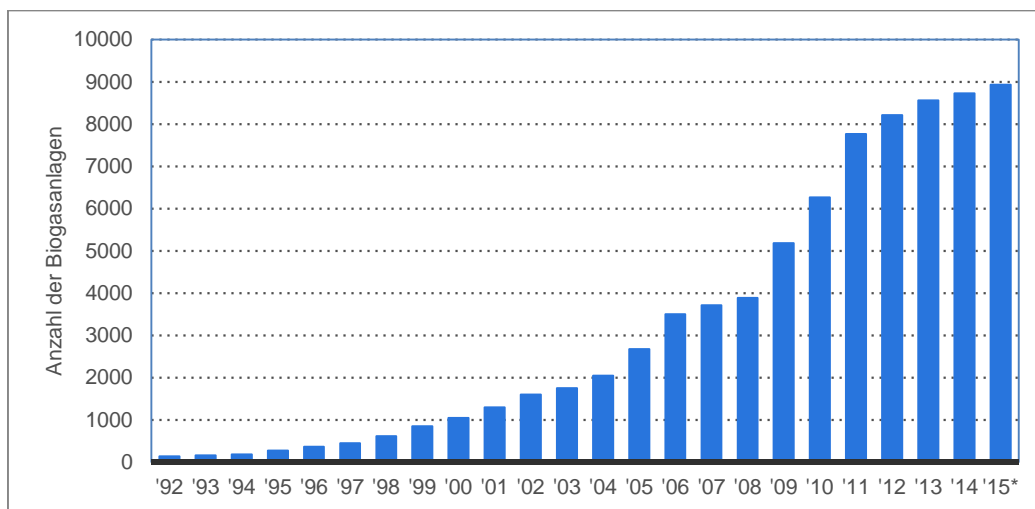
Die in diesem Projekt geschaffene Möglichkeit regelmäßiger Kontrollen unterstützt den Umweltschutz und fördert das positive Image der erneuerbaren Energien, im speziellen der Biogasanlagen. Auch die zu erwartende Steigerung des Nutzungsgrades durch die resultierende technische Verbesserung der Anlagenkomponenten und die geschaffene Option einer einheitlichen Zertifizierung der Biogasanlagen hinsichtlich Effizienz und Menge an aktuellem Gasaustritt sind betriebswirtschaftlich sowie klimapolitisch relevante Innovationen, die weitere Zielvorgaben dieses Forschungsprojekts darstellen. Dieses Forschungsvorhaben wurde im Verbund von der Hermann Sewerin GmbH sowie den Fachgebieten Mess- und Regelungstechnik

und Agrartechnik der Universität Kassel durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 31314/01).

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Biogasanlagen haben in den letzten Jahren in Deutschland eine große Verbreitung erreicht (vgl. Abbildung 1.1). Auch die aktuellsten Entscheidungen der Politik zur Ökostromreform zeigen, dass den Biogasanlagen weiterhin eine wichtige Rolle im Mix der erneuerbaren Energien zudedacht wird [2]. Trotz inzwischen weitgehend ausgereifter Anlagentechnik sind Gasleckagen im praktischen Betrieb konstruktionsbedingt dauerhaft nicht zu vermeiden (vgl. Abbildung 1.2). Eine Quantifizierung der ausströmenden Methanmenge ist nicht nur unter klimapolitischen Gesichtspunkten, sondern auch für den Aspekt der Anlagensicherheit unerlässlich. Zudem bietet eine solche Messung die Möglichkeit einer fundierten wirtschaftlichen Beurteilung der gesamten Anlage. In Gesprächen auf verschiedenen Messen im Rahmen des Projektes zeigte sich, dass bei Anlagenbetreibern und auch bei Dienstleistern, die Inspektionen von Biogasanlagen anbieten, der Bedarf an einer Quantifizierung der Methanemissionen in Folge von Gasleckagen vorhanden ist.



**Abbildung 1.1: Entwicklung der Anzahl an Biogasanlagen in Deutschland seit 1992 [3]**

Derzeit gibt es unterschiedliche Verfahren zur Ortung von Gasleckagen, zur Vermessung der absoluten oder integralen Gaskonzentration in der Umgebung eines Lecks und zur Visualisierung von Gaswolken. Biogasanlagen werden in der Regel rein visuell und meist erst bei unerklärlichen Leistungsverlusten oder nach Beschwerden von Anwohnern inspiziert. Zur Leckortung werden häufig handgeführte Schnüffelsonden, Ultraschallsensoren, Infrarot-optische Gasfernmessgeräte oder sogenannte Gaskameras von technischen Sachverständigen eingesetzt, mit denen im Rahmen einer Begehung unterschiedliche Bauteile untersucht werden können. Diese Inspektionen liefern nur die Leckorte. Sie geben entweder keine oder nur eine sehr ungenaue Information hinsichtlich der Größenordnung der freigesetzten Gasmenge und dienen insbesondere der Detektion und Ortung zu reparierender Bauteile. Sie liefern keine Informationen, aus denen energetische und wirtschaftliche Verluste quantitativ sowie der Beitrag von Leckagen aus Biogasanlagen zum Treibhauseffekt (Klimawandel) bestimmt werden können. Zudem führt die Unklarheit über das Ausmaß der Verluste oft dazu, dass keine Reparaturen durchgeführt werden, da ökologische und ökonomische Anreize fehlen.



**Abbildung 1.2:** Beispiel für eine Gasleckage am Übergang von Foliendach zur Seitenwand eines Fermenters. Links: visuelles Bild. Rechts: Differenzbild der Gaskamera

## 1.2 Stand der Technik

Nach aktuellem Kenntnisstand existieren verschiedene Verfahren zur Abschätzung des *Massenstroms* freigesetzter Gase aus einem Leck. Vier davon sind jedoch In-Situ-Verfahren; zwei weitere arbeiten rückwirkungsfrei aus der Ferne, sind allerdings aufgrund kommerziell nicht verfügbarer oder wegen zu teurer Messtechnik nicht für den Einsatz in Biogasanlagen geeignet [4–9].

Beim *ersten Verfahren* [4] wird der Massenstrom indirekt anhand des inneren Drucks des Gases, der Gastemperatur und der Leckgröße berechnet. Dieses Verfahren ist rückwirkungsfrei, aber die notwendigen Messgrößen sind meistens nicht verfügbar oder müssen anhand von Messwerten aus dem Fermenter geschätzt werden. Der resultierende Massenstromwert ist daher sehr ungenau und kann nur als sehr grobe Einschätzung verwendet werden.

Beim *zweiten Verfahren* [5] wird die Gasmischung in der Umgebung des Lecks mit einem bekannten Volumenstrom eingesaugt und analysiert. Die Messung erfolgt vor Ort, hat aber eine Rückwirkung auf das Messobjekt bzw. die Messgröße, da der Umgebungsdruck beim Einsaugen des Gasgemisches lokal verringert und dadurch möglicherweise mehr Gas aus dem Leck freigesetzt wird. Das einzige bekannte, nach diesem Verfahren arbeitende, Messgerät ist der „HiFlow Sampler“ der Firma Bacharach. Dieses ist erstens nach Herstellerangaben wegen dem  $\text{H}_2\text{S}$ -Anteil im Biogas nicht für Biogasanlagen geeignet und zweitens nur für große Lecks ab  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$  konzipiert.

Beim *dritten Verfahren* wird nach Ermittlung der Leckstelle eine elastische Tüte zum Gassammeln über die Leckstelle gebracht. Nach einer definierten Zeitspanne wird die Tüte abgenommen, das Gasvolumen ermittelt und daraus ein mittlerer Massenstrom abgeleitet. Dieses Verfahren ist wie das zweite nicht vollständig rückwirkungsfrei, da die Austrittsstelle gekapselt und durch die Bewegung der Tüte (z. B. durch Wind oder den Bediener) kleine Druckänderungen hervorgerufen werden. Im Vergleich zum typischen Betriebsüberdruck eines Fermenters ( $\Delta p < 0,1 \text{ bar}$ ) kann dies zu einer signifikanten Beeinflussung des Massenstroms führen. Dies gilt auch für Verfahren mit einer starren Verkapselung der Leckstelle [6]. Des Weiteren eignen sich diese zeitaufwändigen Verfahren nicht zur effizienten Messung mehrerer Leckagen an Anlagen.

Verfahren zwei und drei erfordern zudem Tätigkeiten in unmittelbarer Lecknähe, was wegen des  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalts des Biogases den Inspekteur u. U. signifikanten gesundheitlichen Risiken aussetzt.

Beim *vierten Verfahren* werden im Rahmen der Pipelineüberwachung die Zustandsgrößen des Fluids (Druck, Temperatur, Durchfluss) an mehreren Stellen erfasst und über mathematische Modelle die Leckmassenströme bestimmt [7]. Solche Verfahren sind bisher nur an Pipelines

getestet worden und setzen eine entsprechende Instrumentierung der zu überwachenden Leitungen voraus [10]. Bereits der finanzielle Aufwand für die Beschaffung, Installation und Wartung der Sensorik ist in Biogasanlagen kaum wirtschaftlich darstellbar.

Das *fünfte Verfahren* wurde in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift veröffentlicht. Es arbeitet mit dem Prinzip der Gas-Korrelation [8]. Dabei wird die Infrarotstrahlung, die von der Umgebung abgegeben wird, genutzt. Die Hintergrundstrahlung, welche die Gaswolke durchstrahlt, wird über zwei verschiedene Pfade zum Detektor geleitet. Über den einen Pfad gelangt die Infrarotstrahlung direkt zum Detektor während sich im anderen Pfad eine Gaszelle befindet. Diese Gaszelle enthält das Zielgas, welches gemessen werden soll. Durch die Gaszelle wird die einfallende Strahlung derart gefiltert, dass die gesamten Strahlungsanteile bei den Absorptionsbanden des Zielgases absorbiert werden. Ähnlich dem Messprinzip des „Remote Methane Leak Detector“ (RMLD), welches in diesem Projekt verwendet wird, kann aus dem Verhältnis der beiden Intensitäten auf die integrale Gaskonzentration geschlossen werden. Zusätzlich wird die Gasgeschwindigkeit per Bildverarbeitung bestimmt. Die Gasgeschwindigkeit und die integrale Gaskonzentration werden in einen Methanvolumenstrom umgerechnet. Die bei diesem Messverfahren notwendige optische Anordnung wurde eigens entwickelt und ist nicht kommerziell verfügbar. Zudem muss eine Kalibrierung durchgeführt werden, damit eine korrekte Bestimmung der integralen Gaskonzentration in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes zwischen Hintergrund und Gas möglich ist. Aus der entsprechenden Veröffentlichung sind jedoch einige Aspekte nicht ersichtlich. Unklar ist, wie der in der Regel unbekanntes Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gas bei Messungen im Freifeld bestimmt wird. Außerdem wird nicht klar beschrieben, mit welchem Ansatz aus den verschiedenen Messgrößen der Volumenstrom bestimmt wird.

Beim *sechsten Verfahren* wird eine hyperspektrale Kamera verwendet [9]. Diese zeichnet hyperspektrale Bilder auf, d. h. je Pixel erhält man die Intensitätsverteilung über den detektierten Spektralbereich. In diesem Spektralbereich werden zwei unterschiedliche Wellenlängen betrachtet. Die Strahlungsintensität bei beiden Wellenlängen unterscheidet sich, weil das Zielgas bei der einen Wellenlänge Strahlung absorbiert, bei der anderen jedoch nicht. Auch hier kann durch das Verhältnis der Strahlungsintensitäten zueinander auf die integrale Gaskonzentration geschlossen werden. Da es sich um hyperspektrale Aufnahmen handelt, können verschiedene Gase gemessen werden, wenn die jeweiligen Absorptionsbande der Gase ausgewertet werden. Wie auch beim fünften Verfahren wird die integrale Gaskonzentration dann mit der Geschwindigkeit des Gases verrechnet, um den Volumenstrom zu berechnen. Es bleibt offen, wie die Gasgeschwindigkeit aus den hyperspektralen Bildern und mit welchem Ansatz aus den verschiedenen Messgrößen der Volumenstrom bestimmt wird. Die bei diesem Verfahren genutzte hyperspektrale Kamera ist zwar kommerziell verfügbar, jedoch liegt der Preis bei ca. 800.000 – 980.000 US-Dollar<sup>1</sup>. Die Anschaffung einer solchen Kamera ist nicht nur für die Mehrheit der Betreiber von Anlagen zur Erzeugung von Biogas, sondern auch für spezialisierte Dienstleister wirtschaftlich nicht darstellbar.

### 1.3 Vorhabensziel

Aus diesem Grund wurde in Abgrenzung zu den genannten Verfahren in diesem Projekt ein Messsystem basierend auf kommerziell verfügbaren Sensoren entwickelt und die prinzipielle Machbarkeit einer fernmesstechnischen Quantifizierung von Gasleckagen gezeigt. Zu den Vorteilen der Gasfernesstechnik gehört, dass Leckagen vergleichsweise einfach auch an

---

<sup>1</sup> Aussage der Firma SphereOptics per E-Mail

schwierig oder nicht zugänglichen Orten ermittelt werden können. So sind z. B. Fermenterdome nur mit Hilfe von Hebebühnen oder Einrüstungen und unter Verwendung von Teleskopverlängerungen mit In-situ-Messgeräten inspizierbar. Bezogen auf Biogasanlagen ist insbesondere die Möglichkeit der Inspektion aus sicherer Entfernung ein Vorteil, denn neben dem explosionsfähigen Methan kann Biogas auch giftigen Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) enthalten. Andererseits liefern Gasfernmessgeräte keine punktuelle Gaskonzentration, sondern einen integralen Gaskonzentrationswert entlang des Messpfades.

In diesem Projekt wurde in Teilschritten die Machbarkeit einer fernmesstechnischen Quantifizierung von Gasleckagen untersucht: Zunächst sollte überprüft werden, mit welchen Verfahren mittels Gasfernmessstechnik die ausströmende *Gasmenge* eines Lecks (Leckmassenstrom) ermittelt werden kann. Des Weiteren sollten Biogasanlagen hinsichtlich ihrer Schwachstellen analysiert werden, um so typische Leckszenarien definieren und kategorisieren zu können. Davon ausgehend sollte eine Systemspezifikation erstellt werden, welche die Anforderungen an ein Messsystem beschreibt. Aufbauend darauf sollte im nächsten Schritt ein eigenes Verfahren entwickelt und ein entsprechendes Messsystem aufgebaut werden. Anschließend sollten neben Referenzversuchen mit dem Messsystem im Labor auch erste Messungen auf einem Testgelände sowie vereinzelt in Biogasanlagen erfolgen.

Die Entwicklung eines solchen Messverfahrens stellt ein besonders innovatives Vorhaben dar. Mit ihm wird nicht nur eine Umweltentlastung einschließlich deren Dokumentation ermöglicht, sondern es eröffnet für die meist klein- und mittelständischen Biogas-Anlagenhersteller und -betreiber auch ökonomische Vorteile durch eine optimierte Anlagentechnik und die Reduktion der energetischen Verluste durch Gasleckagen. Aufgrund der gezielten Schwachstellenanalyse und der Möglichkeit zur Erarbeitung konkreter Verbesserungsvorschläge hat das Vorhaben zudem Modellcharakter, wobei die Datenerhebung für eine Vielzahl von Anlagen in kurzer Zeit umsetzbar ist.

Des Weiteren sollten in diesem Projekt die folgenden zentralen Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie genau kann der Leckmassenstrom geschätzt werden?
- Wie groß ist die Messunsicherheit?
- Unter welchen Bedingungen kann das vorgeschlagene Messverfahren eingesetzt werden?
- Kann anhand der Schätzung der Gaswolkengröße (Gaskamera) und mit der Massenstromschätzung (RMLD) die Ex-Gefahr eingeschätzt und sogar ein Ex-Radius um das Leck abgeleitet werden?



## 2 Szenariendefinition und Anforderungsanalyse

Um das zu entwickelnde Messsystem spezifizieren und mit bisher verfügbaren Verfahren zur Gasleckdetektion vergleichen zu können, wurde nach der Bestandsaufnahme und Aufgabenanalyse zunächst eine Szenariendefinition und eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Dazu wurden die Schwachstellen von Biogasanlagen untersucht. Darauf basierend konnten die verschiedenen Leckageszenarien definiert werden, welche für die Entwicklung des Messsystems relevant sind. Abschließend konnte so die Systemspezifikation erstellt werden. Auf die durchgeführten Untersuchungen wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

### 2.1 Schwachstellenanalyse von Biogasanlagen

Im Rahmen des Projektes wurden zum Zweck der Schwachstellenanalyse und ergänzend zu Angaben aus der Literatur einige Anlagen besichtigt, deren Informationen aufgenommen und häufige Leckagen ermittelt. In der Literatur werden als typische Leckagestellen Tragluftdächer, Seildurchführungen, Klemmschläuche, Behälterlecks sowie Überdrucksicherungen und Gasrohre genannt [11, 12]. Die besichtigten Anlagen wurden bewusst nach ihrer unterschiedlichen Bauweise ausgewählt, um unterschiedliche Leckszenarien abbilden zu können. In Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind die begangenen Anlagen aufgeführt.

**Tabelle 2.1: Betriebstechnische Angaben zu den besichtigten Anlagen**

Anlage	Bundesland	Inbetriebnahme	Fermentation	Größe in kW	Substrat
#1	Hessen	2012	trocken	481	Bioabfälle
#2	NRW	2006	nass	190	Gülle, NAWARO
#3	Thüringen	2006	nass	537	Gülle, NAWARO
#4	NRW	2001	nass	500	Gülle, NAWARO
#5	NRW	2011	nass	490	Gülle, NAWARO

**Tabelle 2.2: Bauarten der besichtigten Anlagen**

Anlage	Fermenter	Nachgärer	Endlager
#1	Garagenfermenter, externe Gasblase	-	Kompostierung
#2	Beton, Tragluftdach	Beton, Tragluftdach	Beton, Tragluftdach
#3	Stahl, Massivdecke Stahl	Beton, Tragluftdach	Lagune
#4	Beton, Tragluftdach	Beton, Tragluftdach	Beton, Tragluftdach
#5	Beton, Massivdecke Beton	Beton, Massivdecke Beton	Beton, Massivdecke Beton



**Abbildung 2.1: Anlage 1: Garagenfermenter**



**Abbildung 2.2: Anlage 2: Fermenter und Nachgärer mit Tragluftdächern**



**Abbildung 2.3: Anlage 3: Fermenter aus Stahl mit Massivdecke und Nachgärer aus Beton mit Tragluftdach**





Abbildung 2.4: Anlage 4: Fermenter und Nachgärer aus Beton mit Tragluftdächern



Abbildung 2.5: Anlage 5: Fermenter aus Beton mit Massivdecke

**Tabelle 2.3: Erfasste Leckagen der besichtigten Anlagen**

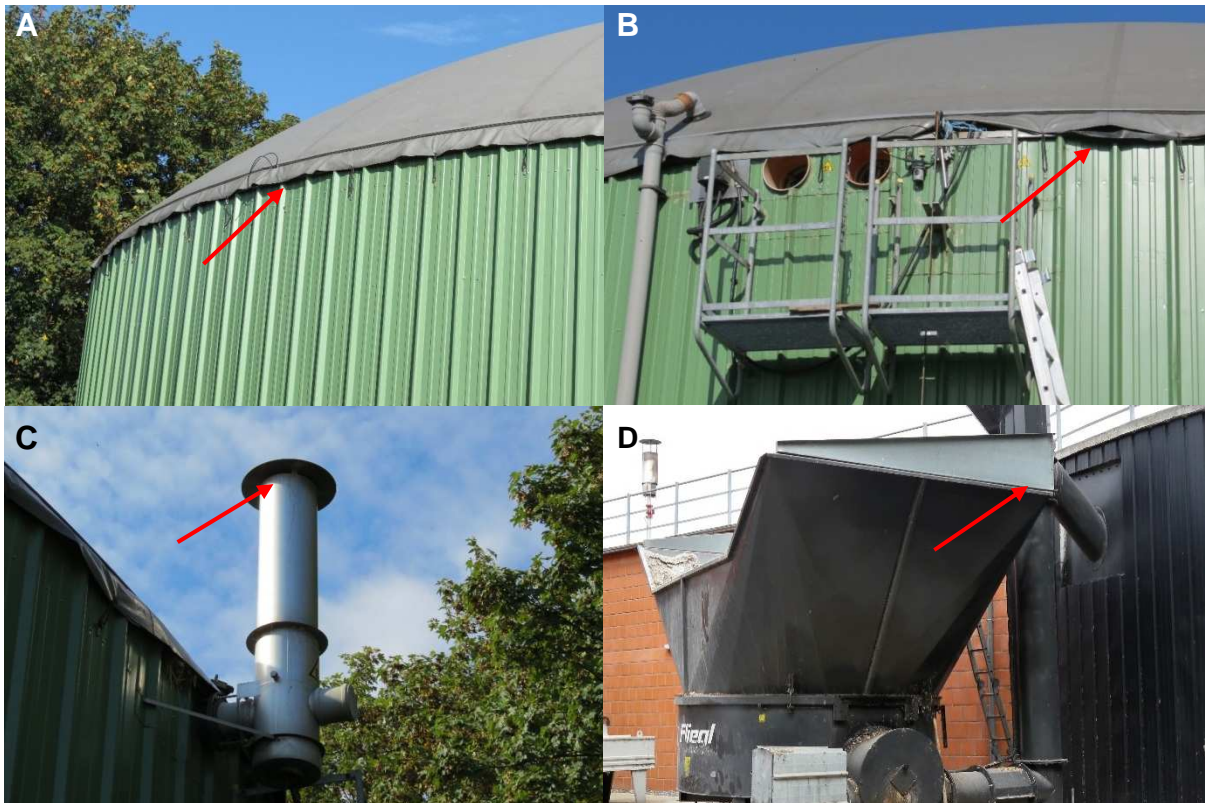
Anlage	Leckagen
#1	<ul style="list-style-type: none"><li>- keine Leckage</li></ul>
#2	<ul style="list-style-type: none"><li>- Dichtung an Übergang von Membran zu Nachgärer</li><li>- Überdruckventile</li></ul>
#3	<ul style="list-style-type: none"><li>- Dichtung an Übergang von Membran zu Nachgärer</li><li>- Seildurchführungen</li><li>- Überdruckventile</li></ul>
#4	<ul style="list-style-type: none"><li>- innere Membran Fermenterdach</li></ul>
#5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Durchlass für Substratfütterung</li><li>- Luken im Fermenterdach</li></ul>

Bei der Anlage #1 handelt es sich um eine Garagenanlage, bei der im Trockenverfahren Abfälle aus der „grünen Tonne“ fermentiert werden. Zum Befüllen und Leeren der Fermenter müssen diese über große Tore geöffnet werden. Das heißt, die größten Biogas-Emissionen sind hier diskontinuierlich beim Öffnen der Tore zu erwarten. Dabei sind die Emissionen aufgrund der großen Fläche der Tore und der kurzzeitigen Emission messtechnisch schwierig zu erfassen. Bei der Begehung der Anlage wurde keine Öffnung durchgeführt. Andere Leckagen konnten nicht festgestellt werden. Daher können in dieser Aufstellung vorerst keine Angaben zu Leckagen gemacht werden.

Bei der Anlage #4 konnte nur eine Leckage in der inneren Membran des Fermenterdachs festgestellt werden, da aufgrund der zur Zeit der Begehung vorherrschenden Wetterlage mit sehr starkem Wind (> 12 m/s) eine Erfassung von Leckagen an der Außenhülle der Anlagen nicht möglich war.

Die ermittelten Leckagen decken sich mit Ergebnissen vorheriger Untersuchungen [11–13]. Insbesondere Foliendächer bzw. die Abdichtung der Membranen an den Behälterwänden weisen oftmals Leckagen auf.

Wie anfällig eine Biogasanlage für Leckagen ist, hängt von der Anzahl an Durchführungen und Durchlässen in der Fermenter-, Nachgärer- und Endlagerwand, von der Gestaltung der Behälter-Abdeckung (z. B. Beton-, Tragluft- oder Einfoliendach) sowie der allgemeinen Wartung und Instandhaltung der Anlage ab. Unterschiedliche Dach-Bautypen weisen unterschiedliche Potenziale für Schwachstellen auf. So zeigt sich z. B. bei Folien- im Vergleich zu Massivdächern, eine erhöhte Gefährdung durch Beschädigung der Membran oder Undichtigkeiten am Übergang zwischen Folien und Behälterrind. Auch hat die Witterung einen größeren schädigenden Einfluss auf Foliendächer als auf solche aus Beton oder Stahl. Frostschäden an Nachgärern oder Endlagern zum Beispiel können zu signifikanten Leckagen an der Dachabdichtung führen. Grundsätzliche Leckagequellen bei Abdeckungen in Form von Foliendächern sind undichte Nähte, defekte Dichtungen am Folienabschluss und Löcher in Membranen. Bei Massivdächern hingegen können eingelassene Deckel und Luken eine Emissionsquelle darstellen, die regelmäßig überprüft werden muss. Bei Beton kann es zu Säurekorrosion, bei Metall zu Rostbildung und in Folge zu Behälterleckagen kommen [14].



**Abbildung 2.6:** Beispiele für Leckagestellen, die bei Anlagenbegehungen gefunden wurden. Pfeile kennzeichnen den Leckort. A: Übergang von Foliendach zur Wand eines Nachgärers, B: Seildurchführung in Fermenterwand, C: Auslass des Überdruckventils, D: Durchführung für Substrateinbringung

Bei Durchlässen in der Behälterwand können z. B. schlecht abgedichtete Rührwerke, Fütterungen, Bullaugen, Rohrleitungen, Verschraubungen oder unzureichend gefettete Seilzüge potenzielle Leckagequellen darstellen, die regelmäßig überprüft und gewartet werden müssen. Grundsätzlich gilt, umso mehr Durchlässe sich in einer Behälterwand befinden, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Leckage. Aber auch undichte Rohrleitungen, Anschlussstellen, Überdruckventile oder offene Güllelager können Biogas emittieren und zur Methanfreisetzung führen.

Die besichtigten Anlagen stellen einen kleinen Ausschnitt aus der Vielzahl verschiedener Anlagentypen dar. In der Regel ist jede Anlage den örtlichen Gegebenheiten, den verfügbaren Rohstoffen und der betrieblichen Größe des vorher bestehenden Betriebs angepasst. Somit ergeben sich zwar häufig auftretende Schwachstellen. Um jedoch einen genaueren Überblick über all diese sehr individuellen Biogasanlagen zu bekommen und schlussendlich eine präzise Aussage über die Klimarelevanz der Biogasproduktion tätigen zu können, sind deutlich mehr Untersuchungen von Anlagen unterschiedlicher Bauart sowie Anlagen in unterschiedlichen Regionen nötig.

## 2.2 Definition relevanter Leckszenarien

Für eine quantitative Erfassung von Biogas-Leckagen ist es entscheidend, in welchen unterschiedlichen Formen und Ausprägungen Leckagen auftreten. Dies ist abhängig vom Ort der auftretenden Undichtigkeit in der Anlage wie auch von der zeitlichen Schwankung der Emissions-Menge. So sind punktuell auftretende Leckagen sehr viel einfacher zu quantifizieren als

linienförmige, wie sie an den Rändern von Foliendächern vorkommen können. Flächige Biogasquellen mit meist diffusem Emissionsverhalten wie z. B. offene Güllelager sind noch schwieriger quantitativ zu erfassen. Emittiert eine Leckage zudem nicht kontinuierlich, weil die Gasmenge z. B. druckabhängig ist, erschwert dies die Erfassung zusätzlich. Messungen über einen längeren Zeitraum sind hier von Nöten bzw. es muss darauf geachtet werden, in welcher Prozessphase eine Messung durchgeführt wird. Beispiele für die genannten verschiedenen Leckageformen sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

**Tabelle 2.4: Kategorien von Leckagen an Biogasanlagen mit Beispielursachen**

punktuell	linienförmig	flächig
undichte Nähte in Fermenterabdeckungen	undichte Nähte in Fermenterabdeckung	offene Güllelager
defekte Dichtung Übergang Folie/Fermenter	defekte Dichtung Übergang Folie/Fermenter	
defekte Dichtung von Luken und Fenstern	defekte Dichtung von Luken und Fenstern	
Löcher in Fermenter-Hauben		
Durchlässe in Fermenterwand		
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Rührwerke</li> <li>○ Substrateinbringung</li> <li>○ Bullaugen</li> <li>○ Rohrleitungen</li> <li>○ Seilzüge</li> <li>○ Instrumentierung</li> </ul>		
undichte Rohrleitungen, Anschlussstellen		

Für die Vorbeugung bzw. die Beseitigung von Leckagen muss zudem zwischen wartungsbedingten und konstruktionsbedingten Schäden unterschieden werden. Erstere lassen sich durch regelmäßige Kontrollen und Wartung der Anlage verhindern oder zumindest minimieren. Letztere sind bedingt durch Verschleiß, Korrosion und Witterungseinflüsse nicht zu vermeiden und müssen vorausschauend in regelmäßigen Abständen systematisch überprüft, erfasst und behoben werden. Um eine Einschätzung der Lebensdauer einzelner Bauteile geben zu können, sind weitere Untersuchungen auf mehreren Anlagen notwendig. Informationen über die Bauteillebensdauer wären jedoch sehr wertvoll für eine Empfehlung bezüglich Wartungsdauer und Leckageüberprüfung. Hilfreich hierbei wäre es, Empfehlungen über komponentenspezifische Wartungsintervalle geben zu können. Eine solche Empfehlung könnte nach weiteren eingehenden Studien von mehreren Anlagen mit ausgebildeten Gasspürern, einer Quantifizierung und daraus folgender Priorisierung der Überwachung von Anlagenkomponenten erfolgen.

## 2.3 Abschätzung wirtschaftlicher und energetischer Verluste

Theoretisch betrachtet verursacht eine Leckage an einer Biogasanlage mit einem Durchmesser von 2 cm schon einen Verlust von ungefähr 30 m<sup>3</sup>/h, abhängig vom Anlagendruck. Annäherungsweise kann die Strömungsgeschwindigkeit des austretenden Gases über den inneren Anlagendruck und die Dichte des Biogases berechnet werden. Darüber ergibt sich der entweichende Volumenstrom. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Menge an entweichendem Methan in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (die 25-fache Menge) angegeben. Dies bedeutet bei einer mittleren Anlagengröße von ca. 470 kW einen äquivalenten Verlust von ca. 500 g CO<sub>2äq</sub>/kWh. Dies wiederum würde die verursachten Emissionen der Biogasanlage in dieselbe Größenordnung wie Anlagen mit fossilen Energieträgern (Mix aus Kohle, Gas und Öl) bringen [15]. Das bedeutet, dass der positive Effekt für den Klimaschutz bei der Nutzung von Biogasanlagen zur Energieumwandlung durch mögliche Gasleckagen schnell relativiert wird.

Eine konkrete Berechnung der wirtschaftlichen Verluste durch Gasleckagen von Biogasanlagen kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Zum einen kann eine Betrachtung von Seiten der Einnahmen, zum anderen von Seiten der Ausgaben erfolgen. Einnahmeverluste bedeuten, durch Leckagen verlorenes Gas wird nicht verstromt und erbringt somit keinen Gewinn. Für die Berechnung dieses Verlustes müssen die betriebstechnischen Daten einer Anlage betrachtet werden. Die benötigten Kennwerte sind hier die Konzentration an Methan im Biogas (in Vol.-%), der elektrische Wirkungsgrad des BHKW (in %), die Wärmekennzahl sowie der Wärmenutzungsgrad (in %), die Vergütung für die produzierte Wärme (cent/kWh) und die Vergütung für den eingespeisten Strom (cent/kWh), abhängig von dem jeweils gültigen EEG. Über den gemessenen Volumenstrom an verlorenem Biogas kann der Verlust an Methan (m<sup>3</sup>/h) ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Angaben wird die nicht produzierte Feuerungswärmeenergie (kWh) und die daraus resultierende nicht genutzte elektrische Energie sowie die nicht genutzte Wärme (in kWh) berechnet. In folgendem Beispiel wird von einer Leckage von 0,5 m<sup>3</sup>/h ausgegangen. Diese Leckage würde einen Verlust von ca. 2.600 € p. a. bedeuten.

**Tabelle 2.5: Exemplarische Beispielrechnung zum Einnahmeverlust durch eine Gasleckage**

Angaben Betreiber	Konzentration CH <sub>4</sub> im Biogas: 55 Vol.-%
	Elektr. Wirkungsgrad BHKW: 42%
	Wärmekennzahl: 1,02
	Wärmenutzungsgrad: 70%
	Vergütung Wärme: 3 cent/kWh
	Vergütung Strom: 21,5 cent/kWh
Ermittelte Leckage	Volumenstrom Biogas: 0,5 m <sup>3</sup> /h
	→ Verlust CH <sub>4</sub> : 0,28 m <sup>3</sup> /h
Berechnung der Verluste	Feuerungswärmeenergie: 2,74 kWh
	→ Energieverlust elektr.: 1,15 kWh
	→ genutzte Wärme: 0,79 kWh
	→ <b>finanzieller Verlust: ca. 2.600 € p. a.</b>

Dies stellt den finanziellen Verlust einer Leckage dar, wenn eine Kalkulation nur aus Sicht der Einnahmen erfolgt. In der Praxis entstehen nicht unmittelbar Einnahmeverluste, da der Motor einer Anlage in der Regel unter voller Last gefahren wird. Das bedeutet, Gasverluste werden



mit einem höheren Aufwand an eingebrachtem Substrat ausgeglichen. Somit muss für eine praxisnahe Verlust-Kalkulation der Mehraufwand an Substratkosten betrachtet werden. Für diese Berechnung müssen betriebsindividuell die Kosten der einzelnen Komponenten der Substratmischung ermittelt werden. Zudem werden mittels der in den „Faustzahlen Biogas“ der KTBL [16] angegebenen Werte für Trockenmasse (in kg), organischer Trockenmasse (in kg), dem theoretischen Biogasertrag ( $I_n$ /kg oTM), dem theoretischen Methangehalt (in Vol.-%) und -ertrag ( $I_n$ /kg oTM) die Biogasausbeute (in  $m^3$ ) pro eingesetztem kg Substrat (in FM) berechnet. Darüber kann ermittelt werden, welche Masse an Substrat zum Ausgleich einer bestimmten Menge verlorenem Biogas eingesetzt werden muss, um die Motorleistung bei voller Last zu erhalten. Der Mehraufwand an Substrat bedeutet die unmittelbaren Mehrkosten, die der Anlagenbetreiber durch eine Leckage zu tragen hat. In der folgenden Beispielrechnung mit einer Leckage von  $0,5 m^3/h$  ergibt sich ein Mehraufwand von 27 t Substrat und somit Kosten von ca. 690 € pro Jahr.

**Tabelle 2.6: Exemplarische Beispielrechnung zu Mehrausgaben aufgrund einer Gasleckage**

Angaben Betreiber	Aufteilung Substrat-FM: 70 % Mais-Silage, 30 % Rindergülle Kosten Substrat: 35 € (Mais-Silage); 2 € (Rindergülle)
Ermittelte Leckage	$0,5 m^3/h$
Berechnung über KTBL-Faustzahlen	TM, oTM (%) und Biogasertrag: 35 %, 95 %; 10 %, 80 % und $650 I_n/kg$ oTM, $380 I_n/kg$ oTM → Biogasausbeute: $216 m^3/kg$ FM, $30 m^3/kg$ FM → $160 m^3/kg$ FM → Mehraufwand an Substrat wegen Biogasverlust: 27 t → <b>finanzieller Mehraufwand: ca. 690 € p. a.</b>

Auf die allgemeinen Faustzahlen der KTBL bezüglich der Biogasausbeute für verschiedene Substrate wird deshalb zurückgegriffen, da eine individuelle Bewertung jedes Substrates durch aufwendige Laboranalysen die Kostenersparnis wieder aufheben würde.

Diese Berechnungsgrundlage kann in ein Kalkulationstool einfließen, das eine schnelle Darstellung der finanziellen und energetischen Verluste von Biogas-Leckagen ermöglicht. Eine solche Kalkulation bietet einen sofortigen Anreiz, bestehende Leckagen zu beseitigen und somit die klimaschädliche Wirkung zu reduzieren.

## 2.4 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation

Die Systemspezifikation war einer der Meilensteine (MS 2) im aktuellen Projekt und wurde von den Projektpartnern im Rahmen des AP 1.3 gemeinsam aufgestellt. Um die Systemspezifikation zu erstellen, wurden zunächst die Anforderungen bestimmt, welche das Messsystem erfüllen soll. Dabei kann zwischen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen unterschieden werden. Zu den funktionalen Anforderungen gehört bspw. die Möglichkeit, das Messmodul vertikal neigen und horizontal schwenken zu können, um so RMLD und Gaskamera auf das zu vermessende Leck auszurichten. Außerdem sollen Messungen aufgrund der unterschiedlichen Zugänglichkeiten von Leckagen sowohl für relativ geringe Messabstände ab 3 m als auch für Messabstände bis hin zu 30 m möglich sein. Zu den nichtfunktionalen Anforderungen gehören bspw. die unterschiedlichen Spannungsversorgungen der einzelnen Sensoren, aber auch die zeitgleiche Erfassung aller Sensordaten.

## 2.5 Zusammenfassende Bewertung

Die Schwachstellenanalyse basierend auf durchgeführten Anlagenbegehungen zeigte, dass insbesondere Durchlässe durch die Fermenter-, Nachgärer- oder Endlagerwand sowie die Abdichtungen von Foliendächern anfällig für Gasleckagen sind. Diese Baugruppen werden auch in anderen Untersuchungen als anfällig für Leckagen genannt [11–13]. Neben konstruktiven Mängeln kann auch eine mangelhafte Wartung der Grund für Leckagen sein. Aufbauend auf der Schwachstellenanalyse konnten relevante Leckszenarien definiert werden. Die Leckagen sind neben der räumlichen Ausprägung auch nach dem zeitlichen Emissionsverhalten zu unterscheiden. Das zeitliche Emissionsverhalten hat insbesondere einen Einfluss auf die zu wählende Messdauer. In der Literatur wird auf zeitliche Schwankungen der Emissionen jedoch bisher nicht eingegangen. Aufgrund des begrenzten Messkegels des verwendeten Messsystems RMLD sind insbesondere Leckagen mit einer großen Ausdehnung schwierig zu erfassen. Bei zukünftigen Arbeiten muss untersucht werden, wie auch Leckagen mit großer Ausdehnung gemessen werden können, beispielsweise durch ein Aufsummieren von Einzelmessungen.

Die exemplarische Abschätzung wirtschaftlicher und energetischer Verluste zeigte, dass schon relativ kleine Leckagen die verursachten Emissionen einer Biogasanlage auf dieselbe Größenordnung wie Anlagen mit fossilen Energieträgern bringen. Zudem liegen die dadurch verursachten wirtschaftlichen Verluste bei mehreren hundert Euro. Dies verdeutlicht die Relevanz der Gasleckagen sowohl für den Klimaschutz als auch für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage. Um durch die Berechnung der wirtschaftlichen Verluste von realen Gasleckagen einen Anreiz für die Anlagenbetreiber zur Beseitigung von Gasleckagen zu schaffen, ist eine Quantifizierung der Leckagen notwendig.

Abschließend wurde die Systemspezifikation für das Messsystem erstellt. Hierbei wurden die Erkenntnisse der Schwachstellenanalyse von Biogasanlagen beachtet, damit die typischen Gasleckagen mit dem Messsystem gemessen werden können.

### 3 Aufbau der Messtechnik und Versuchsaufbauten

Für den vorgesehenen Aufbau des Messsystems wurden die wesentlichen Messgeräte vom Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde ein Sensor zur Erfassung von Umgebungsdruck und -temperatur ausgewählt und beschafft. Es wurde ein Aufbau erstellt, welcher alle für die Messungen notwendigen Komponenten enthält. Außerdem wurde die Software zur Datenerfassung realisiert, damit alle Sensordaten parallel erfasst und gespeichert werden können. Separat wurde eine Auswertesoftware basierend auf der Programmiersprache Python entwickelt, um die einzelnen Sensordaten zu verarbeiten und zu fusionieren. Für Versuche im Labor wurde ein Aufbau mit der Möglichkeit einer definierten Freisetzung von Testgas erstellt.

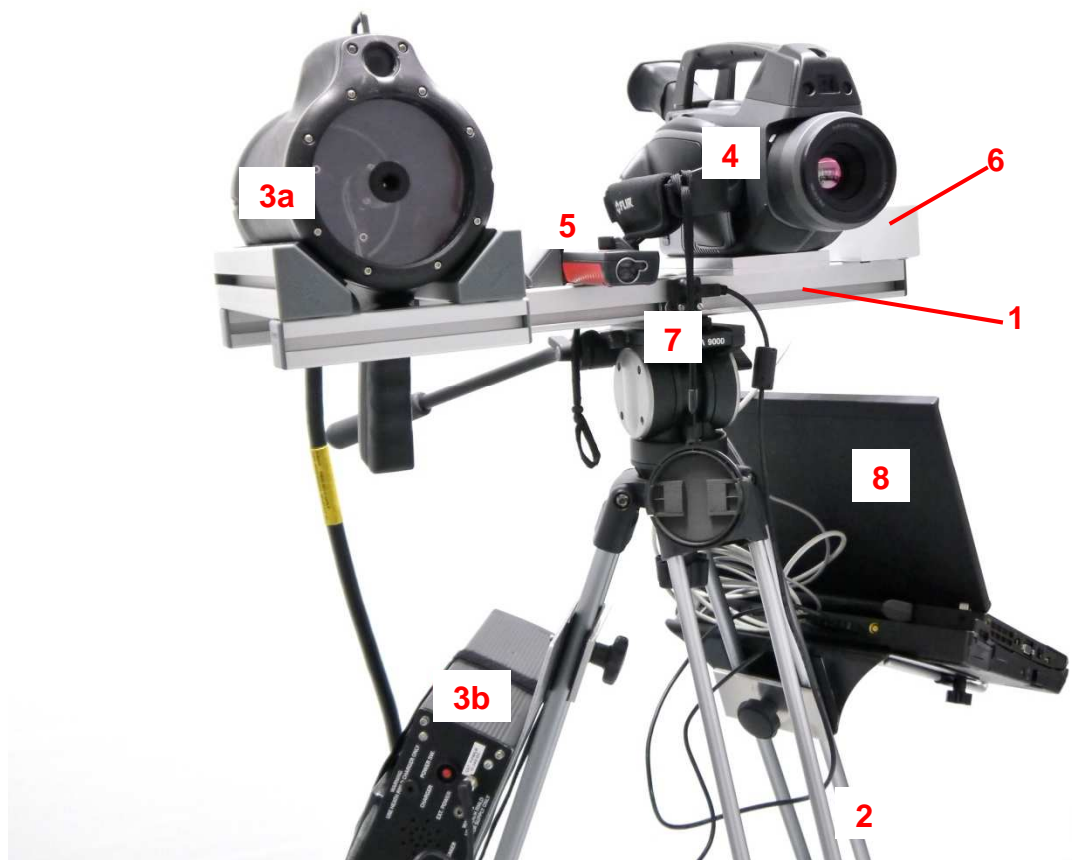
#### 3.1 Realisierung des Messmoduls

Für die fernmesstechnische Schätzung des Methanmassenstroms nach dem hier verwendeten Modellansatz sind verschiedene Sensoren notwendig. Zum einen der Remote Methane Leak Detector (RMLD) der Firma Sewerin zur Messung einer integralen Gaskonzentration (in ppm) im Messpfad. Des Weiteren wird eine Thermografiekamera zur Gasvisualisierung GF320 der Firma FLIR (sog. Gaskamera) verwendet, um die Gaswolke zu visualisieren. Aus den Bildern der Gaskamera soll die Geschwindigkeit des Gases mittels Bildverarbeitungsalgorithmen geschätzt werden. Zusätzlich müssen Umgebungsdruck und -temperatur sowie die Entfernung zwischen Messsystem und Leckage bestimmt werden. Für die Messung von Druck und Temperatur wurde der Sensor BMP 180 der Firma Bosch verwendet. Auf diesen wird mittels Mikrocontroller zugegriffen und so werden die Daten ausgelesen. Zur Bestimmung der Messentfernung wurde der Leica Disto D2 verwendet, ein Laserentfernungsmesser, der für die Vermessung von Räumen eingesetzt wird. Sowohl der BMP 180 als auch der Leica Disto D2 wurden aufgrund ihrer geringen Größe und der einfachen Anbringung am Messgeräteträger sowie den passenden Kennwerten ausgewählt. Um auch bei Tests im Freifeld eine Referenzmesswert für die Gas- bzw. Windgeschwindigkeit zu messen, besteht die Option ergänzend zu dem Messsystem ein Ultraschallanemometer einzubinden. Dieses kann bis zu ca. 10 m vom Messsystem entfernt positioniert werden und erlaubt die Messung der Windgeschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen. Durch die Positionierung in unmittelbarer Nähe zu den simulierten Leckagen und eine entsprechende Ausrichtung des Ultraschallanemometers kann so eine Referenzgeschwindigkeit in der Bildebene der Gaskamera bestimmt werden.

Die verwendeten Sensoren wurden auf einem Messgeräteträger (1) angebracht (vgl. Abbildung 3.1). Der Geräteträger ist mit dem Schwenk-Neige-Kopf eines Stativs (2) verbunden. Das Gehäuse des RMLD wurde nicht angepasst, sondern der Sensorkopf des RMLD (3a) in einer Halterung fixiert. Dadurch ist es weiterhin möglich, das RMLD als mobiles Gerät für eine vorherige Ortung der Leckagen zu nutzen. Die Gaskamera (4) wurde mit einer eigens dafür angefertigten Adapterplatte an dem Geräteträger angebracht. Die Adapterplatte ermöglicht dabei die wiederholgenaue Anbringung auf dem Träger und so die definierte Ausrichtung von RMLD und Gaskamera zueinander. Mittig zwischen RMLD und Gaskamera ist der Laserentfernungsmesser (5) angebracht, um die Messentfernung zu bestimmen. Zusätzlich sind an dem Messgeräteträger der Sensor zur Erfassung von Umgebungsdruck und -temperatur (6) sowie eine visuelle Kamera zu Dokumentationszwecken (7) befestigt. Die Auswerteelektronik des RMLD (3b) sowie der Datenerfassungsrechner (8) sind an den Standbeinen des Stativs angebracht. Diese Umsetzung vereint alle relevanten Sensoren sowie den Datenerfassungsrechner in einem Aufbau und ermöglicht so die flexible Positionierung und Ausrichtung des Messsystems

auf zu messende Leckagen. Der Aufbau ist dabei sowohl im Labor als auch im Freifeld einsetzbar. Die Anbringung des gesamten Messmoduls auf einem Stativ ermöglicht dabei den sicheren Stand auch auf unwegsamem Untergrund. So ist die flexible Positionierung durch eine einzelne Bedienperson möglich.

Neben den funktionalen Anforderungen, welche für den mechanischen Aufbau zu beachten sind, gehören zu den nicht funktionalen Anforderungen verschiedene konstruktive Anforderungen sowie Anforderungen an die Schnittstellen und die Daten, auf welche im nächsten Abschnitt im Rahmen der Messdatenerfassung eingegangen wird.



**Abbildung 3.1:** Mechanischer Aufbau des Messsystems bestehend aus Messgeräteträger (1), Stativ (2), RMLD mit Detektor- (3a) und Rechenmodul (3b), Gaskamera (4), Entfernungsmesser (5), Sensor für Umgebungsdruck und -temperatur (6), visueller Kamera (7) sowie Laptop zur Messdatenerfassung (8)

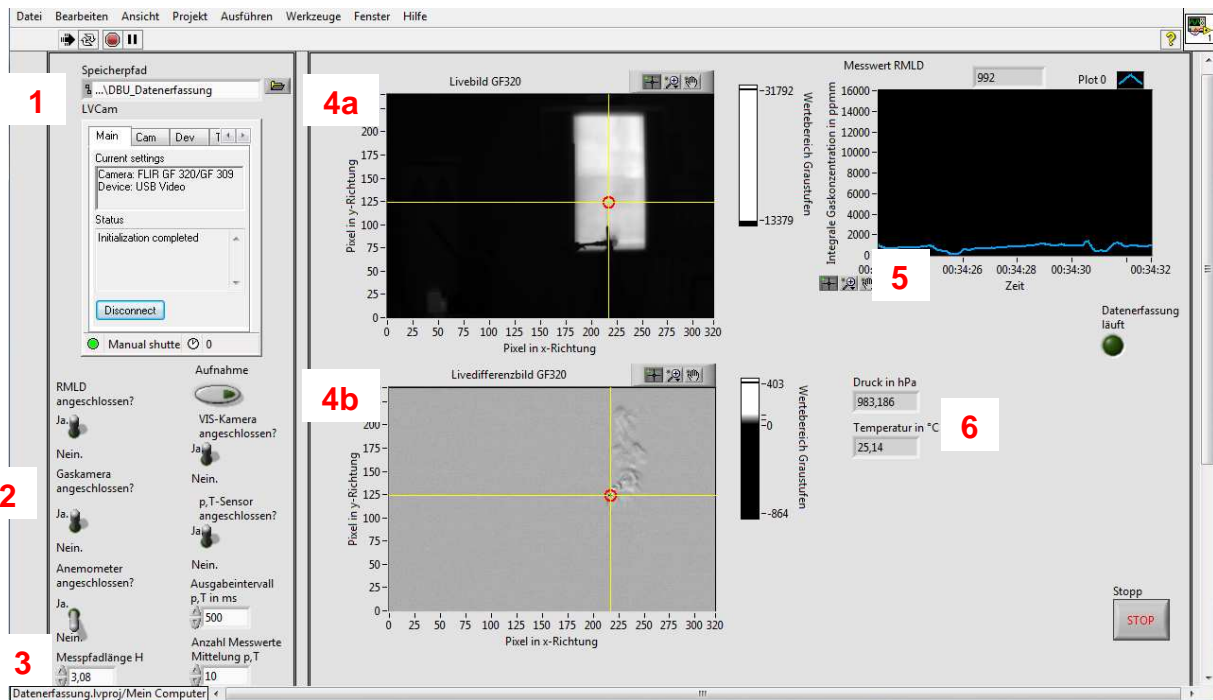
### 3.2 Implementierung der Messdatenerfassung

Die Sensoren benötigen unterschiedliche Spannungsversorgungen. Gaskamera, RMLD, Laserentfernungsmesser sowie das optionale Ultraschallanemometer werden durch entsprechende Akkus versorgt. Der Sensor zur Erfassung von Umgebungsdruck und -temperatur wurde über einen Mikrocontroller eingebunden, welcher sowohl die Spannungsversorgung als auch den Datenzugriff gewährleistet. Alle Sensoren bis auf den Laserentfernungsmesser sind jeweils mit dem Datenerfassungsrechner per USB-Schnittstelle verbunden. Da die Sensoren

unterschiedliche Abtastraten haben, werden die Messdaten entsprechend parallel und unabhängig voneinander von der mittels LabVIEW erstellten Datenerfassungssoftware ausgelesen. Die gemessene Entfernung wird manuell über die Benutzeroberfläche eingegeben, da der Laserentfernungsmesser über keine Schnittstelle verfügt. Abhängig von der Messentfernung wird die Position des RMLD-Messflecks im Bild der Gaskamera angezeigt, um die Ausrichtung des Messsystems durch den Bediener zu ermöglichen.

Die erfassten Daten werden durch den Datenerfassungsrechner mittels grafischer Benutzeroberfläche dargestellt (siehe Abbildung 3.2). Hierüber kann der Bediener zum einen die angeschlossene Sensorik auswählen. Beispielsweise kann auch eine Messung mit einzelnen Sensoren durchgeführt und deren Messdaten können aufgezeichnet werden. Des Weiteren werden die erfassten Messdaten angezeigt. Neben den Messwerten des RMLD und des Druck- und Temperatursensors gehören dazu auch die Bilder der Gaskamera. Diese werden in zwei unterschiedlichen Darstellungen angezeigt. Zum einen als unverarbeitetes Infrarotbild, zum anderen als Differenzbild. Bei dem Differenzbild handelt es sich um die Differenz zweier zeitlich aufeinanderfolgender Bilder. Durch diese Verrechnung sind in den Differenzbildern die zeitlichen Änderungen zwischen zwei Bildern sichtbar. Dadurch, dass sich das Gas bewegt, ist es in den Differenzbildern meist besser sichtbar. So ist anhand des angezeigten Differenzbildes eine bessere Ausrichtung von Gaskamera und RMLD auf die Gasleckage möglich.

Weiterhin ermöglicht die Software zur Datenerfassung auch die Speicherung von Messdaten. Dabei werden die Daten mit Zeitstempeln versehen und abgespeichert. Pro Minute an aufgezeichneten Daten wird eine Datenmenge von ca. 300 MB gespeichert. Damit ist die Aufzeichnung von Messdaten über mehrere Minuten je Leckage bei mehreren Leckagen an einer Anlage problemlos möglich. Der Bediener kann den Dateipfad auswählen, unter dem die Messdaten gespeichert werden. Für jede Aufnahme wird automatisch ein Ordner erstellt und dem Zeitpunkt der Aufnahme entsprechend benannt. Bei der Aufnahme werden die Messwerte von RMLD, Druck- und Temperatursensor, die Messentfernung und die Position des RMLD-Messflecks im Gaskamerabild sowie optional die Daten des Ultraschallanemometers in jeweils einer csv-Datei gespeichert. Die Bilder der Gaskamera werden einzeln als png-Dateien gespeichert. Um die beobachtete Szene zu dokumentieren, wird zusätzlich das Bild einer visuellen Kamera bei Beginn der Messung abgespeichert.



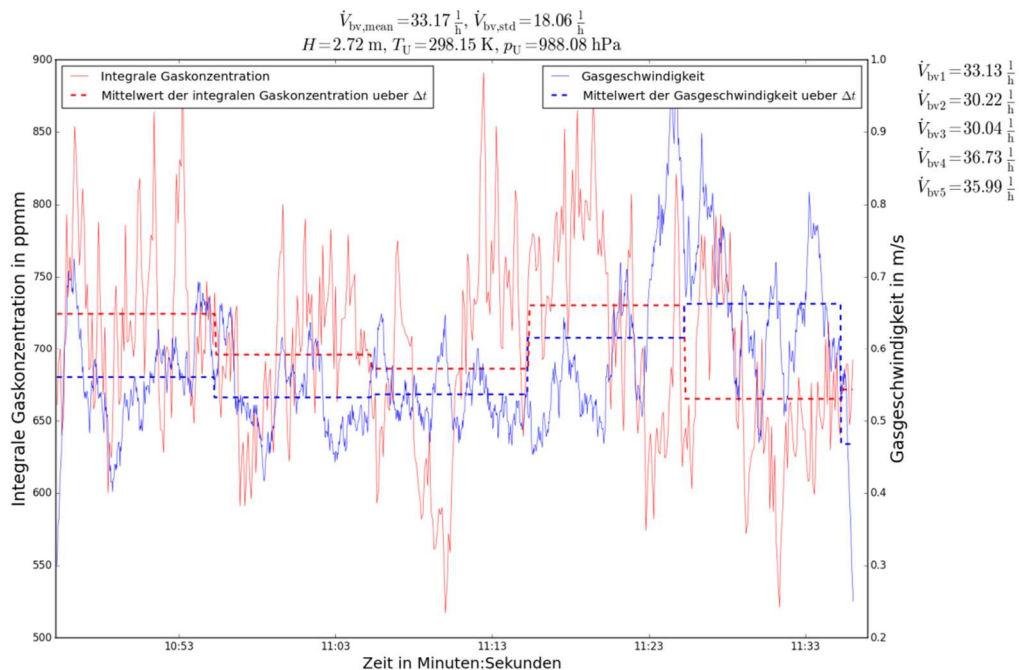
**Abbildung 3.2:** Grafische Benutzeroberfläche des Messdatenerfassungssystems. Angabe des Dateipfades zur Speicherung (1), Auswahl der angeschlossenen Sensoren (2), Eingabefeld für Messpfadlänge (3), Anzeige des Infrarotbildes (4a) und des Differenzbildes (4b) der Gaskamera mit eingezeichnete Position des RMLD-Messflecks, zeitlicher Verlauf des RMLD-Messwertes (5) und Messwertanzeige des Druck- und Temperatursensors (6)

### 3.3 Auswertesoftware

Die zweite Softwarekomponente realisiert die Datenauswertung. Dabei müssen zum einen verschiedene Verarbeitungsschritte auf die einzelnen Sensordaten angewendet und zum anderen die verschiedenen Sensordaten fusioniert werden, um so mittels des Messmodells den Methanmassenstrom abschätzen zu können. Die Sensoren haben unterschiedliche Abtastraten; für eine Auswertung zu einem bestimmten Zeitpunkt werden aber Messwerte aller Sensoren benötigt. Da die Gaskamera mit 30 Hz die höchste Abtastrate hat, wurden die restlichen Sensordaten linear interpoliert, sodass zu jeder Messung der Gaskamera auch Messwerte der übrigen Sensoren verfügbar sind.

Insbesondere die Schätzung der Gasgeschwindigkeit aus den Bildern der Gaskamera beinhaltet rechenaufwändige Bildverarbeitungsschritte. Während der Vorverarbeitung werden die aufgenommenen Bilder der Gaskamera registriert und aus diesen Differenzbilder erstellt. Anschließend werden eine Histogrammspreizung und eine Filterung der Grauwerte durchgeführt. Anhand von Schwellenwerten wird dann ermittelt, in welchen Bildbereichen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit Gas zu sehen ist. Für die Bestimmung der Gasgeschwindigkeit aus den Bildern der Gaskamera wurde eine „Blockmatching“-Methode umgesetzt. Hierbei werden einzelne Blöcke in aufeinanderfolgenden Bildern verglichen, um so die Bewegung von Motiven in den Bildern zu bestimmen. Aus der Verschiebung, der Messpfadlänge sowie der Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern kann die Gasgeschwindigkeit berechnet werden.

Exemplarisch zeigt Abbildung 3.3 das Auswertergebnis einer Datenserie. Dargestellt werden dazu der zeitliche Verlauf der geschätzten Gasgeschwindigkeit und der integralen Gaskonzentration einer Messung. Auch sind in Abbildung 3.3 Mittelwerte der integralen Gaskonzentration und der Gasgeschwindigkeit über Zeitintervalle von 10 s zu sehen (gestrichelte Linien). Diese dienen zur Abschätzung eines Einflusses der Messdauer auf das Ergebnis der Methanvolumenstromschätzung. Außerdem ermöglichen die Auswertungen über die einzelnen Zeitintervalle eine Abschätzung der Wiederholgenauigkeit.

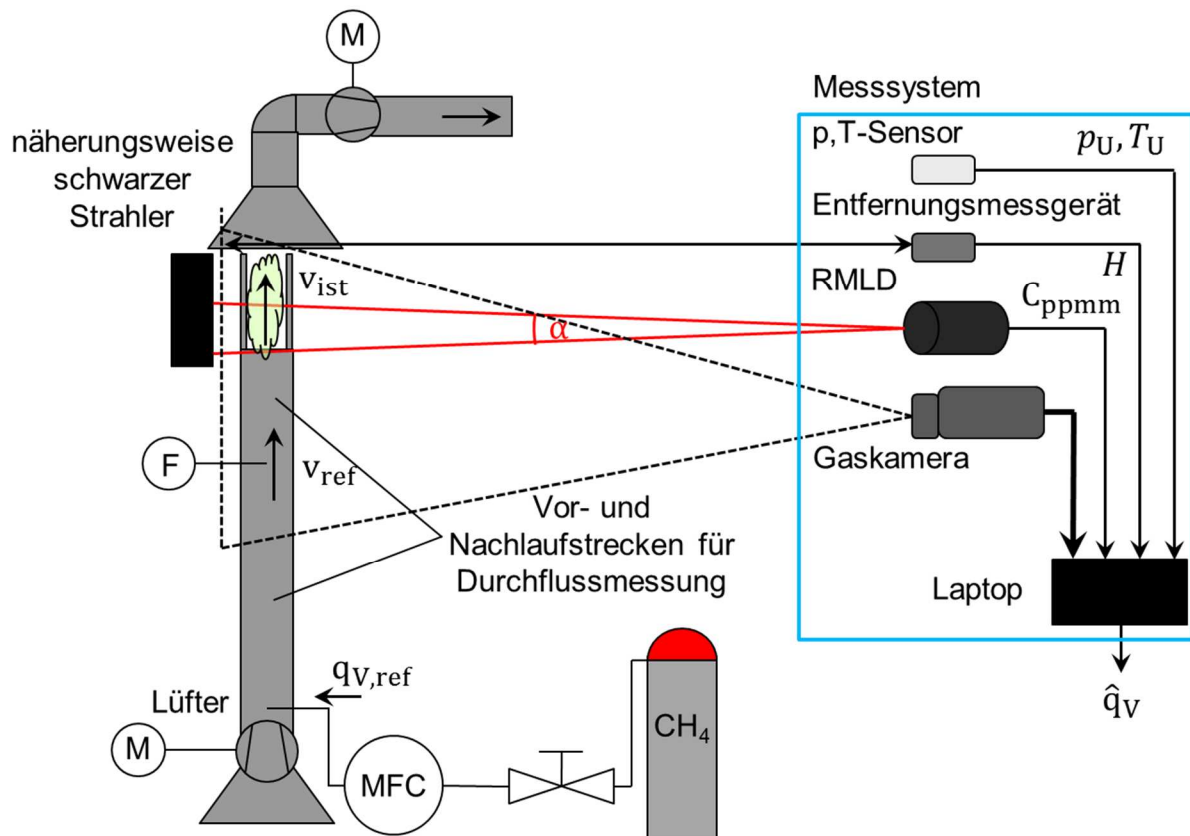


Laenge der Zeitintervalle:  $\Delta t = 10 \text{ s}$ , Gasgeschwindigkeit:  $v_{mean} = 0.579 \frac{m}{s}$ ,  $v_{std} = 0.099 \frac{m}{s}$ , int. Gaskonz.:  $C_{mean} = 700 \text{ ppmm}$ ,  $C_{std} = 67 \text{ ppmm}$

**Abbildung 3.3: Exemplarische Darstellung der zeitlichen Verläufe von integraler Gaskonzentration und geschätzter Gasgeschwindigkeit einer Datenserie.**

### 3.4 Laborversuchsaufbau für Referenzmessungen

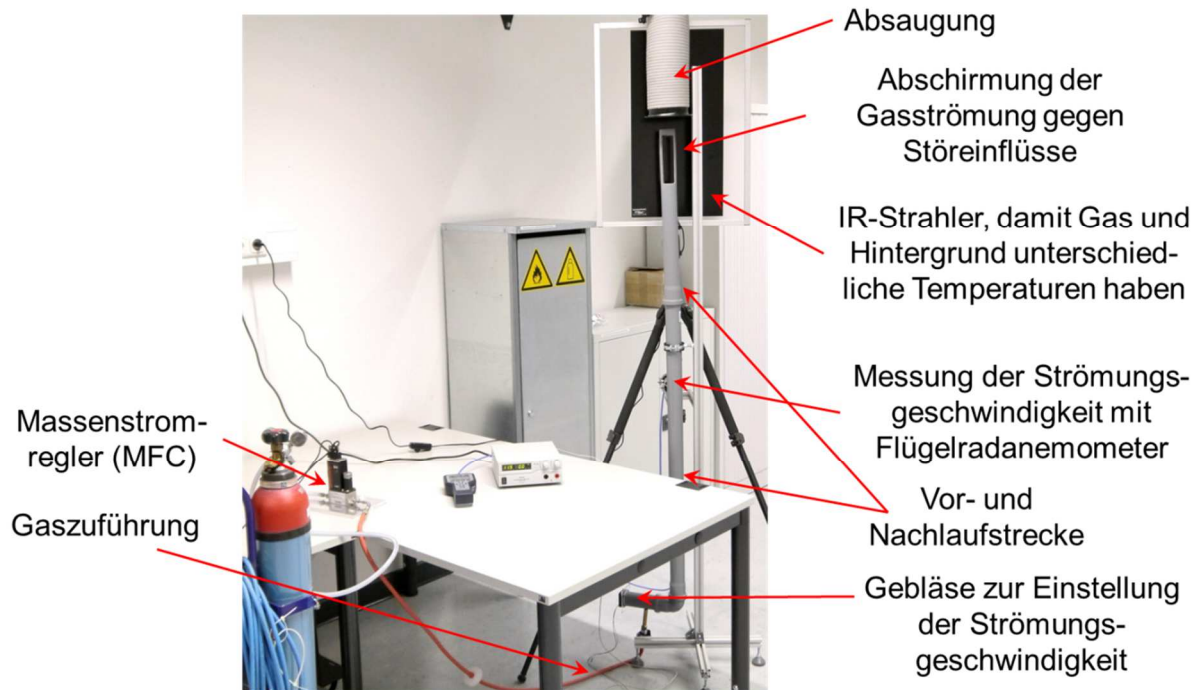
Um das entwickelte Messsystem testen und die Auswertung mittels Messmodell bewerten zu können, wurde ein Laborversuchsaufbau am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik erstellt. Dieser soll die reproduzierbare Einstellung der Messgrößen und die Bereitstellung von Referenzwerten ermöglichen. Um das zu ermöglichen, müssen sowohl der freigesetzte Methanmassenstrom als auch die Strömungsgeschwindigkeit des Gases einstellbar und konstant sein. Außerdem muss ein Referenzmesswert für diese beiden Größen verfügbar sein. Für die Bewertung des Messverfahrens sollen die Störeinflüsse auf die Gasströmung zudem möglichst gering sein. Es soll mit dem Laboraufbau möglich sein, auch vergleichsweise große Leckmassenströme freizusetzen. Für die Messung mit der Gaskamera ist es außerdem erforderlich, dass zwischen dem freigesetzten Gas und dem Hintergrund ein Temperaturunterschied besteht. Die schematische Darstellung des Laboraufbaus ist in Abbildung 3.4 zu sehen.



**Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Laboraufbaus für Referenzmessungen**

Der Aufbau besteht aus einer vertikalen Rohranordnung. Mit einem Lüfter wird in der Rohranordnung eine Luftströmung erzeugt. Durch die Ansteuerung des Lüfters wird die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr eingestellt. In die Luftströmung wird mit einem Massenstromregler (MFC) ein definierter Methanmassenstrom eingebracht. Der eingestellte Wert dient dabei als Referenzmesswert für den geschätzten Methanmassenstrom bzw. Methannormvolumenstrom. Im Rohr wird die Strömungsgeschwindigkeit mit einem Flügelradanemometer gemessen. Dieser Messwert dient als Referenz für die Gasgeschwindigkeit, welche aus den Bildern der Gaskamera bestimmt wird. Am Ende der Rohranordnung befindet sich ein Sichtfenster im Rohr, welches mit einer infrarotdurchlässigen Folie umspannt ist. Im Bereich des Sichtfensters wird die Gasströmung mit dem Messsystem beobachtet. Die Messentfernung wurde dabei so gewählt, dass der Messfleck des RMLD die gesamte Rohrbreite abdeckt, um so das gesamte Gas zu erfassen. Hinter dem Sichtfenster befindet sich dabei ein flächiger IR-Strahler, damit zwischen Gas und Hintergrund ein Temperaturunterschied besteht und das Gas in den Bildern der Gaskamera sichtbar ist. Durch die Absaugung hinter dem Sichtfenster ist gewährleistet, dass auch ein Betrieb mit relativ großer Methanmengen (bis zu ca. 140 l/h) möglich ist. Auf die mit dem Laboraufbau durchgeführten Messungen wird in Abschnitt 5.1 eingegangen.





**Abbildung 3.5: Am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik ausgeführter Laboraufbau für Referenzmessungen**

Die in (4.3), (4.4) und Abbildung 3.4 verwendeten Größen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

**Tabelle 3.1: Verwendete Symbole in den Modellgleichungen (4.3), (4.4) und der schematischen Darstellung des Laboraufbaus (vgl. Abbildung 3.4)**

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\alpha$	Öffnungswinkel des RMLD-Laserkegels	rad
$C_{ppmm}$	Integrale Gaskonzentration	ppmm
$H$	Abstand zwischen Messsystem und Gaswolke	m
$M_M$	Molare Masse von Methan	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
$p_N$	Normdruck nach DIN 1343 [1]	Pa
$p_U$	Gemessener Umgebungsdruck	Pa
$\hat{q}_m$	Berechneter Methanmassenstrom	$\frac{\text{g}}{\text{s}}$
$\hat{q}_V$	Berechneter Methannormvolumenstrom	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$
$q_{V,ref}$	Eingestellter Methannormvolumenstrom	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$
$R$	Universelle Gaskonstante	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
$T_N$	Normtemperatur nach DIN 1343 [1]	K
$T_U$	Gemessene Umgebungstemperatur	K

$v_{\text{ist}}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Methans im Sichtfenster	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$v_{\text{ref}}$	Mittlere eingestellte Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$\bar{v}_{xy}$	Mittlere per Bildverarbeitung berechnete Gasgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Die verwendeten Abkürzungen in Abbildung 3.4 zeigt Tabelle 3.2.

**Tabelle 3.2: Verwendete Abkürzungen in den Modellgleichungen (4.3), (4.4) und der schematischen Darstellung des Laboraufbaus (vgl. Abbildung 3.4)**

Abkürzung	Beschreibung
F	Flügelradanemometer zur Messung von $v_{\text{ref}}$
M	Motor zum Antrieb von Lüfter bzw. Absaugung des Laboraufbaus
MFC	Massenstromregler (engl. Mass flow controller)

### 3.5 Zusammenfassende Bewertung

Das Messmodul wurde realisiert, indem die verwendeten Sensoren auf einem gemeinsamen Messgeräteträger angebracht wurden. Damit sind alle relevanten Sensoren samt Datenerfassungsrechner auf einem Aufbau vereint und ermöglichen die flexible Positionierung und Ausrichtung des Messsystems auf zu messende Leckagen. Abweichend von der Vorhabensbeschreibung wurde kein Messsystemgehäuse gefertigt. Die offene Anordnung der Sensoren auf einem gemeinsamen Geräteträger wurde gewählt, da so sowohl die Gaskamera als auch das RMLD zunächst als Handgerät für die Lokalisierung von Leckagen genutzt werden können. Nach der Anbringung auf dem Geräteträger ist dann die Verwendung als integriertes Messsystem möglich. Ein Nachteil des offenen Aufbaus ist, dass die Anschlussverbindungen zwischen Sensoren und Datenerfassungsrechner ungeschützt sind. Eine Herausforderung bei dem Aufbau stellte die wiederholgenaue Ausrichtung von RMLD und Gaskamera zueinander dar. Diese ist notwendig, damit bei der Auswertung der Messdaten die Position des RMLD-Messflecks im Bild der Gaskamera bekannt ist. Dadurch ist eine Bestimmung der Gasgeschwindigkeit ausschließlich in dem entsprechenden Bereich möglich. Für die Ausrichtung des RMLDs und der Gaskamera war eine geometrische Kalibrierung erforderlich, welche ursprünglich nicht geplant war.

Die Auswertesoftware ermöglicht die automatische Fusion der verschiedenen Sensordaten und damit die Schätzung des Methannormvolumenstroms. Insbesondere die Bildverarbeitung ist jedoch relativ rechenaufwändig. Eine Optimierung der bisherigen Implementierung könnte hier zu einer Verringerung des Rechenaufwandes führen. Insbesondere bei Messungen im Freifeld sind außerdem weitere Untersuchungen durchzuführen, um eine sinnvolle Messdauer zu ermitteln. Hierbei könnte zukünftig durch die automatisierte Erkennung von Störungen wie Windböen ein Ausschluss von Messwerten aus der Auswertung durchgeführt werden.

Der Laboraufbau ermöglicht die Beurteilung der Gasgeschwindigkeit und des geschätzten Methanvolumenstroms. Für die integrale Gaskonzentration sowie Druck und Temperatur sind bisher keine Referenzwerte verfügbar. In der Vorhabensbeschreibung waren lediglich Referenzen für den Massenstrom sowie die Gasgeschwindigkeit vorgesehen. Während der Umsetzung zeigte sich jedoch, dass für alle Messgrößen Referenzwerte benötigt werden, um so die gesamte Messkette beurteilen zu können. Insbesondere die Bestimmung eines Referenzwertes für die integrale Gaskonzentration stellte sich als schwierig heraus. Die Referenzwerte bieten in Zukunft die Möglichkeit, Unsicherheiten oder Abweichungen zu bestimmen und die bisherigen Messergebnisse weiter zu verbessern. Strömungshindernisse wurden mit dem bisherigen Laboraufbau nicht realisiert, da zum einen die vielen Varianten an Anbauten und Bauteilen an Biogasanlagen nicht abgebildet werden können. Zum anderen lag der Fokus bisher zunächst auf der Bereitstellung einer Referenz für die Strömungsgeschwindigkeit, um die Bildverarbeitungsalgorithmen zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit beurteilen zu können. Unvorgesehener Mehraufwand ergab sich auch durch die notwendigen Anpassungen des Laboraufbaus. So musste bspw. der Rohrdurchmesser aufgrund des verwendeten Messgerätes für die Strömungsgeschwindigkeit angepasst werden. Statt der vorgesehenen Erzeugung der Strömung durch eine Absaugung, die sich nicht wie notwendig verstellen ließ, war die Verwendung eines steuerbaren Lüfters notwendig.

## 4 Messmethoden- und Messverfahrensentwicklung

In den folgenden Abschnitten wird auf das entwickelte Messverfahren eingegangen. Dazu wird zunächst die Signifikanz der einzelnen Messgrößen hinsichtlich der Massenstromschätzung aufgezeigt. Anschließend wird das Verfahren zur Gasgeschwindigkeitsschätzung beschrieben, das den Hauptteil der Datenverarbeitung darstellt. Danach wird das verwendete Messmodell zur Schätzung des Leckmassenstroms beschrieben und abschließend die messtechnischen Eigenschaften des Messsystems betrachtet.

### 4.1 Messmodell zur Schätzung des Leckmassenstroms

Im Rahmen des Projektes wurde ein Messmodell verwendet, um die Messdaten der verwendeten Sensoren zu fusionieren. Die Modellgleichung gibt dabei den Methanmassenstrom senkrecht zu den optischen Achsen der Gaskamera und des RMLD durch den Messkegel an. Dazu wird die mittlere Dichte  $\bar{\rho}$  des Methans im Messkegelvolumen mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$  durch die Querschnittsfläche  $A$  des Laserkegels verwendet. Der Volumenstrom berechnet sich wie folgt aus der Querschnittsfläche und der Strömungsgeschwindigkeit des Gases:

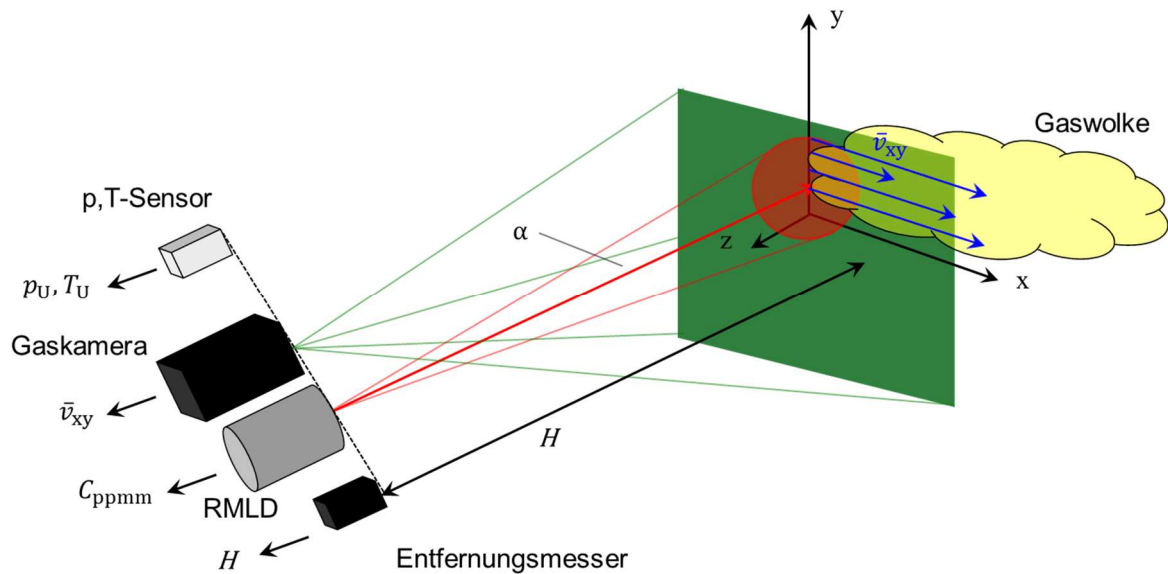
$$\bar{\rho} = \frac{p_U M_M}{R T_U} \frac{C_{ppmm}}{H \cdot 10^6} H \quad (4.1)$$

$$\dot{V} = A \cdot \bar{v}_{xy} \quad (4.2)$$

$$\hat{Q}_m(p_U, T_U, C_{ppmm}, \bar{v}_{xy}) = \bar{\rho} \cdot \dot{V} = \bar{\rho} \cdot A \cdot \bar{v}_{xy} = \frac{p_U M_M}{R T_U} \frac{C_{ppmm}}{10^6} H \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \bar{v}_{xy} \quad (4.3)$$

Der Modellansatz beruht auf physikalischen und geometrischen Zusammenhängen, wie sie in Abbildung 4.1 dargestellt sind.

Dabei sind die getroffenen Annahmen beziehungsweise die Randbedingungen zu beachten, welche erfüllt sein müssen. Eine Annahme ist, dass sich die Gaswolke lediglich in der Bildebene der Gaskamera ausbreitet (Annahme A1). Denn aus den Bildern der Gaskamera kann lediglich die Gasgeschwindigkeit  $\bar{v}_{xy}$  in der Bildebene bestimmt werden. Bewegt sich bspw. das Gas auf das Messsystem zu, kann diese Bewegung in den Bildern der Gaskamera nicht erkannt werden. Bei realen Gasleckagen ist diese Annahme plausibel, da die Ausbreitung des Gases zum einen durch Anlagenbauten eingeschränkt ist. Betrachtet man bspw. eine Leckage an dem Übergang von Fermenterwand zu Foliendach, kann das Gas sich nicht in Richtung der Fermenterwand ausbreiten. Lediglich eine Bewegung auf das Messsystem zu wäre möglich. Zum anderen wird sich Methan aufgrund der geringeren Dichte im Vergleich zu Luft am ehesten nach oben bewegen.



**Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Messszene**

Eine weitere Annahme ist, dass Druck und Temperatur des Gases gleich Umgebungsdruck und -temperatur sind (Annahme A2). Unter dieser Annahme werden Umgebungsdruck und -temperatur am Standort des Messsystems gemessen. Zwar hat das austretende Gas aufgrund der Fermentationsprozesse in der Anlage meist eine erhöhte Temperatur im Vergleich zur Umgebung. Jedoch sind diese Unterschiede meist relativ gering und zudem hat die Temperatur nur einen geringen Einfluss auf die Massenstromschätzung (vgl. Abschnitt 4.2). Relevante örtliche Temperatur und -druckunterschiede zwischen dem Standort des Messsystems und dem Ort der Leckage sind nicht zu erwarten. Lediglich unterschiedliche Sonneneinstrahlung könnte zu größeren Temperaturunterschieden führen. Zu den Randbedingungen zählt, dass das Gas vollständig durch den Lasermesskegel des RMLD strömen muss (Annahme A3). Ansonsten wird nicht die gesamte Gasmenge erfasst und dementsprechend der Methanmassenstrom der Leckage unterschätzt. Dies ist zwar nicht immer gegeben, jedoch kann auch bei einer Unterschätzung des Leckmassenstroms zumindest eine Mindestmenge geschätzt werden. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus den Messverfahren der Sensoren. Für die Gaskamera muss ein Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gaswolke vorhanden sein, da das Gas in den Bildern der Gaskamera sonst nicht sichtbar ist (Annahme A4). Wie oben beschrieben, hat das austretende Biogas meist eine leicht erhöhte Temperatur. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass in den meisten Situationen ein ausreichender Temperaturunterschied vorhanden ist. Für die Messung mit dem RMLD ist außerdem ein Hintergrund erforderlich, damit die ausgesandte Infrarotstrahlung reflektiert wird (Annahme A5). Auch diese Bedingung wird bei den meisten Leckagen erfüllt sein, da sich meist ein Anlagenteil wie bspw. die Fermenterwand im Hintergrund befindet. Nicht erfüllt wäre diese Randbedingung beispielsweise bei einem Loch in einem Foliendach.

## 4.2 Signifikanztests relevanter Einflussgrößen

Zur Betrachtung der auf das Messmodell wirkenden Einflussgrößen wurde die Empfindlichkeit der Modellausgabe bezüglich der einzelnen Messgrößen betrachtet. Mathematisch entsprechen die Empfindlichkeiten den partiellen Ableitungen der Modellfunktion nach den einzelnen Messgrößen. Dabei wird (4.3) zur Schätzung des Methanmassenstroms verwendet. Bei Verwendung von Normdruck  $p_N$  und Normtemperatur  $T_N$  nach DIN1343 [1] kann mit der Modellgleichung die Schätzung eines Normvolumenstroms in Normliter pro Stunde  $\frac{l_N}{h}$  erfolgen:

$$\hat{q}_V(p_U, T_U, C_{ppmm}, \bar{v}_{xy}) = \frac{p_U T_N}{p_N T_U} \frac{C_{ppmm}}{10^6} H \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \bar{v}_{xy} \quad (4.4)$$

Für die partiellen Ableitungen nach den jeweiligen Messgrößen ergibt sich:

$$\frac{\partial \hat{q}_m}{\partial p_U} = \frac{M_M}{R \cdot T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \bar{v}_{xy} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \hat{q}_m}{\partial T_U} = -\frac{p_U \cdot M_M}{R \cdot T_U^2} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \bar{v}_{xy} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \hat{q}_m}{\partial C_{ppmm}} = \frac{p_U \cdot M_M}{R \cdot T_U} \cdot 10^{-6} \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \bar{v}_{xy} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \hat{q}_m}{\partial H} = \frac{p_U \cdot M_M}{R \cdot T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \bar{v}_{xy} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \hat{q}_m}{\partial \bar{v}_{xy}} = \frac{p_U \cdot M_M}{R \cdot T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.9)$$

Hieran lässt sich erkennen, dass für die jeweiligen Empfindlichkeiten nicht ein allgemeingültiger konstanter Wert angegeben werden kann. Die Empfindlichkeiten der Modellausgabe hängen hingegen wiederum von den anderen Messgrößen ab. Um einen konkreten Wert für die Empfindlichkeiten zu berechnen, ist die Wahl eines Arbeitspunktes notwendig. Zunächst wurden plausible Wertebereiche der einzelnen Messgrößen eingegrenzt (vgl. Tabelle 4.1).

Für den Umgebungsdruck  $p_U$  wurden zunächst Höhen von 0 bis ca. 700 m über Normalhöhen null angenommen. Daraus ergeben sich Werte zwischen 925 und 1013 hPa. Der Wertebereich der Umgebungstemperatur  $T_U$  entspricht einem Temperaturbereich von -10 bis 40 °C. Dadurch sollen sowohl Messungen im Winter als auch im Sommer beachtet werden. Die Begrenzung der Gasgeschwindigkeit auf maximale Werte bis 3 m/s wurde aufgrund von Testmessungen angenommen. Dabei zeigte sich, dass bei höheren Gasgeschwindigkeiten das Gas so stark von dem Wind weggetragen und verdünnt wird, dass selbst eine Leckagedetektion mit Gaskamera und RMLD kaum möglich ist. Die Grenzen des RMLD-Messwertes wurden anhand der Messbereichsgrenzen des Gerätes festgelegt. Ebenso wurde für die Messentfernung der Einsatzbereich des RMLD gemäß Herstellerangaben gewählt.

**Tabelle 4.1: Wertebereiche der Messgrößen zur Untersuchung der Modellempfindlichkeiten und betrachtete Arbeitspunkte für die Worst-Case-Abschätzung und eine typische Messsituation**

Messgröße	Wertebereich	Arbeitspunkt zur Worst-Case-Abschätzung $AP_{wc}$	Arbeitspunkt für eine typische Messsituation $AP_{typ}$
$p_U$	[925; 1013] hPa	1013 hPa	969 hPa
$T_U$	[263; 313] K	263 K	293 K
$C_{ppmm}$	[0; 99999] ppmm	99999 ppmm	5000 ppmm
H	[0; 30] m	30 m	20 m
$\bar{v}_{xy}$	$[0; 3] \frac{m}{s}$	$3 \frac{m}{s}$	$1 \frac{m}{s}$

Anhand der partiellen Ableitungen und mit den gewählten Intervallen für die einzelnen Messgrößen ergeben sich die Empfindlichkeiten in Abhängigkeit der anderen Messgrößen. Deshalb wurde zum einen eine Betrachtung der Extremwerte durchgeführt und zum anderen ein Arbeitspunkt gewählt, dessen Werte eine typische Messsituation abbilden sollen. Für die Worst-Case-Abschätzung wurde der Arbeitspunkt derart gewählt, dass die einzelnen Empfindlichkeiten maximiert werden (vgl. Tabelle 4.1). So soll die maximale Empfindlichkeit der Modellausgabe gegenüber den einzelnen Größen abgeschätzt werden. Für die Betrachtung einer typischen Messsituation wurden die Werte der einzelnen Messgrößen so gewählt, wie sie bei Messungen mit großer Wahrscheinlichkeit vorliegen. Hiermit soll abgeschätzt werden, ob das Messmodell eine ausreichende Empfindlichkeit gegenüber den Messgrößen der Gasgeschwindigkeit sowie der integralen Gaskonzentration aufweist. Außerdem kann so der Einfluss von Umgebungsdruck und -temperatur als Störgrößen abgeschätzt werden. Für den Luftdruck wurde der Wert aus der Mitte des Intervalls verwendet. Für die Temperatur wurden 20 °C bzw. 293 K als plausibler Wert angenommen. Der Wert der integralen Gaskonzentration wurde basierend auf Erfahrungen von Gasspürern bei der Inspektion von Biogasanlagen gewählt. Eine Messpfadlänge von 20 m sowie eine Gasgeschwindigkeit von 1 m/s erscheinen ausgehend von den bisher erfolgten Anlagenbegehungen sinnvoll.

Bei Verwendung dieser Arbeitspunkte und mit  $M_M = 16,043 \frac{g}{mol}$  und  $R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$  ergeben sich die in Tabelle 4.2 angegebenen jeweiligen Empfindlichkeiten der Modellgleichung gegenüber den Messgrößen. Für die Angabe des Leckstroms in  $\frac{I_N}{h}$  ergeben sich die Empfindlichkeiten wie in Tabelle 4.3 angegeben.

Die Werte aus Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 zeigen, dass im Extremfall auch der gemessene Druck und die Temperatur zu einer deutlichen Änderung der Modellausgabe führen. Allerdings zeigt die Betrachtung der typischen Messsituation, dass hierbei eine Änderung von Druck oder Temperatur nur zu einer Änderung der Modellausgabe von wenigen  $I_N/h$  führen. Zudem sind derartige Änderungen von Druck und Temperatur im Zeitraum einer Messung, die maximal einige Minuten dauert, nicht zu erwarten. Die Messentfernung H hat einen relativ großen Einfluss. Allerdings ist dieser vernachlässigbar, da sich die Messentfernung während einer Messung nicht ändert.

**Tabelle 4.2: Empfindlichkeiten des Schätzwertes für den Leckmassenstrom gegenüber den Messgrößen für zwei Arbeitspunkte**

Empfindlichkeit	Wert bei Verwendung von AP <sub>WC</sub>	Wert bei Verwendung von AP <sub>typ</sub>
$\left. \frac{\partial \hat{q}_m}{\partial p_U} \right _{AP}$	$6,163 \cdot 10^{-2} \frac{\frac{g}{s}}{hPa}$	$6,146 \cdot 10^{-4} \frac{\frac{g}{s}}{hPa}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_m}{\partial T_U} \right _{AP}$	$-0,237 \frac{\frac{g}{s}}{K}$	$-0,002 \frac{\frac{g}{s}}{K}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_m}{\partial C_{ppmm}} \right _{AP}$	$6,243 \cdot 10^{-4} \frac{\frac{g}{s}}{ppmm}$	$1,191 \cdot 10^{-4} \frac{\frac{g}{s}}{ppmm}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_m}{\partial H} \right _{AP}$	$2,081 \frac{\frac{g}{s}}{m}$	$0,030 \frac{\frac{g}{s}}{m}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_m}{\partial \bar{v}_{xy}} \right _{AP}$	$20,810 \frac{\frac{g}{s}}{\frac{m}{s}}$	$0,596 \frac{\frac{g}{s}}{\frac{m}{s}}$

**Tabelle 4.3: Empfindlichkeiten des Schätzwertes für den Lecknormvolumenstrom gegenüber den Messgrößen für zwei Arbeitspunkte**

Empfindlichkeit	Wert bei Verwendung von AP <sub>WC</sub>	Wert bei Verwendung von AP <sub>typ</sub>
$\left. \frac{\partial \hat{q}_V}{\partial p_U} \right _{AP}$	$309,963 \frac{\frac{l_N}{h}}{hPa}$	$3,091 \frac{\frac{l_N}{h}}{hPa}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_V}{\partial T_U} \right _{AP}$	$-1193,890 \frac{\frac{l_N}{h}}{K}$	$-10,224 \frac{\frac{l_N}{h}}{K}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_V}{\partial C_{ppmm}} \right _{AP}$	$3,140 \frac{\frac{l_N}{h}}{ppmm}$	$0,600 \frac{\frac{l_N}{h}}{ppmm}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_V}{\partial H} \right _{AP}$	$10466,428 \frac{\frac{l_N}{h}}{m}$	$149,78 \frac{\frac{l_N}{h}}{m}$
$\left. \frac{\partial \hat{q}_V}{\partial \bar{v}_{xy}} \right _{AP}$	$104664,276 \frac{\frac{l_N}{h}}{\frac{m}{s}}$	$2995,601 \frac{\frac{l_N}{h}}{\frac{m}{s}}$



### 4.3 Verfahren zur Gasgeschwindigkeitsschätzung

Eine der wichtigsten Messgrößen zur Schätzung des Leckmassenstroms ist die Gasgeschwindigkeit. Dabei ist die Richtung der Gasströmung innerhalb der Bildebene nicht relevant. Für die Auswertung mittels Messmodell ist nur von Bedeutung, mit welcher Geschwindigkeit sich das Gas durch den Messkegel des RMLD bewegt. Strömt das Gas allerdings in eine Richtung, die nicht parallel zur Bildebene ist, kann es zu Projektionsfehlern kommen. Im Gegensatz zu den anderen Messgrößen steht die Gasgeschwindigkeit nicht unmittelbar als Messwert des Sensors zur Verfügung, sondern muss aus den Bildern der Gaskamera ermittelt werden. Dazu sind verschiedene Bildverarbeitungsschritte notwendig (vgl. Abbildung 4.2). Zum einen die Vorverarbeitung der Bilder. Anschließend wird ein Algorithmus zur Schätzung der Geschwindigkeit auf die Bilder angewandt. Dabei werden zunächst die Verschiebungen der Gasstrukturen zwischen Bildpaaren bestimmt. Aus dem zeitlichen Abstand der Aufnahmen, welche aufgrund der Bildrate der Kamera bekannt ist, und mit Kenntnis der Messentfernung, die mit dem Laserentfernungsmesser bestimmt wird, können anschließend aus den Verschiebungen Geschwindigkeiten berechnet werden.



**Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungsschritte**

Im Rahmen der Vorverarbeitung wird zunächst eine Registrierung der Gaskamerabilder durchgeführt. Das bedeutet, dass zwei aufeinanderfolgende Bilder der Gaskamera so übereinander verschoben werden, dass der Bildinhalt möglichst deckungsgleich ist. Dieser Verarbeitungsschritt ist notwendig, da der Sensorarray der Gaskamera von einem Stirlingkühler gekühlt wird. Dieser führt zu Vibrationen der Kamera und dadurch auch zu geringen Verwackelungen der einzelnen Bilder. Diese Verwackelungen sind bezüglich der Geschwindigkeitsschätzung unerwünscht und sollen deshalb durch die Registrierung verringert werden. Nach der Registrierung werden Differenzbilder erstellt. Ein Differenzbild ergibt sich, indem pixelweise ein Bild vom vorherigen subtrahiert wird. Dadurch stellen die Grauwerte des Differenzbildes die zeitlichen Änderungen zwischen zwei Bildern dar. Der Bildinhalt, welcher sich zeitlich nicht ändert, ist in den Differenzbildern nicht mehr zu sehen. Die Verwendung von Differenzbildern hat den Vorteil, dass die Gasbewegung darin deutlicher sichtbar ist als in den unverarbeiteten Bildern der Gaskamera. Im Anschluss wird eine Histogrammspreizung auf die gesamte Differenzbildserie angewandt. Dadurch wird der Kontrast in den Bildern verbessert und die Gaswolke ist besser erkennbar. Schlussendlich werden die Differenzbilder jeweils tiefpassgefiltert, um das Rauschen zu verringern.

Auf die so vorverarbeiteten Bilder wurde der Algorithmus zur Schätzung der Verschiebung angewandt. Die auf [8] basierende umgesetzte Blockmatching-Methode ordnet ein Pixel im

Ausgangsbild jeweils einem um  $m, n$  versetzten im darauffolgenden Bild zu. Dabei werden die Grauwerte der Umgebung des jeweiligen Pixels anhand einer Kostenfunktion miteinander verglichen:

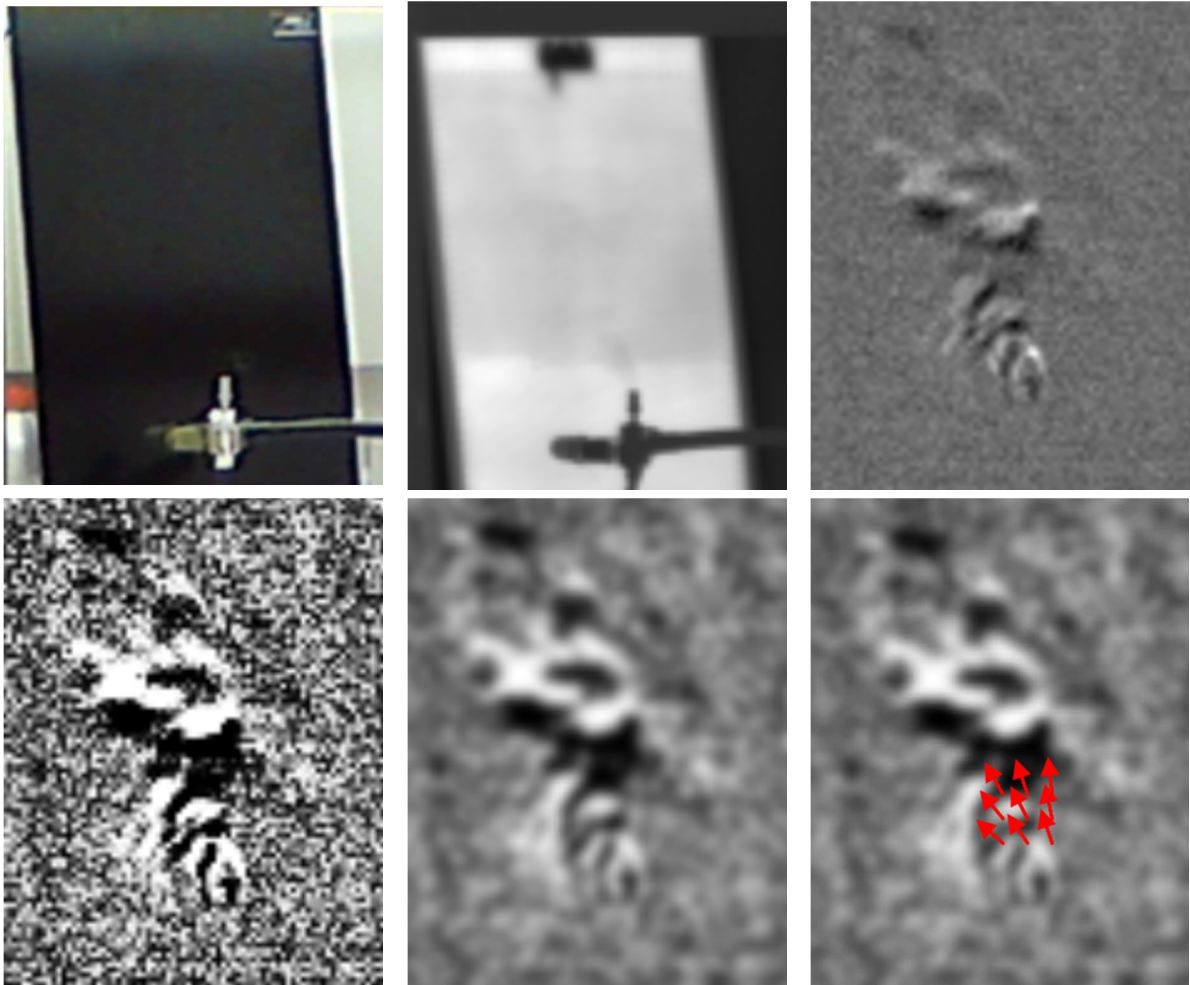
$$C_{m,n}(x, y) = \sum_{i=x-\frac{N-1}{2}}^{x+\frac{N-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{N-1}{2}}^{y+\frac{N-1}{2}} \left( \frac{B_{1,i,j} - B_{2,i+m,j+n}}{B_{1,i,j} + B_{2,i+m,j+n}} \right)^2 \quad (4.10)$$

mit

- $B_1$ : betrachteter Bildausschnitt in Bild 1
- $B_2$ : betrachteter Bildausschnitt in Bild 2
- $i, j$ : Pixelkoordinaten innerhalb der Bildausschnitte
- $m, n$ : Versatz des betrachteten Bildausschnittes in Bild 2 in Pixeln
- $N$ : Kantenlänge der Bildausschnitte in Pixeln
- $x, y$ : Pixelkoordinaten im Bild der Gaskamera

Die Kostenfunktion wird für alle Pixel in einem gegebenen Suchfenster bestimmt, d. h. die Blöcke von verschiedenen Pixeln können sich je nach Blockgröße überlappen. Die Blockgröße stellt dabei einen Entwurfparameter dar, für den aufgrund von Tests ein Wert von 7 gewählt wurde. Die beiden Blöcke mit dem geringsten Wert der Kostenfunktion werden einander zugeordnet und aus ihren Koordinaten die Verschiebung berechnet. Die bestimmte Verschiebung wird dann dem Pixel in der Mitte des Blockes zugewiesen. Anschließend werden die Verschiebungen in Geschwindigkeiten umgerechnet. Dazu wird zum einen die Zeitdifferenz zwischen den jeweils verwendeten Bildern und zum anderen die Messentfernung genutzt.

Da der Algorithmus pro Bildpaar ein Verschiebungs- bzw. Geschwindigkeitsfeld bestimmt, ist zudem ein weiterer Auswertungsschritt notwendig. Dabei wird sowohl räumlich als auch zeitlich eine Mittelung durchgeführt, um eine mittlere Gasgeschwindigkeit zu schätzen, welche für die weitere Berechnung mittels Messmodell genutzt werden kann. Anschaulich sind die einzelnen Verarbeitungsschritte in Abbildung 4.3 dargestellt. Obwohl das Gas im gefilterten Bild scheinbar schlechter zu erkennen ist, wird durch die Filterung das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Dadurch haben die Grauwerte aufgrund von Gas im Bild einen größeren Einfluss auf die Kostenfunktion als Grauwertänderungen durch Rauschen.



**Abbildung 4.3:** Exemplarische Darstellung der einzelnen Bildverarbeitungsschritte an einem Bildausschnitt mit Gaswolke (von links nach rechts und von oben nach unten): visuelles Bild der Düse vor IR-Strahler, IR-Bild der Gaskamera, Differenzbild, Histogrammspreizung und Normierung, Filterung, Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes durch Pfeile

#### 4.4 Zusammenfassende Bewertung

Das verwendete Messmodell ermöglicht die Schätzung des Methanstromvolumenstroms mittels kommerziell verfügbarer Messgeräte. Dadurch ist die aufwändige Entwicklung neuartiger Sensorik nicht notwendig. Zwar müssen für die Messung einige Randbedingungen erfüllt sein (siehe Abschnitt 4.1). Bisherige Testmessungen in Biogasanlagen zeigen jedoch, dass dies meist der Fall ist. Dennoch ist bei zukünftigen Messkampagnen im Freifeld und in Biogasanlagen zu untersuchen, in welchem Maße die erforderlichen Randbedingungen nicht erfüllt werden und welche Auswirkungen das auf die Messergebnisse hat.

Für das Messmodell wurden Signifikanztests bzgl. seiner Einflussgrößen durchgeführt. Die Empfindlichkeiten gegenüber der integralen Gaskonzentration und der Gasgeschwindigkeit zeigen, dass eine Änderung dieser Größen zu einem ausreichenden Messeffekt führt. Im Fall der integralen Gaskonzentration ist die Empfindlichkeit gegenüber der Änderung um 1 ppm zwar relativ gering. Jedoch ist hier zu beachten, dass die Messwerte bei Leckagen nach Erfahrungen von Gasspürern im drei- bis vierstelligen ppm-Bereich liegen und sich eine dementsprechend große Änderung der Modellausgabe ergibt. Die Empfindlichkeiten gegenüber Umgebungsdruck und -temperatur sind relativ gering. Die Betrachtung einer typischen Mess-

situation zeigt, dass die Änderung dieser beiden Größen zu einer Änderung der Modellausgabe von nur wenigen  $l_n/h$  führt. Außerdem sind nur geringe Schwankungen von Umgebungsdruck und -temperatur während einer Messdauer von ca. 1 Minute zu erwarten. Eine zusätzliche Abweichung könnte allerdings dadurch verursacht werden, dass Umgebungsdruck und -temperatur an der Position des Messsystems und nicht in unmittelbarer Nähe der Leckage gemessen werden. So kann es beispielsweise aufgrund von Sonneneinstrahlung zu Temperaturunterschieden kommen. Um eine Aussage über das Ausmaß unter solchen Bedingungen zu treffen, sind Messungen der Temperatur an beiden Positionen notwendig.

Da die Gasgeschwindigkeit nicht unmittelbar als Messwert zur Verfügung steht, wurde ein Verfahren umgesetzt, um sie aus den Bildern der Gaskamera zu bestimmen. Bisher werden Messungen mit Gaskameras lediglich qualitativ bewertet, um Leckagen zu detektieren und zu lokalisieren. Das umgesetzte Verfahren ermöglicht eine quantitative Bestimmung der Gasgeschwindigkeit. Die Verringerung des relativ hohen Rechenaufwandes durch angepasste Algorithmen wird in Zukunft eine schnellere Auswertung ermöglichen. Auch muss weiterhin geprüft werden, ob alternative Verfahren eingesetzt werden können, um so nicht nur eine effizientere, sondern auch robustere Auswertung zu ermöglichen.

## 5 Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse

Dem Test- und Validierungskonzept des Projektantrages entsprechend wurden mit dem entwickelten Messsystem zunächst Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Hierzu wurde der in Abschnitt 3.4 vorgestellte Laboraufbau verwendet, um eine geführte Strömung zu erzeugen. Da hierbei sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch der Methanmassenstrom bekannt waren, wurde mit den Versuchen zum einen die Geschwindigkeitsschätzung aus den Bildern der Gaskamera und zum anderen die Ausgabe des Messmodells überprüft. Ergänzend wurden freie Strömungen im Labor vermessen. Diese Messungen dienten zur Prüfung, ob auch bei Richtungsänderungen der Strömung oder wenn das Gas zeitweise nicht vollständig vom RMLD erfasst wird, eine Abschätzung des Leckmassenstroms möglich ist. Außerdem wurden erste Tests im Freifeld durchgeführt, um die Umgebungseinflüsse auf die Messwerte abzuschätzen. Abschließend wurden erste Testmessungen in Biogasanlagen durchgeführt.

### 5.1 Versuche mit Referenzströmung im Labor

Bei den Messungen mit dem Laboraufbau aus Abschnitt 3.4 beim Projektpartner MRT wurde zum einen der eingestellte Normvolumenstrom als Referenz für die Modellausgabe gemessen und zum anderen die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr als Referenz für die bestimmte Gasgeschwindigkeit per Bildverarbeitung. Für die integrale Gaskonzentration ist keine Referenz verfügbar; es lässt sich lediglich eine theoretische Referenz anhand der Volumenstromverhältnisse von Luft und Methan berechnen.

Die eingestellte Strömung in der Rohranordnung wurde mit dem Messsystem erfasst, indem das RMLD auf das Sichtfenster ausgerichtet wurde. Dabei wurde die Messentfernung so gewählt, dass der Messfleck des RMLD die Fensterbreite vollständig abdeckte. Dadurch wird gewährleistet, dass das gesamte Gas erfasst wird (vgl. Annahme A3 in Abschnitt 4.1). Das Messsystem und der Laboraufbau waren so positioniert, dass sich das Gas ausschließlich in der Bildebene bewegte (vgl. Annahme A1). Da die Versuche in einem klimatisierten Labor mit einem geringen Messabstand von nur wenigen Metern durchgeführt wurden und das Gas eine entsprechend lange Einlaufstrecke hatte, kann angenommen werden, dass Gasdruck und -temperatur dem Druck und der Temperatur der Umgebung bzw. des Labors entsprechen (vgl. Annahme A2). Durch einen IR-Strahler hinter dem Sichtfenster des Laboraufbaus wurde zum einen gewährleistet, dass ein Hintergrund für die Messung mit dem RMLD vorhanden ist (vgl. Annahme A5), zum anderen wurde durch den Strahler ein Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gas erzeugt (vgl. Annahme A4).

Es wurden Messungen für 70 verschiedene Einstellungen des Methanvolumenstroms und der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde auf Werte zwischen 0,42 m/s und 1,23 m/s bei einer Schrittweite von ca. 0,15 m/s eingestellt. Der eingestellte Methanvolumenstrom wurde zwischen 6,7 l/h und 67 l/h bei einer Schrittweite von 6,7 l/h variiert. Für jede Einstellung wurde eine Datenserie mit einer Länge von ca. 1 Minute aufgenommen. Diese Messdaten wurden anschließend ausgewertet und mit dem Messmodell nach (4.4) der mittlere Methanvolumenstrom geschätzt. Dafür wurden die Mittelwerte der einzelnen Messgrößen (Gasgeschwindigkeit, integrale Gaskonzentration etc.) über den Zeitraum der Datenserie ermittelt und anschließend mit (4.4) fusioniert.

Die Ergebnisse der Laborversuche sind in Abbildung 5.1 zu sehen. Wie erwartet, steigen die gemessenen Methanvolumenströme mit steigendem Referenzvolumenstrom an. Allerdings zeigen die Werte eine Abweichung von den eingestellten Referenzwerten. Betrachtet man die Messwerte für einen bestimmten Referenzvolumenstrom so zeigt sich, dass die detektierten

Austrittsmengen mit steigender Geschwindigkeit des Volumenstroms abnehmen. Dieses Verhalten ist konsistent für alle Referenzvolumenströme zu beobachten. Die in Abbildung 5.1 eingezeichnete Ausgleichsgerade durch alle Messwerte zeigt, dass systematische Fehler der Empfindlichkeit und des Offsets auftreten, deren Ursache und Behebbarkeit im Nachgang zu analysieren sind. Die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade ist 0,489, der Offset -2,232 l/h und das Bestimmtheitsmaß<sup>2</sup> beträgt  $R^2 = 0,928$ . Es kann festgestellt werden, dass alle gemessenen Methanvolumenströme geringer ausfallen, als die eingestellten Normvolumenströme. Der Offset und die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade können als Kalibrierfaktoren genutzt werden, um die Messwerte zu korrigieren. Die korrigierten Messwerte sind in Abbildung 5.2 zu sehen. Zusätzlich sind die Fehlerbalken für die dreifache Standardabweichung für alle Messwerte eines Referenzvolumenstroms dargestellt. Die Standardabweichung der Stichprobe wurde berechnet nach

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (5.1)$$

mit

$x_i$ : Messergebnis bei vorgegebenem Referenzvolumenstrom

$\bar{x}$ : Mittelwert aller Messergebnisse bei vorgegebenem Referenzvolumenstrom

$n$ : Anzahl der verwendeten Messungen

Dabei wird von einer ausreichend großen Anzahl an Messungen ausgegangen. Ist der zufällige Fehler der Messwerte normalverteilt bedeutet dies, dass 99,7 % aller Messwerte in dem eingezeichneten Intervall liegen. Allerdings ist zu beachten, dass für einen Referenzvolumenstrom nur jeweils 7 Messwerte zur Verfügung standen. Für eine statistisch abgesicherte Aussage sind deshalb weitere Messungen mit denselben Einstellungen für Referenzvolumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit notwendig. Zwar sind die Werte der absoluten Standardabweichung umso größer, je größer der gemessene Volumenstrom ist. Die relative Standardabweichung liegt jedoch für alle Referenzvolumenströme unterhalb von 20 % des mittleren Messwertes.

---

<sup>2</sup> Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ist der Anteil der Variation der abhängigen Variablen (hier des berechneten Volumenstroms), welcher durch ein in den Parametern lineares Modell (hier eine Ausgleichsgerade) erklärt werden kann. Das Bestimmtheitsmaß liegt zwischen 0 (kein linearer Zusammenhang) und 1 (ideal linearer Zusammenhang).

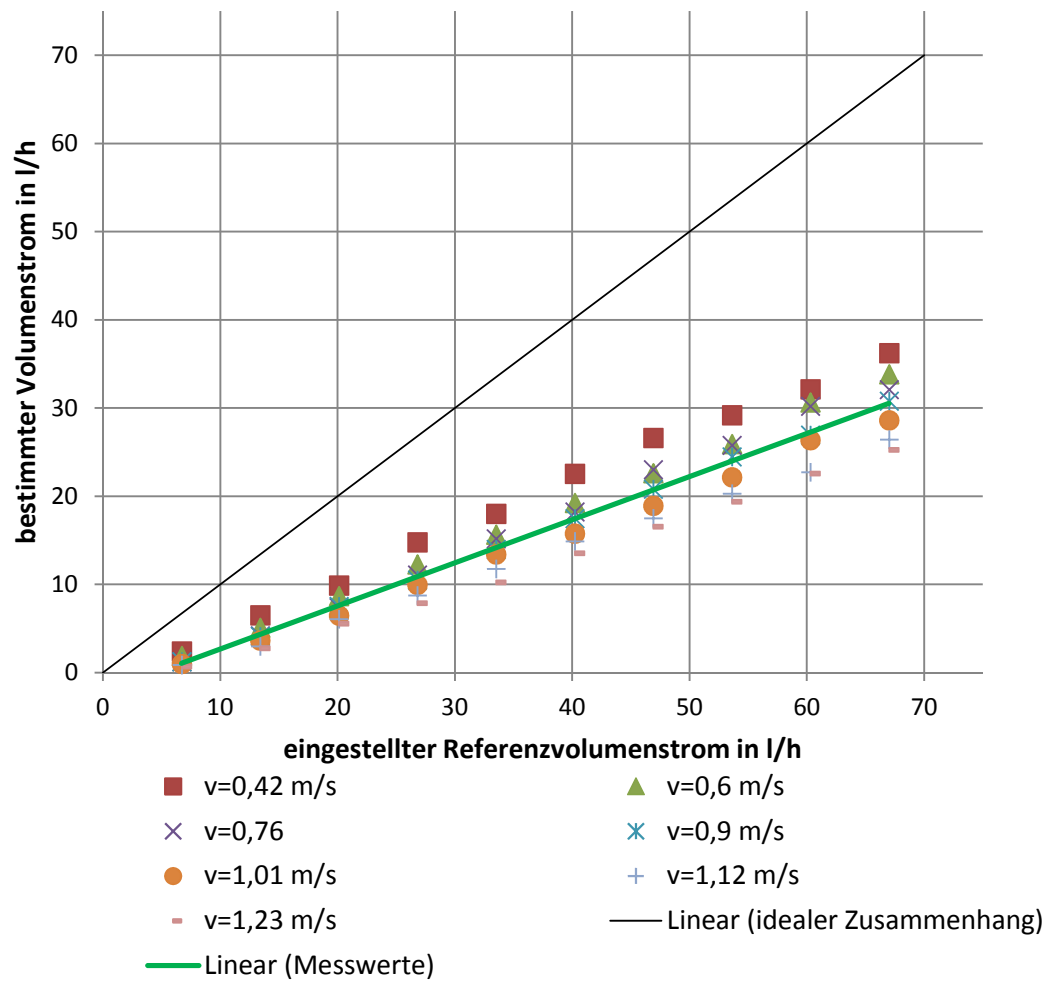
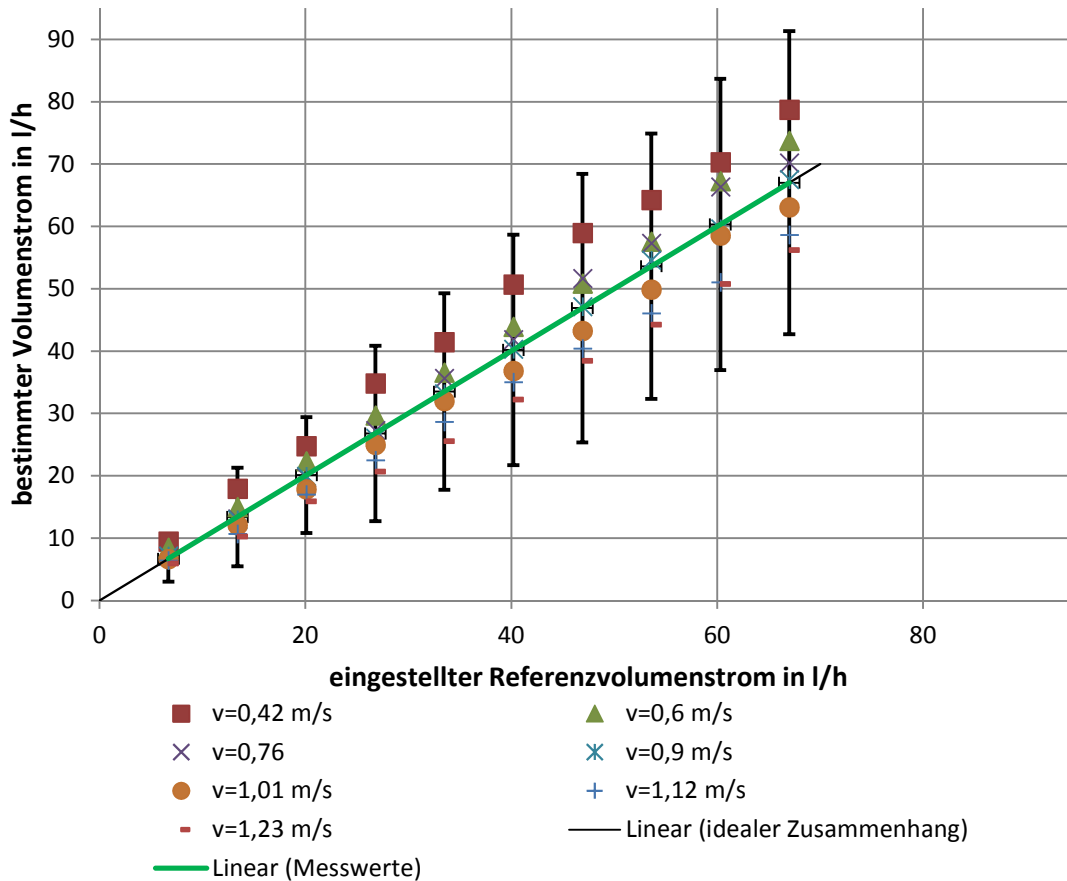


Abbildung 5.1: Ergebnisse der am Laboraufbau durchgeführten Versuche.



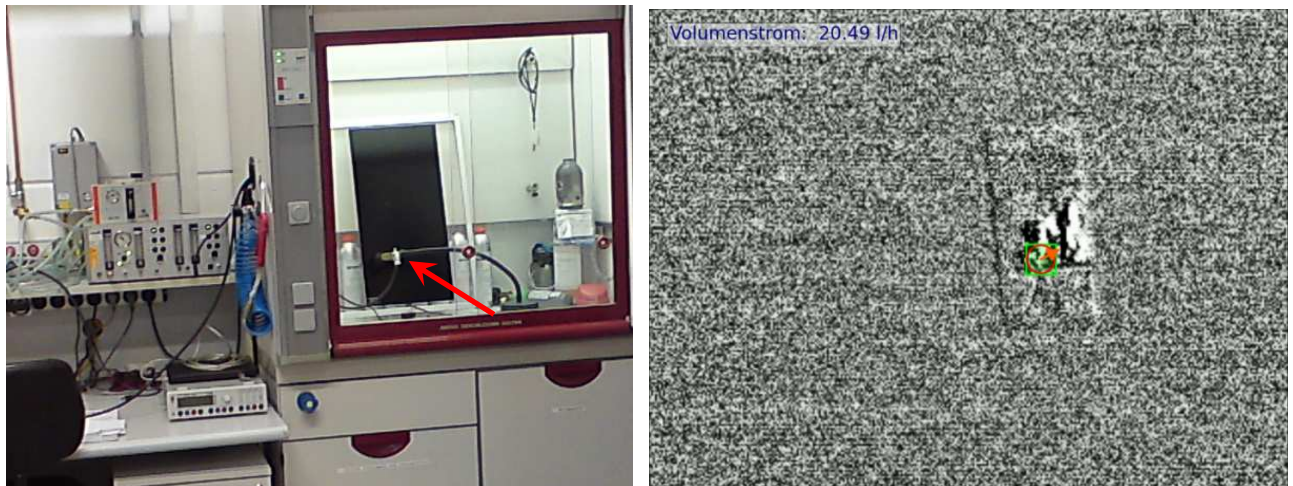
**Abbildung 5.2: Messwerte der mit dem Laboraufbau durchgeführten Versuche nach Korrektur um Offset und Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade mit Fehlerbalken für die dreifache Standardabweichung**

## 5.2 Versuche mit offener Strömung im Labor

Neben Messungen mit dem Laboraufbau wurden ebenfalls Messungen im Labor der Firma Sewerin durchgeführt, um so das Messverfahren für eine nicht geführte Gasströmung zu testen. Dabei strömte das Gas frei aus einer Düse unter einem Abzug aus. Im Gegensatz zum Laboraufbau war hierbei die Strömungsgeschwindigkeit nicht einstellbar, sondern lediglich der freigesetzte Methanvolumenstrom. Dieser wurde mit einer Gasmischpumpe der Firma Wösthoff (Typ 2M 301/a) eingestellt. Wie auch bei den Versuchen mit dem Laboraufbau gewährleistet ein IR-Strahler hinter der Düse, dass sowohl ein Hintergrund für die Messung mit dem RMLD (vgl. Annahme A5 in Abschnitt 4.1) als auch ein Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gas (vgl. Annahme A4 in Abschnitt 4.1) vorhanden ist. Da das Labor nicht klimatisiert ist, sind Abweichungen zwischen Gasdruck und -temperatur sowie Umgebungsdruck und -temperatur im Labor nicht auszuschließen (vgl. Annahme A2 in Abschnitt 4.1). Aufgrund der nicht geführten Gasströmung kann bei diesen Versuchen nicht gewährleistet werden, dass sich das Gas ausschließlich in der Bildebene bewegt (vgl. Annahme A1 in Abschnitt 4.1). Zwar ist der IR-Strahler hinter der Düse platziert, das Gas kann sich jedoch im Bereich des Abzuges frei bewegen. Während der Versuche zeigte sich, dass sich z. T. die Ausbreitungsrichtung des Gases ändert. Eine Bewegung in Richtung des Messsystems kann somit nicht ausgeschlossen werden. Die Richtungsänderungen können außerdem dazu führen, dass nicht zu jedem

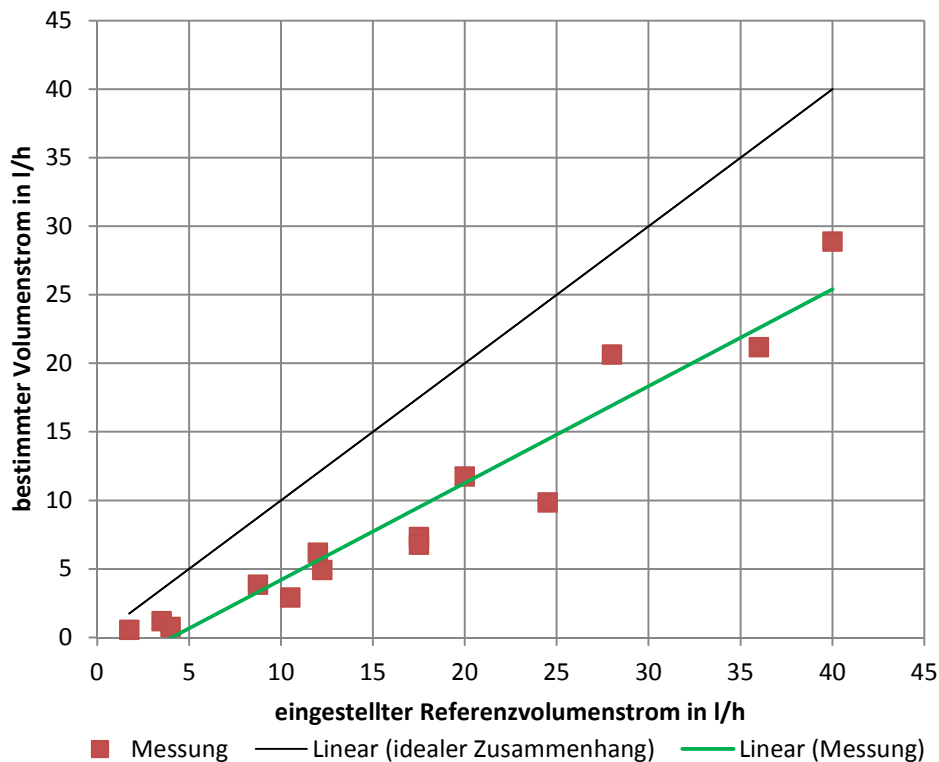


Zeitpunkt das gesamte Gas durch den RMLD-Messkegel strömt (vgl. Annahme A3 in Abschnitt 4.1). Die eingesetzte Pumpe fördert einen Gasvolumenstrom von 40 l/h, wobei die Gaszusammensetzung variiert werden kann. Der Anteil des Methans an dem Gesamtvolumenstrom wurde hier zwischen 10 % und 90 % in Schritten von 10 % variiert. Bei jeder Einstellung wurde eine Datenserie von ca. 1 Minute aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Obwohl das Gas unter einem Abzug freigesetzt wurde, zeigten sich unregelmäßige Verwirbelungen (vgl. Abbildung 5.3). Bei den Messungen wurde der Messfleck des RMLD anhand des Bildes der Gaskamera so ausgerichtet, dass er sich unmittelbar oberhalb der Düse befand, mit dem Ziel das gesamte ausströmende Methan zu erfassen.



**Abbildung 5.3: Versuchsanordnung bei der Messung frei ausströmenden Methans. Links: Versuchsaufbau mit IR-Strahler im Hintergrund sowie Düse für Gasaustritt (roter Pfeil). Rechts: Differenzbild des Auswertevideos mit Messwert des Volumenstroms (oben links) sowie Darstellung des RMLD-Messflecks (roter Kreis), des Bildbereichs zur Schätzung der Gasgeschwindigkeit (grünes Rechteck) und der bestimmten Gasgeschwindigkeit und -richtung (farbiger Pfeil).**

Die Ergebnisse dieser Labortestmessungen sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die in Abbildung 5.4 durch alle Messwerte gelegte Ausgleichsgerade zeigt, dass auch hier systematische Messabweichungen bzgl. Empfindlichkeit und Offset auftreten. Die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade ist  $E = 0,707$ , der Offset  $O = -2,871$  l/h. Das Bestimmtheitsmaß beträgt  $R^2 = 0,925$ . Wie schon bei den Versuchen am Laboraufbau fallen auch hier alle ermittelten Werte geringer als die eingestellten Volumenströme aus. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass über die Pumpe Volumenströme eingestellt wurden, während die Messwerte als Normvolumenstrom angegeben sind. Außerdem ist es aufgrund der Richtungsänderungen der Gasströmung möglich, dass nicht zu jeder Zeit das gesamte Gas vom RMLD erfasst wurde. Wie bei den Messungen bei geführten Strömungen sind keine Referenzen für die integrale Gaskonzentration, Druck und Temperatur sowie die Gasgeschwindigkeit verfügbar. Dementsprechend können die einzelnen Sensordaten hinsichtlich ihres Beitrags zur Messabweichung nicht beurteilt werden.



**Abbildung 5.4: Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche mit frei ausströmendem Methan.**

Wie auch schon bei den Versuchen mit definiertem Leckmassenstrom zeigt sich bei diesen Versuchen ebenfalls die Notwendigkeit, die aktuell verwendeten Algorithmen durch verbesserte zu ersetzen und so eine genauere Geschwindigkeitsschätzung voranzubringen.

Eine Beseitigung der systematischen Messabweichung anhand der Messungen mit dem Laboraufbau wird zukünftig auch die Messungen offener Strömungen verbessern. Die Richtungsänderung der Gasströmung ist für die Bestimmung der Gasgeschwindigkeit nicht relevant, solange sich das Gas in der Bildebene bewegt.

### 5.3 Messtechnische Eigenschaften des Messsystems

Zur Beurteilung der messtechnischen Eigenschaften wird bei den durchgeführten Laborversuchen mit Referenzströmung die Ausgabe des Messsystems in Abhängigkeit vom eingestellten Methanmassenstrom untersucht. Durch die Ausgleichsgerade wird deutlich, dass die Messwerte zwar eine systematische Abweichung vom eingestellten Referenzvolumenstrom, aber nur eine geringe „Linearitätsabweichung“ zeigen. Unabhängig von der Ursache dieser Abweichung kann anhand des Offsets und der Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade eine Korrektur der Messwerte durchgeführt werden. Betrachtet man zur Abschätzung der Messunsicherheit für jeden eingestellten Referenzvolumenstrom die verbleibenden Messwertschwankungen, so zeigt sich eine maximale relative Standardabweichung von 20 % bezogen auf den mittleren Messwert eines Referenzvolumenstroms. Allerdings ist zu beachten, dass für eine statistische Absicherung der Aussagen zukünftig wesentlich mehr Versuche durchgeführt werden müssen. Außerdem ist für die Bewertung der Messunsicherheit ausschließlich des Messsystems eine

vollständige Betrachtung aller Unsicherheiten der gesamten Messkette erforderlich, d. h. neben den Unsicherheiten des Messsystems müssen auch Unsicherheiten der Referenzwerte betrachtet werden.

Weiterhin können zur Betrachtung der Wiederholgenauigkeit die Schwankungen der Auswertungen über verschiedene Zeitintervalle einer Datenserie untersucht werden (vgl. Abschnitt 3.3). Bei allen 70 durchgeführten Versuchen wurden dazu die Datenserien in 5 Zeitintervalle von jeweils 10 s unterteilt. Für diese fünf Messwerte des Methanvolumenstroms wurde jeweils die Standardabweichung berechnet. Bezogen auf alle 70 Versuche ergibt sich eine mittlere Standardabweichung von 7,7 %, allerdings liegt die maximale Standardabweichung bei ca. 50 %. Auch hierbei ist zu beachten, dass für eine statistische Absicherung der Aussagen in Zukunft mehr Versuche durchgeführt werden müssen.

Dennoch zeigen die bestimmten Volumenströme mit Abweichungen im Bereich von 25% - 50% eine deutlich höhere Genauigkeit als alle bisher veröffentlichten Vorgehensweisen [17]. Zum Zeitpunkt der Berichtlegung ist die Ursachenanalyse für die systematische Abweichung noch nicht vollständig abgeschlossen. Dies soll im Folgeprojekt geschehen.

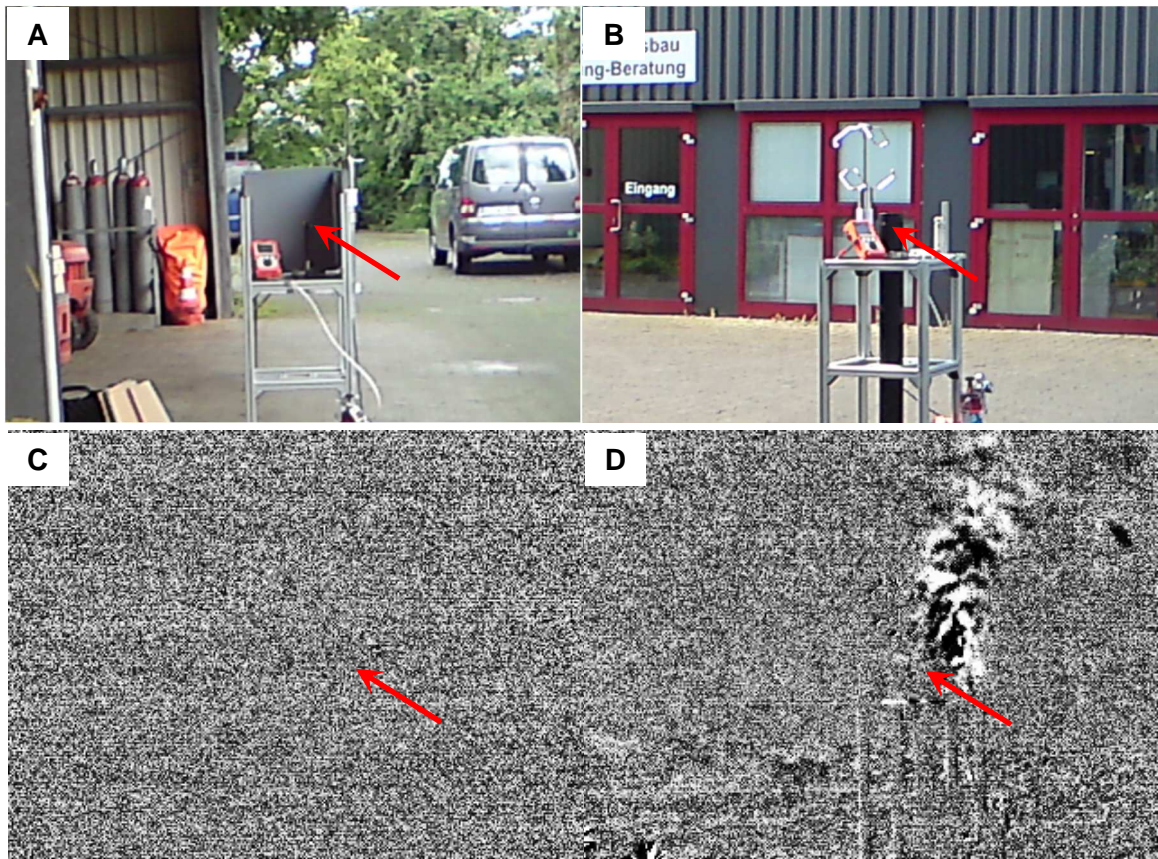
Für eine vollständige Betrachtung der messtechnischen Eigenschaften ist außerdem eine Untersuchung der Sensoreigenschaften des Messsystems sowie der Referenzmessgeräte, welche im Laboraufbau genutzt werden, notwendig. Erst durch die Betrachtung der gesamten Messkette können die einzelnen Unsicherheiten und Messfehler bestimmt und so eine Aussage über die Eigenschaften des Messsystems getroffen werden. Da sich jedoch die Bestimmung von Referenzwerten beispielsweise für die integrale Gaskonzentration als sehr aufwendig herausstellte, konnten noch keine statistisch abgesicherten Aussagen über die Unsicherheiten einzelner Sensoren getroffen werden. Anhand der durchgeführten Messungen lässt sich lediglich eine Abschätzung treffen.

## 5.4 Versuche im Freifeld

Um das Messsystem unter Freifeldbedingungen zu testen und so die Einflüsse der Umgebungsbedingungen abzuschätzen, wurden Messungen auf einem Testgelände durchgeführt. Hierfür wurden Gasleckagen auf dem Gelände der Firma Sewerin simuliert. An das Messsystem wurde zusätzlich ein Ultraschallanemometer angeschlossen, welches die Messung der Windgeschwindigkeit nahe der Leckagestelle ermöglichte. Da zum Zeitpunkt der ersten Messungen im Freifeld die Entwicklung der Datenerfassung sowie der Auswertung noch nicht vollständig abgeschlossen war, dienten die Messungen vorrangig der Untersuchung von Umgebungseinflüssen.

Es zeigt sich, dass der Temperaturunterschied zwischen dem Hintergrund und der Gaswolke einen sehr großen Einfluss auf die Qualität der Messung und somit auf das Messergebnis hat. Bei den Messungen konnte dies verdeutlicht werden, indem Messungen durchgeführt wurden, bei denen vergleichbare Gasmengen bei unterschiedlich starker Sonneneinstrahlung freigesetzt wurden. War der Temperaturunterschied zwischen dem austretenden Gas und der direkten Umgebung zu gering, detektierte die Gaskamera, trotz einer Leckage von ca. 100 l/h, keine Gaswolke (vgl. Abbildung 5.5). Das RMLD hingegen detektiert die simulierten Leckagen unabhängig von der vorherrschenden Temperatursituation.





**Abbildung 5.5:** Exemplarische Aufnahmen simulierter Gasleckagen bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen Hintergrund und Gas. Oben: Bilder des Aufbaus bei niedrigem (A) und hohem (B) Temperaturunterschied. Unten: Differenz-Infrarotbilder eines Gasvolumenstroms von 100 l/h bei geringem Temperaturunterschied (C) und von 76 l/h bei hohem Temperaturunterschied (D). Der rote Pfeil kennzeichnet jeweils die Stelle des Gasaustritts.

Wie Abbildung 5.5 zeigt, ist das Gas unterschiedlich gut in den Bildern der Gaskamera sichtbar.

Im Rahmen einer zuwendungsneutralen Projektverlängerung wurden weitere Freifeldmessungen durchgeführt. Dabei wurden Leckagen mit verschiedenen Methanvolumenströmen simuliert. Bei jedem eingestellten Methanvolumenstrom wurden mehrere Datenserien über einen Zeitraum von ca. einer Minute aufgezeichnet. Durch die Mehrfachmessungen konnten Datenserien mit unterschiedlich starken Störeinflüssen bspw. aufgrund von Windböen aufgezeichnet werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Bei zukünftigen Versuchen im Freifeld und in Biogasanlagen sind gezielt weitere Störfaktoren zu untersuchen. Dazu gehören neben dem erforderlichen Temperaturunterschied zwischen Gas und Hintergrund auch Einflüsse durch Umgebungsfaktoren. Beispielsweise können unterschiedliche Temperaturunterschiede durch eine ungleiche Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden. Durch weitere Freifeldversuche können außerdem Einflüsse aufgrund von unterschiedlicher Hintergrundbeschaffenheit und der räumlichen Ausprägung der Leckagen untersucht werden.



Abbildung 5.6: Versuchsaufbau bei den durchgeführten Freifeldmessungen im Rahmen der Projektverlängerung (links) und Blick von der Position des Messsystems auf den Versuchsaufbau (rechts)

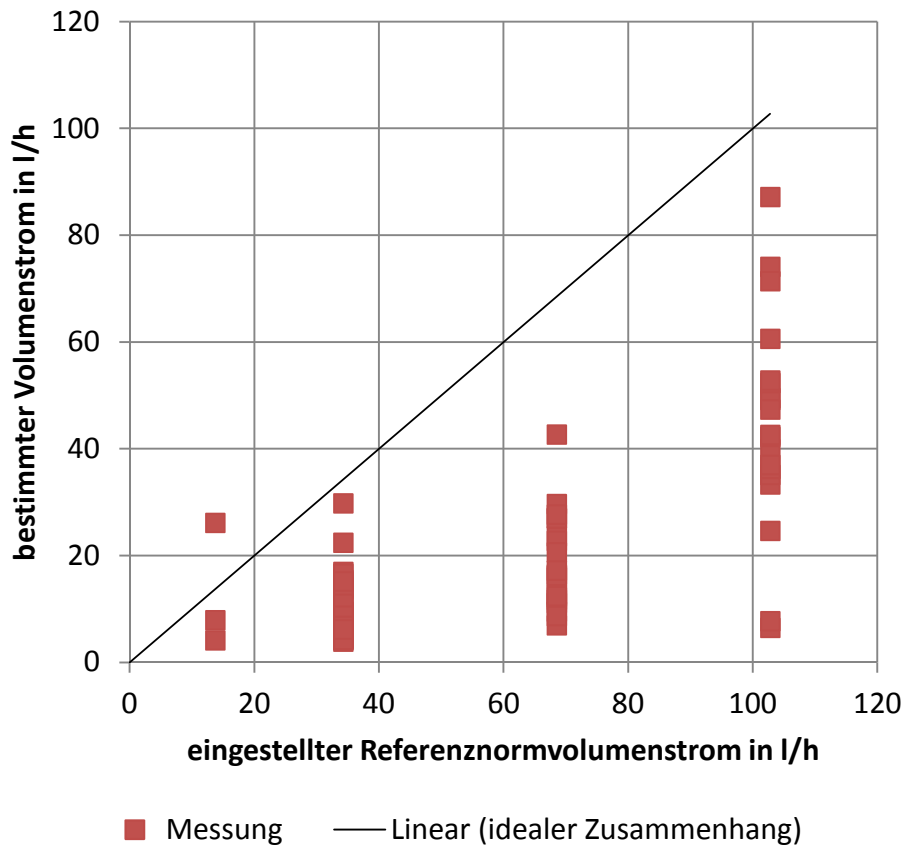
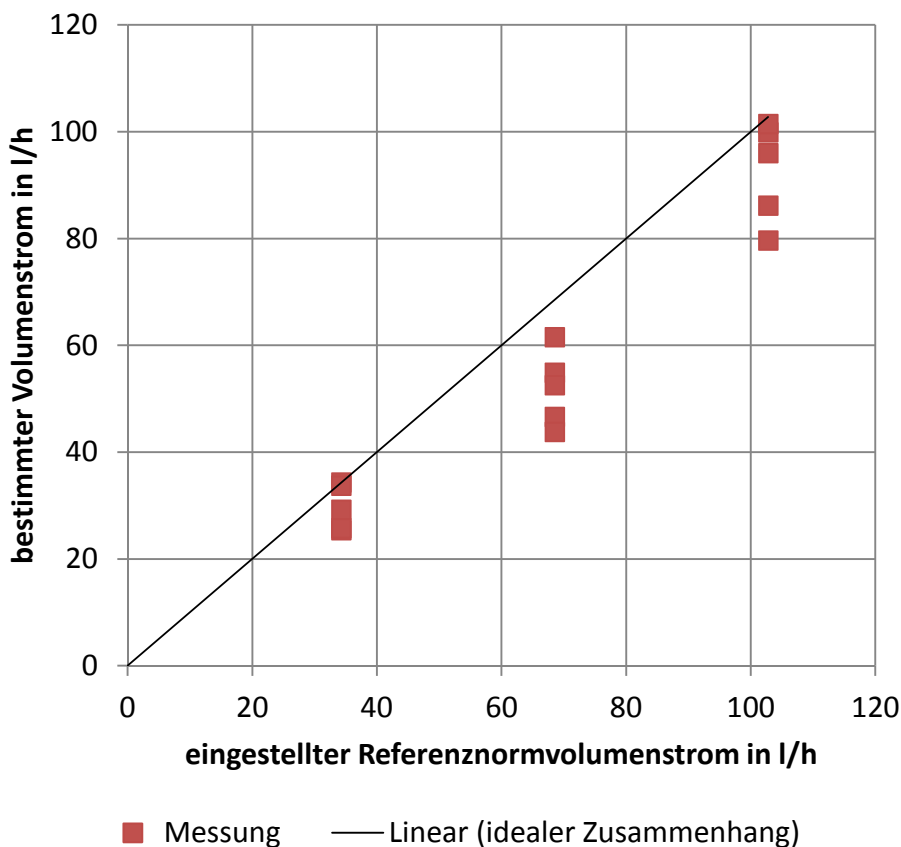


Abbildung 5.7: Auswertung über 30 Sekunden der aufgenommenen Datenserien ohne Beachtung von Störfaktoren



**Abbildung 5.8: Auswertung bei geeigneter Wahl von Zeitintervallen über 10 Sekunden**

Wie Abbildung 5.7 zeigt, führt eine Auswertung ohne Beachtung der Störfaktoren, welche im Freifeld auftreten, zu stark schwankenden und mitunter schlechten Messergebnissen. Beispielsweise wird das Gas durch Windböen aus dem Messkegel des RMLD geweht und so nicht vollständig erfasst. Die Ergebnisse hängen dementsprechend stark von den gewählten Zeitabschnitten für die Auswertung sowie deren Länge ab. Auch eine fehlerhafte Geschwindigkeitsschätzung kann dazu führen, dass der Volumenstrom falsch geschätzt wird. Eine Verbesserung der Geschwindigkeitsschätzung ist deshalb im Folgeprojekt vorgesehen.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5.8 die exemplarische Auswertung geeigneter Zeitintervalle von 10 s Länge für einige Messungen. Hier zeigt sich, dass das Messergebnis entscheidend von der Wahl der Zeitintervalle abhängt und die Beachtung der Störfaktoren für eine aussagekräftige Messung wichtig ist.

Kriterien, um Bedingungen für zulässige Messungen festzulegen sind im weiteren Forschungsverlauf zu bestimmen. Denkbar ist z. B., dass die Windstärke einen Höchstwert nicht überschreiten darf. Dabei ist die Prüfung der Kriterien einerseits durch den Bediener des Messsystems denkbar, zum Beispiel indem anhand der Bildsequenzen der Gaskamera mögliche Verwehungen oder aber die Windgeschwindigkeiten vor Ort bewertet werden. Hierzu könnte vorab eine Messung der Windgeschwindigkeiten mit einer Wetterstation erfolgen. Andererseits kann eine automatisierte Bewertung anhand der Sensordaten erfolgen. Beispielsweise kann ein plötzlicher Abfall der Messwerte der integralen Gaskonzentration oder gleichzeitige starke Änderungen von Gasgeschwindigkeit und integraler Gaskonzentration Kennzeichen für ungünstige Messbedingungen sein. Dabei ist insbesondere der zeitliche Verlauf der Messwerte zu beachten.

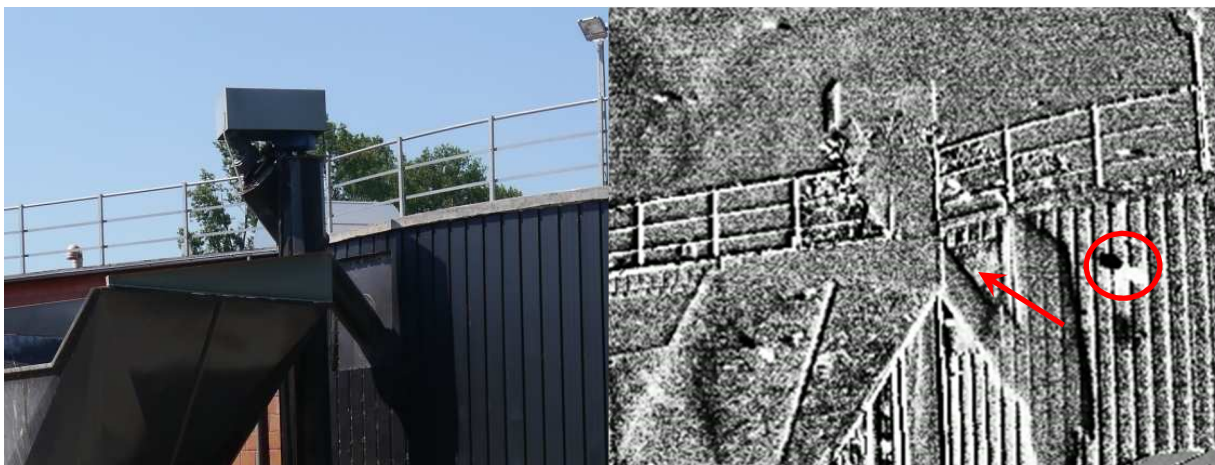


## 5.5 Tests in Anlagen

Im Rahmen des Projektes wurden zum einen Anlagenbegehungen durchgeführt, um eine Schwachstellenanalyse von Biogasanlagen zu ermöglichen. Diese wurden auch vor Fertigstellung des Funktionsmusters durchgeführt. Dabei wurden beispielsweise Anlagen mit der Gaskamera inspiziert, um typische Leckagestellen zu identifizieren. Zum anderen erfolgten erste Tests des Messsystems in einer Biogasanlage.

Bei diesen Messungen zeigte sich, dass in Anlagen eine Vielzahl von Störfaktoren insbesondere für die Schätzung der Gasgeschwindigkeit aus den Bildern der Gaskamera vorhanden sind. In Abbildung 5.9 ist exemplarisch das visuelle Bild und das Differenzbild der Gaskamera von einer Leckage auf einer Biogasanlage gezeigt. Als Störungen sind im Differenzbild zum einen die Kanten der Biogasanlage zu sehen, zum anderen aber auch Insekten, welche sich durch das Bild bewegen. Außerdem zeigte sich, dass ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s austretendes Gas so schnell verdünnt wird, dass keine Messungen möglich sind. Diese Störfaktoren müssen bei der Auswertung der Gaskamerabilder beachtet werden, da sonst eine falsche Geschwindigkeit aufgrund der Störungen bestimmt wird. Dabei können entsprechende Detektions- und Filterfunktionen genutzt werden, um den Einfluss der Störungen auf die Schätzung des Methanvolumenstroms zu minimieren. Die Detektion von Störungen kann dabei nicht nur basierend auf den Bildern der Gaskamera erfolgen. Auch der plötzliche Abfall der integralen Gaskonzentration kann beispielsweise als Kriterium dafür dienen, dass Messwerte nicht in die Auswertung mit einfließen. Für zukünftige Messungen sind außerdem weitere Störfaktoren zu betrachten. Dies soll im Rahmen eines Folgeprojekts durch die Einbindung von Algorithmen zur Anomaliedetektion realisiert werden.

Da im Rahmen der bisherigen Untersuchungen nur exemplarisch Messungen in Biogasanlagen durchgeführt werden konnten, ist in Zukunft eine größere Anzahl von Anlagen an verschiedenen Standorten unterschiedlichen Bautyps zu untersuchen. Dabei sind auch die verschiedenen Substratzusammensetzungen zu beachten und Messungen bei unterschiedlichen Jahreszeiten durchzuführen, um Einflüsse aufgrund der unterschiedlichen Wetterlagen berücksichtigen zu können. Dadurch wird eine Einschätzung des Emissionspotenzials verschiedener Anlagenarten ermöglicht. Aufbauend auf den dabei identifizierten Komponenten, welche Leckagen aufweisen, können Empfehlungen über Wartungs- und Prüfintervalle von Anlagen oder Bauelementen ausgegeben werden.



**Abbildung 5.9:** Links: visuelles Bild der Futtereinbringung in den Fermenter. Rechts: Differenzbild der Gaskamera. Die Position der Leckage ist durch den roten Pfeil, eine Störung im Bild durch ein Insekt durch den roten Kreis gekennzeichnet.

## 5.6 Zusammenfassende Bewertung

Die zur Bewertung des Messverfahrens durchgeführten Laborversuche zeigen, dass der mit dem entwickelten Messsystem geschätzte proportional zu dem eingestellten Normvolumenstrom steigt. Dies ist auch bei jeweils unterschiedlich eingestellten Strömungsgeschwindigkeiten der Fall. Dieses System bietet somit erstmalig die Möglichkeit, eine Abschätzung der Klimarelevanz von Leckagen in Biogasanlagen vorzunehmen. Die Messwerte zeigen dabei eine systematische Abweichung von den eingestellten Werten des Normvolumenstroms. Mit einer Ausgleichsgerade durch die Messwerte konnten die Abweichungen des Offsets und der Empfindlichkeit von eingestelltem und gemessenem Methanvolumenstroms bestimmt werden. Die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade ist  $E = 0,489$ , der Offset  $O = -2,232$  l/h. Dabei beträgt das Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsgerade  $R^2 = 0,928$ . Verwendet man den Offset und die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade als Kalibrierparameter zur Korrektur der Messwerte, schwanken diese nur noch mit einer relativen Standardabweichung von maximal 20 % um den mittleren. Um eine statistisch belastbare Aussage über die Messwertschwankungen treffen zu können sind allerdings noch weitere Versuche notwendig.

Mögliche Gründe für die systematische Abweichung sind Messfehler bei den einzelnen Messgrößen. Beispielsweise sind bei zu geringen Volumenströmen keine eindeutigen Strukturen des Methans erkennbar, was dazu führt, dass die Gasgeschwindigkeit zu niedrig geschätzt wird. Außerdem weisen die Schätzwerte der Gasgeschwindigkeit eine hohe Unsicherheit auf. Ein Grund hierfür ist das komplexe Strömungsfeld der turbulenten Strömung, in welchem es aufgrund von Verwirbelungen zu lokalen Geschwindigkeitsunterschieden kommt. Potenziell ist eine Verringerung der Unsicherheit durch die Verwendung alternativer Verfahren zur Schätzung der Gasgeschwindigkeit möglich. Ein weiterer Grund für Abweichungen ist die unvollständige Messung des Gases durch das laserbasierte Fernmessgerät (RMLD), da Teile der Gasströmung an den Seiten des Sichtfensters aufgrund der Rohrkrümmung verdeckt werden. Da dies jedoch eine Fehlerquelle des Laboraufbaus ist, hat dies bei Messungen im Freifeld oder in Biogasanlagen keinen Einfluss. Eine Abschätzung der Wiederholgenauigkeit wurde anhand der relativen Standardabweichung der Messwerte über Zeitintervalle von 10 s einer Datenserie getroffen. Im Mittel über alle 70 durchgeführten Versuche liegt die relative Standardabweichung bei ca. 7,7 %. Allerdings liegt die maximale Standardabweichung bei 50 %. Daher ist auch hier eine größere Anzahl an Versuchen notwendig, um statistisch belastbarere Aussagen machen zu können. Zusätzlich ist für die spätere Weiterentwicklung der Auswertung eine Festlegung geeigneter Längen der Zeitintervalle für die Auswertung notwendig sowie die Auswahl der genutzten Zeitintervalle anhand von Kriterien zur Bewertung von Störfaktoren.

Die Messungen der nicht geführten Strömung zeigten ebenfalls eine Proportionalität zwischen eingestelltem und gemessenem Methanvolumenstrom. Auch hier konnten mit einer Ausgleichsgerade durch alle Messwerte die Abweichungen bestimmt werden. Die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade ist dabei  $E = 0,707$ , der Offset  $O = -2,871$  l/h und das Bestimmtheitsmaß beträgt  $R^2 = 0,925$ . Orientiert man sich auch hier an der Empfindlichkeit der Ausgleichsgeraden, so weichen die Schätzungen gemittelt über alle durchgeführten Versuche um ca. 30% von dem Referenzwert ab. Mögliche Ursachen hierfür sind die beim Messmodell (vgl. Abschnitt 4.1) getroffenen Annahmen, aber auch dieselben Ursachen wie beim Laboraufbau. Beispielsweise ist nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet, dass das gesamte Gas vom RMLD erfasst wird, zudem ist die Bewegung des Gases nicht nur auf die Bildebene beschränkt. Warum die



gemittelte Abweichung über alle Versuche geringer als bei den Versuchen mit dem Laboraufbau ist, muss im Rahmen zukünftiger Experimente noch genauer untersucht werden. Für eine Nutzung von Offset und Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade als Kalibrierfaktoren sollten die für die geführte Strömung ermittelten Werte genutzt werden, da hier eine geringere Anzahl an Störfaktoren vorhanden ist als bei der offenen Strömung. Somit konnte bei den durchgeführten Laborversuchen eine Abschätzung der Mindestmenge an freigesetztem Methan bestimmt werden.

Die Freifeldmessungen zur Abschätzung der Signifikanz von Störfaktoren zeigten, dass ein ausreichender Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gas erforderlich ist, damit das Gas in den Bildern der Gaskamera sichtbar ist. Weitere Störfaktoren an Biogasanlagen können außerdem Bewegungen in den Bildern sein, welche nicht durch das Gas verursacht werden. Betrachtet man die bisher durchgeführten Messungen in Biogasanlagen und berücksichtigt als eines der Ziele für ein mögliches Folgeprojekts das Messsystem bis zu einem funktionsfähigen Prototypen weiterzuentwickeln, so sollte eine Felderprobung der Technologie durch ausgebildete Gasspürer eines der zentralen Arbeitspakete des möglichen Folgeprojekts darstellen.

Neben den Herausforderungen bezüglich der Bildverarbeitung durch mögliche Störfaktoren zeigen auch die Laborversuche, dass die Gasgeschwindigkeit bisher nur mit relativ großer Unsicherheit bestimmt werden kann. Wird für die Messreihen jeweils einer eingestellten Referenzgeschwindigkeit das Bestimmtheitsmaß zwischen eingestellter und gemessener Gasgeschwindigkeit bestimmt, liegt dies bei maximal  $R^2 = 0,87$ , ist jedoch meist deutlich geringer. Das bedeutet, dass nur ein relativ geringer Anteil der Variation der gemessenen Geschwindigkeit durch die Variation der Referenzgeschwindigkeit erklärt werden kann. Betrachtet man hingegen die integrale Gaskonzentration und ermittelt das Bestimmtheitsmaß zwischen dieser und dem eingestellten Volumenstrom, liegt bei allen Messreihen das Bestimmtheitsmaß über  $R^2 = 0,99$ . Da der Laboraufbau bisher keinen Referenzwert für die integrale Gaskonzentration liefert, ist es denkbar, dass eine systematische Abweichung des RMLD-Messwertes eine Ursache für die abweichende Bestimmung des Normvolumenstroms sein könnte, was zu klären bleibt. Als weitere mögliche Ursachen für eine absolute Abweichung kommen beispielsweise in Frage: Eine nicht vollständige Erfassung des Gases durch das RMLD oder eine fehlerhafte Ausrichtung des Messflecks im Bild der Gaskamera.

Die unterschiedlichen Werte der Bestimmtheitsmaße verdeutlichen, dass vor allem die Bestimmung der Gasgeschwindigkeit Potenziale aufweist, um die Unsicherheit der Messmodellausgabe zu verringern. Für eine vollständige Bewertung der messtechnischen Eigenschaften des Messsystems müssen alle verwendeten Messgrößen des Messsystems aber auch die Unsicherheiten der Referenzgrößen des Laboraufbaus untersucht werden. Dies war bisher nur unzureichend möglich, da nur Referenzmesswerte für den Massenstrom sowie die Strömungsgeschwindigkeit zufriedenstellend ermittelt werden konnten und somit nicht für jeden Messwert ein Referenzwert zur Verfügung stand. Genaue Untersuchungen der Unsicherheiten der einzelnen Messgrößen sind im Rahmen eines Folgeprojektes durchzuführen. Dafür sind auch Referenzwerte der übrigen Messgrößen notwendig. Im Rahmen der Laboruntersuchungen konnten Messwertschwankungen der Entfernung, des Umgebungsdrucks und der -temperatur durch die referenzierte Positionierung des Messsystems und das klimatisierte Labor ausgeschlossen werden.

## 6 Abschließende Bewertung

Im Rahmen des Projektes konnte die Machbarkeit einer fernmesstechnischen Quantifizierung von Gasleckagen experimentell unter Laborbedingungen gezeigt werden. Das entwickelte Funktionsmuster erfüllt die Anforderungen, um flexibel in Biogasanlagen eingesetzt zu werden und typische Leckszenarien zu messen. Dennoch zeigen die durchgeführten Laborversuche, dass der Bedarf von Verbesserungen des Messverfahrens und umfangreichen Versuchskampagnen im Labor, aber insbesondere auch im Freifeld besteht. Hierzu zählt bspw. eine Verbesserung der Schätzung von Gasgeschwindigkeiten aus den Bildern der Gaskamera, aber auch die statistisch abgesicherte Beurteilung der Messsystemeigenschaften.

Des Weiteren konnten im Projekt folgende zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

### *Wie genau kann der Leckmassenstrom geschätzt werden?*

Anhand der Ausgleichsgerade durch alle im Labor durchgeführten Messreihen lässt sich eine Abweichung der Empfindlichkeit von ca. 25 bis 50% abschätzen. Die Messungen mit dem Laboraufbau zeigen allerdings auch, dass insbesondere die Schätzung der Gasgeschwindigkeit von dem Normvolumenstrom abhängt. Die mittels Ausgleichsgerade bestimmten Werte für Offset und Empfindlichkeit können als mögliche Kalibrierfaktoren in die Auswertung des Messmodells einfließen, um so den systematischen Fehler zu kompensieren.

### *Wie groß ist die Messunsicherheit?*

Nutzt man den Offset und die Empfindlichkeit der Ausgleichsgerade als Kalibrierfaktoren um die Messwerte zu korrigieren, liegen die verbleibenden relativen Standardabweichungen unter 20 % des jeweiligen Messwertes des Volumenstroms. Für eine statistisch belastbare Aussage über die Messunsicherheit des Messsystems ist jedoch eine umfassendere statistische Untersuchung der Messunsicherheiten sowohl der Referenzmesswerte des Laboraufbaus, als auch der Messwerte der Sensoren des Messsystems notwendig. Bisher konnte für die integrale Gaskonzentration nur ein theoretischer Referenzwert ermittelt werden. Die bestimmte Gasgeschwindigkeit zeigte bei den bisherigen Versuchen eine vergleichsweise große Unsicherheit. Die Verringerung dieser Unsicherheit durch eine Verbesserung der Bildverarbeitung verspricht eine bessere Schätzung des Normvolumenstroms. Weiterführende Untersuchungen wurden im Rahmen der zunehmenden Projektverlängerung durchgeführt. Indem die Modellgleichung mit den Referenzmesswerten weiterer Laborversuche ausgewertet wurde, konnte die Schätzung des Normvolumenstroms verbessert und die Abweichung auf maximal 24 % reduziert werden. Dabei wurde bestätigt, dass die Unsicherheit der Geschwindigkeitsschätzung zu großen Unsicherheiten der Schätzung des Normvolumenstroms führt. Mögliche Ursachen für die verbleibende Abweichung können Unsicherheiten der Messung der integralen Gaskonzentration mit dem RMLD sowie Unsicherheiten der verwendeten Modellgleichung sein. Die theoretische Betrachtung der Modellempfindlichkeit bzgl. der einzelnen Messgrößen zeigt, dass Umgebungsdruck und -temperatur und somit auch die jeweiligen Unsicherheiten einen relativ geringen Einfluss auf die Modellausgabe haben. Im Gegensatz dazu zeigt sich eine hohe Empfindlichkeit gegenüber der Gasgeschwindigkeit und der integralen Gaskonzentration, wodurch ein ausreichend großer Messeffekt vorhanden ist. Da Umgebungsdruck und -temperatur während der Messdauer keine großen Schwankungen aufweisen sollten und mögliche Schwankungen nur einen geringen Einfluss haben, ist eine Messung an der Position des Messsystems ausreichend.

Bezüglich weiterer Einflussgrößen zeigten die Tests in einer Biogasanlage, dass störende Bewegungen in den Bildern der Gaskamera zu sehen sein können (z. B. durch Insekten).

*Unter welchen Bedingungen kann das vorgeschlagene Messverfahren eingesetzt werden?*

Bei Tests zeigte sich, dass durch die Verwendung des RMLD schon geringe Konzentrationen von Methan detektiert werden können. Die geringe Querempfindlichkeit des RMLD ermöglicht eine selektive Messung von Methan unbeeinflusst durch andere Kohlenwasserstoffe oder Wasserdampf, die in den Bildern der Gaskamera dagegen sichtbar sind. Ergänzend kann eine Leckage mit der Gaskamera detektiert werden, wenn eine Messung mit dem RMLD aufgrund eines fehlenden Hintergrundes nicht mehr möglich ist. Die Tests in Biogasanlagen zeigten auch, dass ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s austretendes Gas so schnell und stark verdünnt wird, dass keine Messungen möglich sind. Eine Messung ist bei einer Entfernung von ca. 3 m bis zu 30 m prinzipiell möglich.

*Kann anhand der Schätzung der Gaswolkengröße (Gaskamera) und mit der Massenstromschätzung (RMLD) die Ex-Gefahr eingeschätzt und sogar ein Ex-Radius um das Leck abgeleitet werden?*

Eine Aussage über die Ex-Gefahr oder einen Ex-Radius erfordert einen Konzentrationswert des Methans an der entsprechenden Position. Prinzipiell kann bei Kenntnis der Gaswolkenausbreitung in Richtung des Messpfades und dem RMLD-Messwert ein Konzentrationswert abgeschätzt werden. Somit kann theoretisch eine Aussage über die Ex-Gefahr getroffen werden.

Für die Untersuchung der Praxistauglichkeit sind weitere Messungen in Biogasanlagen durchzuführen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse führen außerdem zu einer Verbesserung des Messsystems. Die Messergebnisse von umfassenden Messkampagnen in Biogasanlagen ermöglichen eine Abschätzung der Emissionen von Gesamtanlagen und somit die Einordnung der Klimarelevanz sowie der ökonomischen Verluste.

## 7 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden von den Projektpartnern anhand verschiedener Maßnahmen verbreitet. Zum einen entstanden die folgenden Veröffentlichungen:

DIERKS, Sören ; RETZ, Stefanie ; KLAUS, Dominik ; SUPPLY, Carsten ; HENSEL, Oliver ; KROLL, Andreas: *Erfahrungen bei der Untersuchung von Biogasanlagen auf Dichtigkeit*. In: *gwf - Gas + Energie* (2016), Nr. 9, S. 690-695;

DIERKS, Sören ; KROLL, Andreas: Schätzung von Gasgeschwindigkeiten aus Differenzbildserien einer Infrarotkamera zur Gasvisualisierung. In: *Bildverarbeitung in der Automatisierung*, Lemgo, 01.12.2016 (Akzeptiert);

DIERKS, Sören ; KROLL, Andreas: Quantification of Methane Gas Leakages using Remote Sensing and Sensor Data Fusion. In: *Proceedings of Sensors Applications Symposium (SAS)*, Glassboro, USA, 13-15.03.2017 (Eingereicht)

Neben den erfolgten Veröffentlichungen von Zwischenergebnissen aus dem Projekt konnten die Erkenntnisse auch bei zahlreichen Messeauftritten genutzt und verbreitet werden:

- VDI-Forum - Emission aus Biogasanlagen; September 2014; Frankfurt a.M.
- EuroTier; November 2014; Hannover
- VDI-Forum - Emission aus Biogasanlagen; März 2016; Filderstadt
- Internationale Bio- und Deponiegas Fachtagung; April 2016; Lübeck

Einzelne Projektaspekte dienten der praxisnahen Ausbildung von Studierenden in Form von studentischen Arbeiten. Die im Projektzeitraum durchgeführten studentischen Arbeiten sind:

- Schramm, Sebastian: Bestimmung von Geschwindigkeiten aus Bildserien einer Gaskamera. Bachelorarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2015
- Stämmler, Niklas: Registrierung von Bildserien einer Gaskamera. Bachelorarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2016
- Oeste, Magnus: Merkmalsbasiertes Verfolgen von Gaswolken in Bildserien einer Gaskamera. Bachelorarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2016
- Duensing, Josua: Untersuchung der Bildverarbeitung von Videos einer Gasvisualisierungskamera mittels Parameterstudien. Berufspraktische Studien (BPS), Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2016
- Bardt, Daniel: Kalibrierung der Sensoren zur fernmesstechnischen Massenstrombestimmung. Projektarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2015
- Diewald, Patrick: Inbetriebnahme eines Druck- und Temperatursensors. Projektarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2015

## Fazit

Im Rahmen des durchgeführten Projektes konnten verschiedene Kategorien von Gasleckagen an Biogasanlagen identifiziert werden. Die durchgeführten Anlagenbegehungen zeigten, dass an nahezu jeder Biogasanlage Leckagen vorhanden sind. Exemplarisch wurde der ökologische und ökonomische Effekt typischer Leckagen abgeschätzt. So konnte gezeigt werden, dass schon kleine Leckagen dazu führen, dass Biogasanlagen eine vergleichbar große klimaschädliche Wirkung haben, die vergleichbaren Anlagen mit fossilen Energieträgern ähnlich ist. Dies verdeutlicht die Relevanz der Quantifizierung von Gasleckagen an Biogasanlagen.

Die durchgeführten Versuche zeigen die prinzipielle Machbarkeit der fernmesstechnischen Quantifizierung des Gasmassenstroms. Jedoch besteht bei den ermittelten Gasmengen eine noch genauer zu untersuchende systematische Abweichung von den eigentlich ausgebrachten Referenzgasmengen. Ein Grund für die abweichenden Messwerte ist die Abweichung bei der Schätzung der Gasgeschwindigkeit. Auch Messungen von offenen Gasströmungen im Labor zeigen eine systematische Abweichung. Die Eliminierung der Ursachen für die systematische Abweichung und eine Verbesserung des Laboraufbaus sowie des Messverfahrens sind in Zukunft durchzuführende Schritte. Allerdings ist selbst mit der systematischen Abweichung eine Quantifizierung von Gasleckagen genauer möglich, als dies bisher mit existierenden Ansätzen der Fall war. Bislang wurden Gasleckagen nach ihrem Emissionspotenzial grob in Kategorien eingeteilt: Weniger als 100 l/h, zwischen 100 und 1000 l/h und mehr als 1000 l/h. Die durchgeführte exemplarische Berechnung wirtschaftlicher Verluste zeigt jedoch, dass schon wesentlich geringere Leckagen als 1000 l/h zu deutlichen wirtschaftlichen Verlusten führen (vgl. Abschnitt 2.3).

Messungen auf dem Testgelände der Firma Sewerin sowie erste Testmessungen in Biogasanlagen bestätigten, welche Einflussfaktoren auf die Messungen einwirken können. Dazu gehört beispielsweise der Temperaturunterschied zwischen Hintergrund und Gas, welcher für die Messung mit der Gaskamera erforderlich ist. Aber auch Störfaktoren, wie ungewollte Bewegungen im Bild der Gaskamera können die Messung beeinflussen. In Zukunft sind die Algorithmen für die Datenverarbeitung und insbesondere die Bildverarbeitung derart anzupassen und zu verbessern, dass der Einfluss der verschiedenen Störfaktoren minimiert wird.

Die bisherigen Messungen zeigen nicht nur die grundsätzliche Machbarkeit, sondern auch das Potenzial des entwickelten Messverfahrens zur fernmesstechnischen Quantifizierung von Gasleckagen. Die Verbesserung der Auswertung, insbesondere der Bildverarbeitung, wird eine noch weitere Verringerung der Messabweichung nach sich ziehen. Durch Messkampagnen unter verschiedenen Bedingungen werden die bisherigen Ergebnisse weiter statistisch abgesichert und die neu zu entwickelnden Algorithmen validiert. Außerdem kann durch Messungen auf Biogasanlagen, welche von ausgebildeten Gasspürern durchgeführt werden, die Praxistauglichkeit des Messsystems bewertet werden. Durch die Entwicklung von ergänzenden Auswertetools wird basierend auf den Messwerten eine direkte ökologische und ökonomische Abschätzung der Gasverluste ermöglicht werden. So wird die Erstellung von konkreten Produktkonzepten und damit die Grundlage für die Nutzung des Messsystems durch die Firma Sewerin gelegt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN 1343. Januar 1990. *Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen*
- [2] ZEIT ONLINE: *Koalition einigt sich auf Ökostromreform*. URL <http://www.zeit.de/politik/deutschland/2016-06/erneuerbare-energien-oekestrom-cdu-spd-csu> – Überprüfungsdatum 2016-07-12
- [3] STATISTA: *Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2015*. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/> – Überprüfungsdatum 2016-07-13
- [4] SONNLEITNER, M.: *BioErdgas - Methanverluste und deren Messung* (17. Symposium Bioenergie). Bad Staffelstein, 2008
- [5] BACHARACH INCORPORATED: *HI FLOW Sampler : For Natural Gas Leak Rate Measurement*. URL <http://www.mybacharach.com/wp-content/uploads/2015/08/0055-9017-Rev-7.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-07-06
- [6] HUMMELT, C.: *Untersuchung gasförmiger Emissionen an Rohrleitungsflanschen*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002 (Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 3, Verfahrenstechnik, Nr. 760)
- [7] ZHANG, J.: *Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system*. In: *Pipes and Pipelines International* 42 (1997), Nr. 1, S. 20–26
- [8] SANDSTEN, J. ; ANDERSSON, M.: *Volume flow calculations on gas leaks imaged with infrared gas-correlation*. In: *Optics Express* 20 (2012), Nr. 18, S. 20318–20329
- [9] GÅLFALK, M. ; OLOFSSON, G. ; CRILL, P. ; BASTVIKEN, D.: *Making methane visible*. In: *Nature Climate Change* 6 (2015), Nr. 4, S. 426–430 – Überprüfungsdatum 2016-07-06
- [10] IPPA, A. ; SWIDERSKY, H.: *Integration modellbasierter Leckerkennungs- und Ortungssysteme*. In: *Technische Überwachung* 45 (2004), S. 16–19
- [11] CLEMENS, J.: *Erfahrungen bei der Untersuchung von Biogasanlagen auf Dichtigkeit*. In: *gwf-Gas/Erdgas* (2014), Nr. 155, S. 128–130. URL [http://www.bonalytic.de/cps/bonalytic/ds\\_doc/GE\\_03\\_2014\\_Clemens.pdf](http://www.bonalytic.de/cps/bonalytic/ds_doc/GE_03_2014_Clemens.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-07-06
- [12] SCHREIER, W.: *Untersuchung von Gasleckagen bei Biogasanlagen*. 07.11.2011 (Berichts-Nr.: B66711 IR\_BGA Sachsen)
- [13] LIEBETRAU, J. ; CLEMENS, J. ; CUHLS, C. ; HAFERMANN, C. ; FRIEHE, J. ; WEILAND, P. ; DANIEL-GROMKE, J.: *Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector*. In: *Engineering in Life Sciences* 10 (2010), Nr. 6, S. 595–599
- [14] WEISMANN, D. ; KÜVER, J.: *Biokorrosion an Rohrsystemen und Bauwerken*. In: *energie | wasser* (2016), Nr. 4, S. 38–43
- [15] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN: *Was leisten Biogasanlagen für den Klimaschutz?* URL <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/198/article/24157.html>. – Aktualisierungsdatum: 2014-01-23 – Überprüfungsdatum 2016-07-07
- [16] DÖHLER, H.; ACHILLES, W. (Mitarb.): *Faustzahlen Biogas*. 3. Aufl. Darmstadt: KTBL, 2013
- [17] CLEMENS, J. ; KOHNE, S. ; NEITZEL, S. ; SCHREIER, W.: *Verluste durch Methanemissionen an Biogasanlagen: Qualitätssicherung bei der Erkennung: Gasmengen, Konzentrationen, Bewertung*. URL <http://www.qmab.de/qualitaetssicherung-bei-methangasleckagen.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-08-25