



Schlussbericht 18. Oktober 2013

Geruchsquellen bei Biogasanlagen

Situationsanalyse

Geruchsstoffkonzentration von Einzelquellen

Fahnenbegehungen bei einem Betrieb



Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit
PD Dr. habil. Matthias Schick
Tänikon 1
CH-8356 Ettenhausen
www.agroscope.ch

Autoren:

Dr. Margret Keck, margret.keck@agroscope.admin.ch
Dr. Sabine Schrade, sabine.schrade@agroscope.admin.ch
Matthias Frei
Markus Keller
Katharina Weber
Kerstin Mager

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

BFE-Bereichsleiter: Dr. Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Dr. Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154356 / 103306

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

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	6
1. Einleitung	9
1.1. Problemstellung	9
1.2. Ziele.....	10
2. Kenntnisstand	11
2.1. Geruchsstoffkonzentrationen	11
2.2. Empfehlungen zur Geruchsminderung	14
3. Situationsanalyse bei Anlagenbetreibern in der Schweiz	21
3.1. Vorgehen bei der Befragung	21
3.1.1. Fragebogen	21
3.1.2. Durchführung	21
3.1.3. Auswertung.....	21
3.2. Ergebnisse	22
3.2.1. Allgemeine Betriebsdaten, Anlagenkomponenten und Verfahrenstechnik	22
3.2.2. Substrate, Gärrest und deren Lagerung.....	23
3.2.3. Tierhaltung.....	26
3.2.4. Standorte der Betriebe und Erfahrungen der Landwirte mit der Geruchsthematik	27
3.3. Folgerungen	29
4. Geruchsstoffkonzentration von Einzelquellen landwirtschaftlicher Betriebe mit Biogasanlagen	30
4.1. Vorgehen	30
4.1.1. Betriebsübersicht	30
4.1.2. Ablauf der Erhebungen.....	33
4.1.3. Beschreibende Parameter.....	33
4.1.4. Probenahme	34
4.1.5. Olfaktometrie	34
4.2. Ergebnisse	35
4.2.1. Beschreibende Parameter.....	35
4.2.2. Geruchsstoffkonzentration.....	36
4.3. Diskussion.....	41
5. Berechnung der erforderlichen Mindestabstände für den Bereich Tierhaltung	43
5.1. Vorgehen	43
5.2. Ergebnisse, Diskussion und Folgerungen	43
6. Geruchswahrnehmung des Gesamtbetriebs bei Fahnenbegehungen am Beispiel einer Biogasanlage mit Tierhaltung	45
6.1. Vorgehen	45
6.1.1. Beschreibung des Betriebes.....	45
6.1.2. Geruchsfahnenbegehungen	46
6.1.3. Weitere Parameter.....	48
6.2. Ergebnisse und Diskussion der Geruchsfahnenbegehungen	49
6.3. Ergebnisse und Diskussion zum Biogasgeruch	50
7. Ausblick, Forschungsbedarf und Empfehlungen	52
7.1. Ausblick.....	52
7.2. Forschungsbedarf	52
7.3. Empfehlungen für die Praxis.....	53
8. Zusammenfassung.....	54
9. Literatur	56
10. Anhang	59

Abkürzungen

a	annus (Jahr)
AG	Aktiengesellschaft
Anz.	Anzahl
AS	Anströmungssituation
BFE	Bundesamt für Energie
BGE	Bundesgerichtsentscheid
BHKW	Blockheizkraftwerk
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
d	day (Tag)
D	Distanz
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
et al.	et alteri (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
e.V.	eingetragener Verein
FAT	Forschungsanstalt für Agrarökonomie und Landtechnik Tänikon
ggf.	gegebenenfalls
h	hour (Stunde)
Hz	Hertz
G	Geruchsintensität
GB	Geruchsbelastung
GE	Geruchseinheit
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Global Positioning System
GVE	Grossvieheinheit
k.A.	Keine Angabe
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
km	Kilometer
kW _{el}	Kilowatt elektrische Energie
l	Liter
LB	Liegeboxen
LW-Bonus	Landwirtschaftsbonus
m	Meter
m ²	Quadratmeter

m ³	Kubikmeter
Min.	Minimum
Max.	Maximum
MW	Mittelwert
n	Anzahl
Nr.	Nummer
n.v.	nicht vorhanden
perf.	perforiert
PET	Polyethylenterephthalat
planb.	planbefestigt
<i>QD</i>	Quadrat der Distanz
t	Tonnen
s	Sekunde
u.	und
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vol.-%	Volumenprozent
<i>WG</i>	Windgeschwindigkeit
X	mal
z.B.	zum Beispiel

Abstract (D)

Landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Schweiz sind meist auf Betrieben mit Tierhaltung ergänzt. Anlagen in der Nähe von Wohngebieten können zu Geruchsklagen von Anwohnern führen.

Ziel dieser Untersuchung war, die Geruchsstoffkonzentration relevanter Flächenquellen von Biogasanlagen zu quantifizieren. Die Geruchsimmissionen sind mittels Fahnenbegehungen mit Testpersonen bei Betrieben mit Biogasanlage und Tierhaltung untersucht. Hinweise zur Geruchsminderung sind aufgezeigt.

Eine Befragung bei 38 Anlagenbetreibern in der Schweiz zeigte eine grosse Heterogenität bei Anlagen- und Verfahrenstechnik sowie bei Substraten. Zu den Flächenquellen im Bereich der Biogasanlage zählen Substrat- und Gärrestlager. Aus der Tierhaltung kommen als Geruchsquellen emittierende Stall- und Auslaufflächen, Futter- und Hofdüngerlager hinzu.

Auf acht Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Tierhaltung erfolgten Erhebungen an 25 Tagen. Die Geruchsstoffkonzentration von Flächenquellen wurde am Olfaktometer mit Testpersonen bestimmt. Zu den geruchsintensiven Quellen zählten Festmist von Geflügel, Rind und Pferd, Rasenschnitt, Gemüserüstabfälle, Sickersaft, Gärrest und Biogas.

An denselben Erhebungsterminen erfolgten immissionsseitig Geruchsfahnenbegehungen des Gesamtbetriebs. Sechs Testpersonen in verschiedenen Distanzen zum geruchsgewichteten Flächenschwerpunkt registrierten in 10-Sekunden-Intervallen ihre Geruchswahrnehmung. Als signifikante Einflussgrössen auf die immissionsseitige Wahrnehmung der Geruchsintensitäten resultierten in einem linearen Gemischte-Effekte-Modell die Distanz, die Windgeschwindigkeit und die Anströmsituation. Weiter wirkten Situationen mit Austritt von Biogas erhöhend. Biogasgeruch wurde von den Testpersonen als eindeutig unangenehm eingestuft.

Die Integration der Ergebnisse der Geruchsstoffkonzentrationen von Einzelquellen und der Abklingkurven aus Fahnenbegehungen bei Betrieben mit Tierhaltung und Biogasanlage in die «Empfehlungen Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen» ist erforderlich, damit belastbare Entscheidungsgrundlagen vorliegen und bereits in der Planungsphase eine Betrachtung der Gesamtanlage möglich wird. Bei der Standortwahl sind Abstände zu bewohnten Zonen ausreichend zu bemessen. Dabei sind spezielle Ausbreitungssituationen wie Kaltluftabfluss oder Talwind zu berücksichtigen.

Zur Geruchsminderung ist vor allem bei geruchsintensiven Flächenquellen anzusetzen. Emittierende Oberflächen sollten möglichst gering gehalten werden. Bei geruchsintensiven Substraten empfiehlt sich ein Vermischen mit weniger geruchsintensiven Substraten oder Abdecken. Um den Austritt von Biogas zu vermeiden, ist bei Prozessoptimierung und Wartung anzusetzen.

Abstract (F)

Les installations de biogaz agricoles en Suisse sont souvent venues compléter des exploitations de production animale. Les installations situées à proximité des zones d'habitation peuvent entraîner des plaintes de la part des riverains pour nuisances olfactives.

La présente étude avait pour objectif de quantifier la concentration d'odeurs dans les principales surfaces d'émissions des installations de biogaz. La dispersion du panache des immissions est examinée par des testeurs qui se rendent dans les exploitations avec installations de biogaz et de détention animale. Des indications sont fournies en vue de réduire les odeurs.

Une enquête réalisée auprès de 38 exploitants de ce type d'installations en Suisse a montré une grande hétérogénéité de la technique des installations, des méthodes et aussi des substrats. Dans le périmètre de l'installation de biogaz, les surfaces d'émission sont le stock de substrats et de résidus de fermentation. Les principales sources d'émissions en production animale sont les surfaces de l'étable et de l'aire d'exercice extérieure ainsi que les stocks de fourrage et d'engrais de ferme.

Les relevés ont été effectués pendant 25 jours dans huit exploitations avec des installations de biogaz agricoles et de production animale. La concentration d'odeurs des surfaces émettrices a été déterminée à l'olfactomètre par des testeurs. Les sources dégageant les odeurs les plus intenses étaient les fientes de volaille, le fumier de bovins et le crottin de cheval, les coupes de gazons, les déchets de parage de légumes, le jus et les résidus de fermentation ainsi que le biogaz.

Aux mêmes dates de relevés, l'ensemble de l'exploitation a été parcourue par des testeurs qui ont examiné la dispersion du panache des immissions. Six testeurs à différentes distances du point de référence par rapport à l'odeur et à la surface ont enregistré leur perception des odeurs à dix secondes d'intervalle. Un modèle linéaire à effets mixtes a indiqué que les grandeurs qui influençaient significativement la perception de l'intensité des odeurs étaient la distance, la vitesse du vent et la situation du flux entrant. Enfin, les émanations de biogaz intensifiaient la situation. L'odeur du biogaz a été classée comme clairement désagréable par les testeurs.

Il est nécessaire d'intégrer les résultats des concentrations d'odeurs émanant des sources uniques et les gradients de décroissance tracés à partir des relevés de panache dans les exploitations avec production animale et installation de biogaz dans la recommandation «Distances minimales à observer pour les installations d'élevage». Ceci permettra d'avoir des bases de décision solides et de pouvoir prendre en compte l'ensemble de l'installation dès la phase de projet. Lors du choix du site, les distances par rapport aux zones d'habitation doivent être suffisamment mesurées. Les mesures doivent également tenir compte des situations spéciales pour la propagation comme les flux d'air froid ou le vent de vallée.

Pour réduire les odeurs, il faut avant tout agir sur les surfaces d'émission qui dégagent les odeurs les plus intenses. Il est important de minimiser la superficie des surfaces émettrices. Lorsque les substrats utilisés ont une odeur très intense, il est recommandé de les mélanger avec des substrats dont l'odeur est moins intense ou de les couvrir. Pour éviter le dégagement de biogaz, il est essentiel d'optimiser les processus et de l'entretenir.

Abstract (E)

Agricultural biogas facilities in Switzerland generally complement livestock farms. Facilities in the vicinity of residential areas can lead to complaints from residents about odours.

The aim of this study was to quantify the odour concentration of relevant area sources of biogas facilities. The odour impact was investigated using field plume inspections by assessors on livestock farms with a biogas facility. Pointers to odour reduction were identified.

A survey of 38 facility operators in Switzerland revealed very heterogeneous plant and process technology as well as a wide diversity of substrates. Area sources in the biogas plant zone included storage facilities of substrates and fermentation residues. Additional odour sources from animal farming were emissions from stable and outdoor exercise areas, feed and manure stores.

Investigations were carried out on 25 days on eight livestock farms with agricultural biogas facilities. The odour concentration of area sources was determined at the olfactometer by assessors. Odour-intensive sources included solid poultry, cattle and horse manure, grass cuttings, vegetable waste, effluent, fermentation residues and biogas.

Field plume inspections in the ambient air of the farm as a whole were carried out on the same survey dates. Six assessors at various distances from the odour- and surface-weighted reference point registered their odour perception at 10-second intervals. In a linear mixed effects model the significant influencing variables on the perception of odour intensity in ambient air turned out to be distance, wind speed and inflow situation. Biogas leakage situations further increased the effect. Biogas odour was rated as definitely unpleasant by the assessors.

It is essential to incorporate the results of odour concentrations from individual sources and of decay curves from plume inspections on livestock farms with biogas facilities into the «Recommendations for minimum distances from animal housing systems» so as to provide a solid basis for decision-making and enable the facility to be considered as a whole even in the planning phase. Allowance should be made for sufficient distances to residential areas when selecting a site, with special dispersion situations such as cold air flow or valley wind being factored in.

The very first step in odour reduction should be to tackle odour-intensive area sources. Emitting surfaces should be kept to a minimum. It is recommended that odour-intensive substrates should be mixed with less odour-intensive substrates or covered. Process optimisation and maintenance should be addressed in order to prevent biogas leakage.

Geruchsquellen bei Biogasanlagen

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Die Anzahl der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz ist seit dem Jahr 2000 von rund 60 auf über 80 Anlagen gestiegen (Gubler et al. 2007; Kaufmann 2012). Die kostendeckende Einspeisevergütung für Biogasstrom aus erneuerbaren Energien (KEV) seit dem Jahr 2009 und der Landwirtschaftsbonus für güllebasierte Biogasanlagen mit mindestens 80 % Hofdüngeranteil der eingesetzten Substrate können eine weitere Zunahme von landwirtschaftlichen Biogasanlagen begünstigen.

Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden meist als Erweiterung zu einem Landwirtschaftsbetrieb mit Nutztierhaltung in der Landwirtschaftszone errichtet. Die verarbeiteten Substrate müssen zu mehr als der Hälfte vom Standortbetrieb oder von Landwirtschaftsbetrieben aus der näheren Umgebung (innerhalb einer Fahrdistanz von 15 km) stammen (Raumplanungsverordnung 2000). Laut Bundesgericht stellen eine Biogasanlage und der dazugehörige landwirtschaftliche Standortbetrieb mit Tierhaltung einen engen räumlichen und funktionalen Zusammenhang, eine Gesamtanlage, dar. Im Hinblick auf ein Baubewilligungsverfahren geht aus einem Beschluss des Bundesgerichts hervor, dass diese Anlagen nicht ohne Einbezug der bestehenden Tierhaltung geprüft werden können (Bundesgerichtsentscheid 2009). Zur Nutzung der Abwärme aus der Biogasproduktion ist ein Standort in der Nähe von geeigneten Abnehmern anzustreben. Doch Geruchsimmissionen in bewohnten Zonen, die auf Biogasanlagen zurückzuführen sind, können zu Einsprachen oder Beschwerden führen (Basler und Partner 2005; Weber et al. 2006). Laut Angele et al. (2010) treten in der Öffentlichkeit vermehrt Beschwerden über Geruchsbelästigung durch Biogasanlagen auf. Deshalb wird in der Schweiz derzeit ein Abstand zu Wohngebieten von 200 bis 300 m empfohlen (Basler und Partner 2005; Jäger-Urban 2006). Gemäss TA Luft (2002) ist in Deutschland bei geschlossenen Anlagen (Bunker, Vergärung, Nachrotte) ab einer Durchsatzleistung von 10 t Abfällen je Tag ein Mindestabstand von 300 m, bei offenen Anlagen von 500 m erforderlich.

Bei Schwachwind, Windstille und in den Nachtstunden während Kaltluftabfluss konnten noch in 500 m Abstand zu einer nicht ordnungsgemäss betriebenen Biogasanlage mit einem Durchsatz von ca. 7000 t pro Jahr täglich wiederkehrend erhöhte Schwefelwasserstoffkonzentrationen, als einzelne Leitkomponente für die Geruchsausbreitung, gemessen werden (Beck 2006). Ubeda et al. (2010) führten in Belgien bei einem Milchviehbetrieb mit Biogasanlage Geruchserhebungen durch. Die Geruchsemissionsrate der verschiedenen Flächenquellen wurde mit dynamischer Olfaktometrie ermittelt. Vor allem Gülle und Festmist ergaben eine höhere Geruchsemissionsrate im Vergleich zu den Flächenquellen des Milchviehstalles, der Gärgülle und der Maissilage. Die Reichweite der Geruchsfahne, ermittelt mit Zick-Zack-Begehungen entlang der Fahnenachse, wie auch die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung betrugen über 400 m. Nicolas et al. (2013) ermittelten mit Fahnenbegehungen und Rückwärtsmodellierung die Geruchsemissionsrate von drei Betrieben mit Biogasanlagen in Belgien, Luxemburg und Deutschland. Die maximale Distanz mit Geruchswahrnehmung an acht Erhebungstagen betrug zwischen 300 und 600 m.

Nach den geltenden Empfehlungen für Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen (FAT-Bericht 476) kann bei Biogasanlagen ein Korrekturfaktor von 0.9 bei der Flüssigmistlagerung angesetzt werden (1995). Dieser Korrekturfaktor bezieht sich nur auf damals verbreitete hofdüngerbasierte Biogasanlagen ohne Kofermentation. Die Angaben zur Geruchsminderung um 30-45 % basieren auf olfaktometrischen Messungen nur am Lagerbehälter bei vergorener Gülle im Vergleich zu unvergorener Gülle. Weitergehende Erhebungen an der Gesamtanlage lagen damals nicht vor.

Bisher fehlen wissenschaftlich fundierte Daten als Grundlagen zur Mindestabstandsempfehlung von Tierhaltung mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen und mit Blick auf geeignete Minderungsmaßnahmen.

1.2. Ziele

Ziel dieser Untersuchung ist, relevante Geruchsquellen landwirtschaftlicher Biogasanlagen zu identifizieren sowie zu quantifizieren. Diese Daten bilden eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für erforderliche Abstände zu bewohnten Zonen.

Dieses Ziel wird über folgende Teilschritte erreicht:

- Baulich-technische Daten, der Einsatz von Substraten, Managementaspekte, Dimensionen der Anlagen, Substrat- und Gärrestlager sowie relevante Daten aus dem Bereich Tierhaltung sind mittels strukturiertem Interview von Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfasst. Diese Daten dienen zur Charakterisierung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Schweiz. (Kapitel 3)
- Die Geruchsstoffkonzentration einzelner Flächenquellen ist mittels Olfaktometrie bei Betrieben mit Tierhaltung und Biogasanlage während unterschiedlicher klimatischer Bedingungen untersucht: Substrate, Gärrest, Laufflächen, Laufhöfe/Ausläufe, Liegeflächen etc. (Kapitel 4)
- Die Geruchsimmissionen sind mit Blick auf erforderliche Abstände zu bewohnten Zonen mittels systematischer Fahnenbegehungen mit Testpersonen bei Betrieben mit Biogasanlage und Tierhaltung untersucht. Zur Beschreibung der jeweiligen Erhebungssituation und zur Bestimmung der relevanten Einflussgrößen sind relevante Begleitparameter wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Charakterisierung der Betriebssituation usw. erhoben. Die Immissionsdaten sind unter Berücksichtigung wesentlicher Einflussgrößen statistisch ausgewertet. (Kapitel 6)

2. Kenntnisstand

Die folgenden Unterkapitel zeigen den Kenntnisstand aus der Literatur zu Geruchsstoffkonzentrationen verschiedener Einzelquellen und Empfehlungen zur Minderung von Gerüchen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf.

2.1. Geruchsstoffkonzentrationen

In der Literatur liegen bisher wenig Daten zu Geruchsstoffkonzentrationen von einzelnen Geruchsquellen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen vor. Eine Übersicht über Literaturdaten zu verschiedenen Geruchsquellen landwirtschaftlicher Biogasanlagen ist in Tabelle 1 bis Tabelle 4 aufgezeigt. Die dargestellten Geruchsstoffkonzentrationen wurden, sofern es im Einzelfall nicht abweichend beschrieben ist, mittels Olfaktometrie mit Testpersonen in Anlehnung an DIN EN 13725 (2003) bestimmt. Dabei wurden Olfaktometer der Typen TO7 oder TO8 verwendet. Während Geruch von Abgasen aus Blockheizkraftwerken BHKWs in drei Studien aus Deutschland (Kretschmann et al. 2012; Moczigemba et al. 2008; Völlmecke 2007) und in einer Studie aus der Schweiz (Hunkeler und Stoll 2011) untersucht wurden, liegen zu anderen Geruchsquellen, wie die Lagerung von Substraten und Gärrest, lediglich Daten von Hunkeler und Stoll (2011) sowie punktuell von Plätzer (2008) vor. Da es sich bei der Studie von Hunkeler und Stoll (2011) jeweils um Einzelwerte pro Situation handelt, ist die Ableitung eines Faktors für die Geruchsstoffkonzentration der einzelnen Quellen nicht zulässig.

Tabelle 1 zeigt Geruchsstoffkonzentrationen für die Lagerung von **Festsubstraten** aus der Untersuchung von Hunkeler und Stoll (2011). Die Probenahme erfolgte mit einer belüfteten Probenahmehaube über einen Zeitraum von jeweils 1 min. Das Substrat wurde bis auf wenige Ausnahmen jeweils im Ruhezustand und frisch aufgeworfen untersucht. Dabei lag über alle Substrate hinweg der Wert für das frisch aufgeworfene Substrat um den Faktor 2 bis 30 höher als der des Ruhezustands. Eine Ausnahme bildet ein Wertepaar beim Getreideabgang mit sehr tiefen Werten. Im Vergleich zwischen den Substraten zeigten sich sehr grosse Unterschiede in der Geruchsstoffkonzentration. Während im Ruhezustand bei Kaffeesatz lediglich eine Geruchsstoffkonzentration von 20 GE/m³ gemessen wurde, war diese bei Fruchtabfällen mit 3300 GE/m³ und Gewürztreber mit 1150 GE/m³ deutlich höher. Bei Grüngut/Rasenschnitt gab es grosse Unterschiede zwischen den beiden dargestellten Wertepaaren von zwei Betrieben. Ein Wert lag mit 25 800 GE/m³ für den Ruhezustand um mehr als das Hundertfache höher als beim anderen Betrieb mit 220 GE/m³. Ein hoher Wert ergab sich auch bei Schweinefestmist mit 38 200 GE/m³.

In Tabelle 2 sind Werte von **Flüssigsubstraten** aus der Untersuchung von Hunkeler und Stoll (2011) aufgezeigt, die direkt in Zu- bzw. Abluftleitungen beprobt wurden. Dargestellt sind jeweils Einzelwerte mit/ohne Rühren bzw. vor/nach Abluftreinigung. Beim Substratgemisch in einer geschlossenen Vorgrube lag der Wert für den Ruhezustand mit 11 580 GE/m³ etwa um die Hälfte tiefer als der für Rühren mit 23 170 GE/m³. Der Biofilter bewirkte, dass die Geruchsstoffkonzentration der gereinigten Abluft auf 8510 GE/m³ vermindert wurde. Bei Fleischsuppe aus einem geschlossenen Speiserestetank reduzierte sich die Geruchsstoffkonzentration durch einen Aktivkohlefilter von 983 000 auf 5800 GE/m³. Weitere Werte zu Flüssigsubstraten der Studie von Hunkeler und Stoll (2011) wurden für den Vergleich nicht berücksichtigt, da die Beprobung dieser Flüssiglager mit der belüfteten Probenahmehaube auf der Schachttöffnung und nicht direkt auf dem Substrat erfolgte. Mit diesem Vorgehen wurde ein Teil der Verdrängungsluft und nicht die emittierende Oberfläche erfasst. Damit sind die Werte nicht mit anderen passiven Flächenquellen (flüssig oder fest) vergleichbar.

Tabelle 1: Geruchsstoffkonzentrationen [GE/m³] von festen Substraten aus der Literatur als Einzelwerte dargestellt; differenziert nach Ort und Art der Lagerung sowie Behandlung (Abkürzung: k.A. = keine Angabe)

Substrat	Lagerungsart und -ort	Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³]		Quelle
		in Ruhe	Behandlung frisch aufgeworfen	
Festmist Geflügel	Festmistlager, offen	210	3070	Hunkeler und Stoll (2011)
Festmist Schwein	Festmistlager, offen		38200	
Fruchtabfälle, Alter: 6 Tage	Substratlager, offen	3300	7000	
Getreideabgang	Substratlager, unter Dach, 2 Seiten geschlossen	230	140	
	Substratlager, offen	100	1150	
Gewürztreiber	Substratlager, offen	1150	3250	
Grüngut, Rasenschnitt	Substratlager, überdacht, 3 Seiten geschlossen	220	1530	
	Substratlager, überdacht	25800	44200	
Kaffeersatz	Substratlager, offen	20	570	
Panseninhalt	Substratlager, offen	540	3650	
Salat und Rüstabfälle	Substratlager, offen	540	4600	
Silage	Substratlager, offen	k.A.	42200	

Tabelle 2: Geruchsstoffkonzentrationen [GE/m³] von Flüssigsubstraten aus der Literatur als Einzelwerte dargestellt; differenziert nach Ort und Art der Lagerung sowie Behandlung und Messpunkt (Abkürzung: k.A. = keine Angabe)

Substrat	Lagerungsart und -ort	Messort	Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³]		Quelle
			in Ruhe	mit Rühren	
Substrat flüssig	Vorgrube, geschlossen	Vor Biofilter	11580	23170	Hunkeler und Stoll (2011)
	Vorgrube, geschlossen	Nach Biofilter	8510	k.A.	
Fleischsuppe	Speiserestetank, geschlossen	Vor Aktivkohlefilter	983000	k.A.	
		Nach Aktivkohlefilter	5800	k.A.	

Geruchsstoffkonzentrationen von **festem Gärrest** zeigt Tabelle 3. Bei den Werten von Hunkeler und Stoll (2011) handelt es sich um Einzelwerte pro Situation, die jeweils mit belüfteten Probenahmehauben beprobt wurden. Bei Plätzer (2008) erfolgte die Probenahme eines Gärrestlagers mit einer Passivquellenhaube (drei Einzelwerte) sowie mit einer Flüssigquellenhaube (drei Einzelwerte). Mit 9200 GE/m³ war die Geruchsstoffkonzentration von frisch separiertem Gärrest direkt nach dem Separator am höchsten (Hunkeler und Stoll 2011). Gärrest mit bzw. ohne Grüngutabfälle ergab im Ruhezustand Geruchsstoffkonzentrationen von 390 bzw. 360 GE/m³, während durch Aufwerfen mehr als doppelt so hohe Werte resultierten (Hunkeler und Stoll 2011). Der Median der Messwerte von einem offenen Gärrestlager von Plätzer (2008) war vergleichbar mit den Werten bei den Untersuchungen von Hunkeler und Stoll (2011).

Tabelle 3: Geruchsstoffkonzentrationen [GE/m³] von festem Gärrest aus der Literatur als Einzelwerte bzw. Median, Minimum und Maximum dargestellt; differenziert nach Ort und Art der Lagerung sowie Behandlung und Lagerdauer (Abkürzung: k.A. = keine Angabe)

Gärrest, Lagerungsort und -art	Behandlung, Lagerdauer	Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³]	Anzahl Werte [n]	Quelle
		Einzelwert, Median (Min.-Max.)		
Wagen direkt nach Separator, überdacht	Frisch, direkt nach dem Austrag aus dem Fermenter und Separator	9200	1	Hunkeler und Stoll (2011)
Gärrest mit zerkleinerten Grüngutabfällen, überdacht	Zuletzt vor 4 Tagen aufgeworfen, Krustenbildung	360	1	
	Frisch aufgeworfen	1020	1	
Gärrest mit zerkleinerten Grüngutabfällen, Lager mit Folie	Alter 2–2,5 Monate, Reifekompost	220	1	
Gärrestlager, offen	Vor dem Aufwerfen	390	1	
	Frisch aufgeworfen	910	1	
Gärrestlager, offen	k.A.	270 (200-1100)*	6	Plätzer (2008)

In Tabelle 4 sind Geruchsstoffkonzentrationen von Abgasen aus mit Biogas betriebenen Motoren von **BHKWs** aus der Literatur als Median, Minimum und Maximum dargestellt. Die Werte sind, soweit dies möglich ist, differenziert nach Art des Motors (Zündstrahlmotor – Gas-Ottomotor), Betriebszustand (Volllast - Teillast) sowie nach dem Kriterium ohne bzw. nach Abgasreinigung. Die Datengrundlage besteht aus Werten einzelner Motoren verschiedener landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Bei den Untersuchungen von Kretschmann et al. (2012), Moczigemba et al. (2008) und Völlmecke (2007) handelt es sich bei den Einzelwerten um Mittelwerte aus drei Proben pro Motor und Situation. Den Daten von Hunkeler und Stoll (2011) liegt pro Wert jeweils eine Einzelprobe zugrunde. Der Median der Geruchsstoffkonzentrationen von Zündstrahlmotoren liegt etwas über den Werten von Gas-Ottomotoren. Der Median der Gas-Ottomotoren im Volllastbetrieb liegt mit 4350 GE/m³ knapp doppelt so hoch wie der Median im Teillastbetrieb mit 2225 GE/m³. Bei den Gas-Ottomotoren entspricht der Median der Werte nach der Abgasreinigung mit 1450 GE/m³ etwa der Hälfte des Medians der Werte ohne Abgasreinigung mit 2750 GE/m³. Über alle Kategorien hinweg sind die Maxima um ein Vielfaches (um Faktor 4 bis Faktor 32) grösser als die Minima.

Tabelle 4: Geruchsstoffkonzentrationen [GE/m³] von Abgasen mit Biogas betriebener Motoren von BHKWs aus der Literatur als Median, Minimum und Maximum dargestellt; differenziert nach Art des Motors, Betriebszustand sowie ohne bzw. nach Abgasreinigung (Abkürzung: k.A. = keine Angabe)

Art des Motors	Betriebszustand	Abgasreinigung	Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³] Median (Min.-Max.)	Anzahl Werte [n]	Quelle
Zündstrahl	Volllast	k.A.	4850 (2200-8200)	11	Moczigemba et al. (2008); Völlmecke (2007)
Gas-Otto	Volllast	k.A.	4350 (1300-7000)	18	
Gas-Otto	Teillast	k.A.	2225 (800-9500)	14	
Gas-Otto	k.A.	Ohne	2750 (290-9450)	10	Hunkeler und Stoll (2011); Kretschmann et al. (2012)
Gas-Otto	k.A.	Nach	1450 (330-2380)	5	Kretschmann et al. (2012)

Hunkeler und Stoll (2011) haben weiter bei zwei Betrieben die Geruchsstoffkonzentration aus der **Tragluft** zwischen der Doppelmembran gemessen. Dabei erfolgte die Probenahme mit einem Schlauch direkt am Überdruckventil, an welchem die Luft zwischen den beiden Fermenterfolien nach aussen tritt. Mit 2200 und 16 700 GE/m³ unterschieden sich die Geruchsstoffkonzentrationen der beiden Betriebe deutlich. Bei Plätzer (2010) sind für die Geruchsstoffkonzentration von Tragluft 1800 bis 4200 GE/m³ angegeben. Dabei handelt es sich um Werte von sogenannten hauseigenen Messungen, die nicht detaillierter erläutert waren (Werte nicht tabellarisch dargestellt).

Biogas besitzt nach Liebich (2004) eine Geruchsstoffkonzentration von rund 500 000 GE/m³ bis hin zu mehreren Millionen GE/m³. Brun und Völlmecke (2008) verwenden in einer Geruchsimmissionsprognose einen Wert von 270 000 GE/m³ für die Geruchsstoffkonzentration im Fermenter (Werte tabellarisch nicht dargestellt).

2.2. Empfehlungen zur Geruchsminderung

Im Folgenden ist eine Übersicht der Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch von Biogasanlagen gegliedert nach Anlagenteil bzw. Prozessstufe dargestellt (Tabelle 5 bis Tabelle 9). Es handelt sich dabei ausschliesslich um Massnahmen, die von Praxiserfahrungen oder von allgemeinen Geruchsreduktionsprinzipien abgeleitet wurden. Für keine der angeführten Massnahmen konnten systematische Erhebungen der Geruchsstoffkonzentration, -emission oder -immission eruiert werden.

Um die Geruchsbelästigung von Anwohnerinnen und Anwohnern beim Transport von Substraten und Gärrest möglichst gering zu halten, sind Fahrten durch Wohngebiete zu vermeiden (Einfeldt 2006; Serafimova et al. 2008). Serafimova et al. (2008) empfehlen weiter, Flüssigkeiten mit Bodenleitungen zu transportieren. Bei der Lagerung von Substraten und Gärrest sollten grosse windangeströmte Oberflächen möglichst vermieden werden. Lagerbehälter für Flüssigkeiten sind vorzugsweise gedeckt oder geschlossen auszuführen (z.B. Aschmann et al. 2007; Baudisch 2008; Baumann 2006; Bigatec 2004; Einfeldt 2006; Jäger-Urban 2006; Reitberger 2002; Serafimova et al. 2008; VDI 2010a). Die Einhausung oder Kapselung insbesondere von geruchsintensiven Stoffen empfehlen mehrere Autoren/innen (z.B. Aschmann et al. 2007; Bigatec 2004; Burkhalter 2010; Jäger-Urban 2006; Postel und Fischer 2010; Reitberger 2002; VDI 2010a; Weber et al. 2006). Feststoffdosierer sind abzudecken, um die Freisetzung von Geruch im Ruhezustand und beim Feststoffeintrag zu vermindern (Aschmann et al. 2007; C.A.R.M.E.N. e.V. 2009; Ebertsch et al. 2011).

Aktivitäten wie Annahme und Aufbereitung von Substrat oder die Separierung von Gärrest sollen in geschlossenen Hallen stattfinden, um die Geruchsfreisetzung zu reduzieren (z.B. Aschmann et al. 2007; Bigatec 2004; Burkhalter 2010; Jäger-Urban 2006). Zusätzlich kann die Abluft von geschlossenen Hallen gefasst bzw. einer Abluftreinigungsanlage (Biofilter) zugeführt werden (z.B. Aschmann et al. 2007; Burkhalter 2010; Jäger-Urban 2006; Postel und Fischer 2010; Reitberger 2002; VDI 2010a). Weiter wird empfohlen, die Verdrängungsluft der Vorgrube zu fassen bzw. mit einem Biofilter oder Ähnlichem zu reinigen (Baumann 2006; Beck 2009; Liebich 2009; Reitberger 2002; Serafimova et al. 2008).

Um die Freisetzung von geruchsintensivem Biogas durch die Gasspeichermembran zu vermindern, sollte diese gasdicht, druckfest, medien-, UV-, temperatur- und witterungsbeständig sein (Ebertsch et al. 2011; VDI 2010a) und auf Dichtigkeit geprüft werden (Aschmann et al. 2007; Beck 2009; Ebertsch et al. 2011; Weber et al. 2006). Produktionsspitzen im Biogasprozess können auch durch eine automatisierte Massendosierung in die Vorgrube und eine automatische Fermenterbeschickung vermieden werden (Baumann 2006; C.A.R.M.E.N. e.V. 2009). Weiter reduziert eine optimale Abstimmung von Fermentervolumen und Substratbeschickung das Risiko der Biogasfreisetzung. Allfällige Schwankungen im Biogasanfall können mit einem ausreichend grossen Gasspeichervolumen aufgefangen werden (Baudisch 2008; Baumann 2006; C.A.R.M.E.N. e.V. 2009; Ebertsch et al. 2011; Einfeldt 2006; Reitber-

ger 2002; Serafimova et al. 2008; VDI 2010a). Für Wartungsarbeiten, Betriebs- oder Prozessstörungen muss ein Reservemotor und/oder eine Notfackel bereitgehalten werden (z.B. Baudisch 2008; Ebertsch et al. 2011; Reitberger 2002; Serafimova et al. 2008; VDI 2010a).

Umschlags- und Betriebsflächen sind bei Verunreinigung durch Substrate, Gärrest oder Sickersaft unverzüglich zu reinigen, um eine Geruchsfreisetzung zu begrenzen (Baudisch 2008; Baumann 2006; Einfeldt 2006; Reitberger 2002).

Tabelle 5: Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch: Transport, Anlieferung und Aufbereitung von Substraten

Anlagenteil, Prozessstufe	Minderungsmaßnahmen	Quelle
Transport Substrate	Anlieferungswege nicht durch Wohngebiete	Einfeldt (2006); Serafimova et al. (2008)
	Möglichst wenig Fahrten	Serafimova et al. (2008)
	Reinigung von Zufahrtswegen und Hofflächen	Baudisch (2008); Einfeldt (2006); Reitberger (2002)
	Geschlossene Behälter/Fahrzeuge bzw. Abdeckung mit Plane (insbesondere bei geruchsintensiven Substraten)	Baudisch (2008); Ebertsch et al. (2011); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010a)
Anlieferung Substrate	Auf regelmässige Anlieferung achten, um Lagerzeiten zu verkürzen	Plank (2009)
	Fahrwege und Betriebsflächen befestigen und reinigungsfreundlich gestalten	Reitberger (2002)
	Eingehauste Annahmebereiche	Aschmann et al. (2007); Burkhalter (2010); Einfeldt (2006); Jäger-Urban (2006); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); VDI (2010)
	Tore zum Abladen schliessen	Postel und Fischer (2010)
	Bei geschlossenen Hallen Abluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	Aschmann et al. (2007); Burkhalter (2010); Jäger-Urban (2006); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); VDI (2010)
	Ggf. Fahrzeugschleuse	Reitberger (2002)
	Flüssige Substrate über Rohrleitungen führen	Serafimova et al. (2008)
	Kapselung oder Ausführung in geschlossener Bauweise	Aschmann et al. (2007), Bigatec (2004); Einfeldt (2006); Jäger-Urban (2006); Reitberger (2002)
Substrataufbereitung: Hygienisierung, Zerkleinerung, Homogenisierung, Anmischen etc.	Bei geschlossenen Hallen Abluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	Burkhalter (2010); Jäger-Urban (2006)
	Entstehende Verunreinigungen sofort beseitigen	Reitberger (2002)

Tabelle 6: Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch: Substratlagerung und Vorgrube

Anlagenteil, Prozessstufe		Minderungsmaßnahmen	Quelle
Lagerung Substrate	fest	Offene Flächen gering halten; je nach Substratart und Geruchsintensität: Einhausung, geschlossene Halle, Lagerung in Behältern, Abdeckung (insbesondere bei geruchsintensiven Substraten)	Aschmann et al. (2007); Bigatec (2004); Ebertsch et al. (2011); Einfeldt (2006); Jäger-Urban (2006); Plank (2009); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); VDI (2010)
		Bei geschlossenen Hallen Abluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	Aschmann et al. (2007); Ebertsch et al. (2011); Jäger-Urban (2006), VDI (2010)
		Sickersaft erfassen und ableiten (Gefälle, kurze Entwässerungswege), ggf. auftretende Sickersaftpfützen mit Brand- oder gelöschtem Kalk neutralisieren	Baudisch (2008); Baumann (2006); Beck (2009); Einfeldt (2006); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
		Möglichst kurze Lagerdauer	Beck (2009); Ebertsch et al. (2011); Plank (2009); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
		Gut zu reinigende, beständige Bodenausführung für Lagerflächen	Bigatec (2004)
		Reinigung der Rangier- und Lagerflächen	Baumann (2006); Bigatec (2004); Ebertsch et al. (2011); VDI (2010)
		FrISChe Substrate ggf. einsilieren	VDI (2010)
	flüssig	Lagerbehälter geschlossen ausgeführt bzw. mit Schwimmdecke	Bigatec (2004); Jäger-Urban (2006); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
	Silagen	Saubere Anschnittflächen	Baudisch (2008)
		Anschnittfläche nur während der Entnahme öffnen	Ebertsch et al. (2011); Völlmecke (2007)
		Mit geeigneter Abdeckung versehen	Ebertsch et al. (2011); VDI (2010)
		Sickersaft fassen und ableiten	Baudisch (2008); Beck (2009); VDI (2010)
		Reinigung von Siloplaten und Rangierflächen	Ebertsch et al. (2011); VDI (2010)
Vorgrube		Abdeckung	Aschmann et al. (2007); Baumann (2006); Beck (2009); C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Ebertsch et al. (2011); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008)
		Verdrängungsluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	Baumann (2006); Beck (2009); Liebich (2009); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008)
		Nicht überdimensioniert	C.A.R.M.E.N. e.V. (2009)
		Öffnen nur für kurzzeitige Befüllvorgänge (ggf. funkgesteuerte Abdeckungssteuerung)	Aschmann et al. (2007); Ebertsch et al. (2011); Postel und Fischer (2010), Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)

Tabelle 7: Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch: Substrateintrag sowie Fermenter, Nachgärer und Gasspeicher

Anlagenteil, Prozessstufe		Minderungsmaßnahmen	Quelle
Eintrag Substrate in Vorgrube bzw. Fermenter		Feststoffdosierer abdecken	Aschmann et al. (2007); C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Ebertsch et al. (2011)
		Verzicht auf Vorgruben (direktes Einpumpen flüssiger Substrate in den Fermenter; Feststoffeingabeverfahren unter Umgehung der Vorgrube z.B. Förderschnecken oder Stempelpressen)	Postel und Fischer (2010); Völlmecke (2007)
		Eintrag mit einem geschlossenen System (Zwangsbeschicker, Schneckenpresse, Schneidschnecken, Einbringwalze, Stempelpressen, Förderschnecken etc.)	Aschmann et al. (2007); Baudisch (2008); Beck (2009); Reitberger (2002); VDI (2010)
		Abluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	Jäger-Urban (2006)
		Feststoffe rasch eintragen	C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Serafimova et al. (2008)
		Automatische Massendosierung	C.A.R.M.E.N. e.V. (2009)
		Entstehende Verunreinigungen sofort beseitigen	Reitberger (2002)
		Vermeidung von offenem Gülle-Spülstrahl; Flüssigkeitsverschluss	Beck (2009); Reitberger (2002)
Fermenter, Nachgärer, Gasspeicher	Gasspeicher-membran	Anforderungen: gasdicht, druckfest, medien-, UV-, temperatur- und witterungsbeständig; Witterungsschutz	Ebertsch et al. (2011); VDI (2010)
		Regelmässige Wartung/Überprüfung, ggf. Erneuerung	Aschmann et al. (2007); Beck (2009); Ebertsch et al. (2011); Weber et al. (2006)
		Dichtigkeitsprüfung vor Inbetriebnahme	Ebertsch et al. (2011);
		Doppelmembran verwenden	Beck (2009); C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Faber (2012); Weber et al. (2006)
		Bei Doppelmembran: Zwischenraumabsaugung; Ableiten der Abluft bei Tragluftsystemen über möglichst hohen Punkt	VDI (2010); Weber et al. (2006)
	Optimierung Prozess und Verfahrenstechnik	Gasspeicherregelung und ggf. Motorsteuerung über Füllstand oder Druck	C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Ebertsch et al. (2011); Weber et al. (2006); VDI (2010)
		Fermentervolumen und Substratbeschickung aufeinander abstimmen; ausreichend grosser Gasspeicher, um Schwankungen aufzufangen	Baudisch (2008); Baumann (2006); C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Ebertsch et al. (2011); Einfeldt (2006); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
		Automatisierung Fermenterbeschickung	Baumann (2006)
		Verweilzeiten im Fermenter einhalten	Baudisch (2008)
		Regelmässige Analysen des Fermenterinhalts	Baumann (2006); Beck (2009)
		Hilfsstoffe einsetzen (z.B. bei eiweissreichen Substraten)	Beck (2009)

Tabelle 8: Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch: Behandlung, Lagerung, Abtransport und Ausbringung von Gärrest

Anlagenteil, Prozessstufe		Minderungsmaßnahmen	Quelle
Gärrestbehandlung	Belüftung (anaerobe Behandlung)	Je nach Situation (Topographie, Abstand zu Wohnbebauung) sind geschlossene Systeme zu verwenden	Aschmann et al. (2007)
	Separation	Abhängig von eingesetzten Substraten in geschlossener Halle	Bigatec (2004)
Lagerung Gärrest	flüssig	Feste oder schwimmende Abdeckung; Schwimmschicht fördern; gasdichte Abdeckung	Aschmann et al. (2007); Baudisch (2008); Baumann (2006); Einfeldt (2006); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010); Weber et al. (2006)
		Windschutz durch Bepflanzung	Weber et al. (2006)
		Einleiten des flüssigen Gärrests unter der Oberfläche	Weber et al. (2006)
		Abkühlen vor Einleitung	Weber et al. (2006)
		Homogenisieren nur unmittelbar vor Ausbringung	Weber et al. (2006)
		Anbindung an gasführendes System	Reitberger (2002)
	fest	Abdeckung bzw. geschlossene Halle	Aschmann et al. (2007); Beck (2009); Faber (2012); Liebich (2004); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
		Bei geschlossenen Hallen Abluft fassen bzw. Abluftreinigung (Biofilter)	VDI (2010)
		Lange Lagerzeiten vermeiden	Weber et al. (2006)
Abtransport Gärrest	Möglichst wenig Fahrten; Fahrt durch Wohngebiete vermeiden		Serafimova et al. (2008)
	Flüssigen Gärrest möglichst mit Bodenleitung transportieren		Serafimova et al. (2008)
Ausbringung Gärrest	Bodennahe Ausbringung; rasches Einarbeiten; Ausbringung bei kühler Witterung		Serafimova et al. (2008)

Tabelle 9: Empfehlungen aus der Literatur zur Minderung von Geruch: BHKW, Biofilter, Wartungsarbeiten, Betriebs- oder Prozessstörungen und allgemeine Empfehlungen

Anlagenteil, Prozessstufe	Minderungsmaßnahmen	Quelle
BHKW	Vorsorgemassnahmen wie Verwendung von geeigneten Materialien, fachgerechter Einbau	VDI (2010)
	Regelmässige Wartung und Kontrolle; Abgasmessung; ggf. Wartungsvertrag	Baudisch (2008); Postel und Fischer (2010); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
	Motorleistung und -einstellung an Gasproduktion angepasst; Berücksichtigung der Biogasmenge und -zusammensetzung	Baudisch (2008); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
	Reservemotor oder Notfackel bereithalten	Baudisch (2008)
	Gasableitung über Schornsteine (10 m über Flur; 3 m über Dach)	Weber et al. (2006)
Biofilter	Filter richtig dimensionieren und regelmässig warten	Serafimova et al. (2008)
	Austausch des verbrauchten Filtermaterials	Beck (2009)
Wartungsarbeiten, Betriebs- oder Prozessstörungen	Vermeiden von Abblasen des Biogases bei Wartungsarbeiten; bei absehbaren Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten Gasspeicher vorab auf Minimalfüllstand bringen bzw. Reduzierung der Fütterung auf Mindestmass	Ebertsch et al. (2011); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
	Überdrucksicherung, ggf. Unterdrucksicherung	VDI (2010); Weber et al. (2006)
	Reservemotor bereithalten	Baudisch (2008); Ebertsch et al. (2011); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
	Notfackel bereithalten	Baudisch (2008); Baumann (2006); Beck (2009); C.A.R.M.E.N. e.V. (2009); Ebertsch et al. (2011); Einfeldt (2006); Liebich (2004); Reitberger (2002); Serafimova et al. (2008); VDI (2010)
Allgemeine Empfehlungen	Umsicht, Selbstkontrolle, gutes Management	Liebich (2009)
	Betreibersorgfalt, Sauberkeit	Baumann (2006)

3. Situationsanalyse bei Anlagenbetreibern in der Schweiz

Eine Befragung bei landwirtschaftlichen Biogasbetrieben ermöglicht einen Überblick über die Anlagen in der Schweiz. In diesem Kapitel sind die Ziele, das Vorgehen bei der Befragung sowie ausgewählte Ergebnisse aufgezeigt, erläutert und Folgerungen davon abgeleitet. Die Ergebnisse der Befragung ermöglichen auch die Auswahl von geeigneten Betrieben für detailliertere Geruchserhebungen.

Ziele der Situationsanalyse:

- Ein Überblick über landwirtschaftliche Biogasanlagen hinsichtlich Anlagen- und Verfahrenstechnik, baulichen und betrieblichen Gegebenheiten, Substrateinsatz und -lagerung, allgemeinen Betriebsdaten und Standortbedingungen liegt vor.
- Eine Typisierung bzw. eine Kategorisierung der Biogasanlagen ist erstellt.

3.1. Vorgehen bei der Befragung

Die Befragung wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektteam „Methanverluste bei Biogasanlagen“ durchgeführt. Die Erarbeitung des Fragebogens sowie die Durchführung der Befragung sind im Folgenden beschrieben.

3.1.1. Fragebogen

Eine Literaturanalyse gab Hinweise, welche Daten und Parameter bezüglich Funktionsweise, Substrateinsatz und Anlagentechnik sowie mit Blick auf Geruchsquellen und Methanverluste bei Biogasanlagen in der Schweiz relevant sind.

Inhalte des Fragebogens waren die folgenden Themenbereiche:

- Allgemeine Betriebsdaten
- Biogas (Produktion, Aufbereitung und Nutzung)
- Anlagenkomponenten und Verfahrenstechnik sowie Wartung, Störungen, Reparaturen
- Substrate (Arten, Anlieferung, Lagerung, Eintrag)
- Gärrest (Lagerung, Behandlung, Aufbereitung)
- Tierhaltung (Tierarten und -kategorien, Bestand, Haltungssysteme, Futterkomponenten und -lagerung)
- Organisatorische Aspekte, Aktivitäten
- Standortbedingungen, Zonen
- Erfahrungen im Bereich Geruch sowie Massnahmen zur Geruchsminderung

Die Fragen waren meist als geschlossene Fragen formuliert und Antworten möglichst vorgegeben. Weiter dienten Tabellen zur Erfassung von quantitativen Angaben.

3.1.2. Durchführung

Schweizweit wurden nach Angaben des Bundesamtes für Energie (BFE) zum Zeitpunkt der Befragung im Jahr 2010 rund 80 landwirtschaftliche Biogasanlagen betrieben. Davon wurden 38 Betriebe in der deutschsprachigen Schweiz im Rahmen der Situationsanalyse besucht.

Die Befragung der Anlagenbetreiber fand vor Ort auf dem Betrieb statt. Ein Interview dauerte in der Regel zwischen einer und drei Stunden. Es wurde von zwei Personen durchgeführt und protokolliert, wobei eine der Personen die Gesprächsführung übernahm. Ein Betriebsrundgang lieferte einen guten Überblick über die einzelnen Anlagenkomponenten. Weiter wurden Anlagendetails fotografisch dokumentiert. Vorteile dieser Art der Betriebserhebung waren, dass neben den technischen Daten z.B. Abmessungen der Lager und Standortbedingungen auch die Erfahrungen der Landwirte erfasst werden konnten.

3.1.3. Auswertung

Die Dateneingabe, Plausibilisierung und Auswertung erfolgte mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel. Bei der Eingabe wurden die Antwortmöglichkeiten codiert. Durch die

doppelte Aufzeichnung der Antworten während des Interviews und durch den anschliessenden Abgleich der Antworten konnte die Aussagesicherheit der Daten verbessert werden. Zur Plausibilisierung der Daten wurden für die Zahlenwerte jeweils Minimum und Maximum, Mittelwert, Median sowie das obere und untere Quartil berechnet. Die Auswertung der Daten erfolgte mit deskriptiver Statistik. Abbildungen wurden wiederum mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel erstellt.

3.2. Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die wichtigsten Ergebnisse der Befragung dargestellt. Nach einer Übersicht über die allgemeinen Betriebsdaten, Anlagenkomponenten und Verfahrenstechnik folgen Angaben zu Substraten, Gärrest und Lagerung sowie die Beschreibung der Tierhaltung und des Standortes.

3.2.1. Allgemeine Betriebsdaten, Anlagenkomponenten und Verfahrenstechnik

Tabelle 10 gibt einen Überblick über allgemeine Betriebsdaten sowie anlagen- und verfahrensspezifische Kennzahlen der 38 Biogasanlagen aus der Befragung.

Die Zahl der Anlagen, die nach dem Jahr 2000 in Betrieb genommen wurden, war deutlich höher als in den Vorjahren. In der Regel produzierten die befragten Landwirte mit den Biogasanlagen Strom und Wärme. Lediglich auf einem Betrieb fand eine Gasaufbereitung statt. Eine grosse Vielfalt bestand bezüglich den Anlagenherstellern.

Der Co-Substratanteil lag im Median bei 25 % der Gesamtmischung, wobei zwischen den Betrieben deutliche Unterschiede herrschten. Das untere Quartil lag bei 18 %, das obere Quartil bei 46 %. In der Regel wurden die eingesetzten Substrate vor oder während des Eintrags in den Fermenter aufbereitet. Bei 22 Betrieben fand eine mechanische Zerkleinerung der Feststoffe statt, wobei die Hälfte dieser Betriebe die Substrate in den Förderleitungen zerkleinerte. Homogenisiert wurden die Substrate auf 27 Betrieben, um eine gleichmässige Durchmischung von Fest- und Flüssigsubstraten zu erreichen. Dies geschah vorwiegend in der Vorgrube. Eine Hygienisierung von Substraten erfolgte lediglich auf den sechs Betrieben mit Gastroabfällen. Auf elf Betrieben wurden in der Vorgrube oder im Vorlagebehälter für Feststoffe Substrate mit Gärrest angemaischt. Eine Separierung des Gärrestes in eine feste und eine flüssige Phase wurde von der Hälfte der Betriebe durchgeführt. Biofilter wurden vorwiegend für die Reinigung der Abluft aus der Vorgrube bei einem Drittel der Betriebe eingesetzt. Auf zwei weiteren Betrieben wurde Abluft aus der Vorgrube gezielt abgeleitet.

Bei den Fermentationsparametern lagen die Unterschiede hauptsächlich bei der hydraulischen Verweilzeit des Gärsubstrates im Fermenter. Diese ist vom Fermentervolumen sowie dem Mengenverhältnis zwischen Fermenterein- und -austrag abhängig. Die meisten Biogasanlagen wurden in einem Temperaturbereich von 40 bis 49 °C gefahren. Der Fermentationsprozess wurde in der Regel einstufig geführt. Lediglich auf einem Betrieb wurde, durch eine längere Verweilzeit der Substrate in der Vorgrube, die erste Stufe des Gärprozesses, die Hydrolyse, ausserhalb des Fermenters eingeleitet. Ein Nachgärer war auf 15 Betrieben vorhanden. Ein einfaches Durchflussverfahren lag auf 23 Betrieben vor.

Die Grösse der Biogasanlagen war an der produzierten Biogasmenge sowie an der Nennleistung der Blockheizkraftwerke (BHKW) zu erkennen. Bei den Angaben zu den produzierten Biogasmengen handelte es sich zu drei Vierteln um Schätzwerte, da die Gaszähler häufig defekt waren. Der Methangehalt lag im Mittel bei 57 %, wobei auch diese Werte meist nur auf einer Schätzung der Landwirte beruhten. Gespeichert wurde das Gas bei 24 Betrieben auf dem Fermenter. Externe Gasspeicher waren auf vier Betrieben vorhanden. Die Hälfte der BHKW auf den Betrieben wurde mit einem Gasmotor betrieben. Die Spannbreite der Nennleistung der BHKW lag zwischen 12 und 526 kW.

Tabelle 10: Allgemeine Betriebsdaten bei 38 befragten Landwirten
(n = Anzahl Betriebe, KEV = Kostendeckende-Einspeisevergütung;
LW-Bonus = Landwirtschaftsbonus)

Anlagendaten					
Jahr der Inbetriebnahme [n]	bis 1989 4	1990-1999 7	2000-2010 27	keine Angaben 1	
Vergütungen der Betriebe [n]	KEV 15	LW-Bonus 11			
Gasverwertungsprinzip [n]	Strom und Wärme 35	Wärme 2	Gas-Aufbereitung 1		
Verfahrenstechnische Daten					
Co-Substratanteil [%]	Median 25	oberes Quartil 46	unteres Quartil 18		
Substrataufbereitung [n]	Mechanische Zerkleinerung 22	Mechanische Homogenisierung 27	Chemische Aufbereitung 2	Hygienisierung 6	Bio-technischer Aufschluss 3
Anmischung mit Gärrest [n]	Ja 11	Nein 27			
Separierung Gärrest [n]	Ja 19	Nein 19			
Abluftbehandlung [n]	Biofilter 10	Biowäscher 1	Abluftableitung 2		
Fermentationsparameter					
Beschickung [n]	Einfaches Durchflussverfahren 23	Kombiniertes Durchflussspeicherverfahren 15			
Temperatur Fermenter [°C] Anzahl Betriebe [n]	<40 6	40-49 29	>50 2		
Hydraulische Verweilzeit [d] Anzahl Betriebe [n]	15-25 9	26-35 19	36-45 5	>45 5	
Produktionsparameter Biogas					
Gasspeicherung Anzahl Betriebe [n]	Fermenter 24	Nachgärer 12	externer Speicher 13		
Biogasmenge [m³/a]	MW 313'073	Min. 26'000	Max. 1'000'000		
Methangehalt [Vol.-%]	MW 57	Min. 50	Max. 65	keine Angabe 9 Betriebe	
Technische Kennwerte					
Motor BHKW [n]	Zündstrahl 10	Gas 21	Totem 3	andere 2	
Nennleistung BHKW [kW _{el}] Anzahl Betriebe [n]	<50 8	50-99 11	100-200 16	>200 1	Min.-Max. 12-526

3.2.2. Substrate, Gärrest und deren Lagerung

Bei den 38 Biogasanlagen aus der Befragung kamen insgesamt 53 verschiedene Substrate zum Einsatz. Im Mittel wurden pro Betrieb acht unterschiedliche Substrate fermentiert. Dabei veränderte sich der Substrateinsatz je nach Angebot und Jahreszeit. Weiter gab es grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Betrieben. Ein Betrieb setzte ausschliesslich die hofeigene Schweinegülle ein. Andere Betriebe wiesen dagegen deutlich mehr Substrate auf. Der Betrieb mit der höchsten Substratanzahl verwendete 16 unterschiedliche Substrate. Zu den häufigsten Substraten zählten die Hofdünger Rinder-, Schweinegülle sowie Geflügel-, Rinder- und Pferdemist (Abbildung 1). Die häufigsten Co-Substrate waren Getreideabgang, Rasenschnitt, Gemüserüstabfälle, Grüngut und Glycerin. Auf keinem der Betriebe wurden

gezielt nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. In dieser Hinsicht unterscheiden sich Schweizer Biogasbetriebe von denen in Deutschland.

Bei der Lagerung der Substrate kann grundsätzlich zwischen Flüssig- und Feststoffen differenziert werden (Abbildung 1). Die flüssigen Substrate wurden häufig direkt in die Vorgrube eingetragen. Die Feststoffe dagegen lagerten nach der Anlieferung meist auf einer Betonplatte. Aus der Befragung ging hervor, dass Feststoffe teils über einen längeren Zeitraum gelagert und teils direkt nach der Anlieferung in die Vorgrube eingebracht wurden. Auf sieben Betrieben war kein separates Festsubstratlager vorhanden. Flüssigsubstrate mit hohem Gärwert wurden häufig separat gelagert. Ein Beispiel hierfür ist das Glycerin. Dabei wurde das Glycerin meist aus dem Lagertank direkt in den Fermenter gepumpt. Auf zwei Betrieben wurde es direkt in die Vorgrube eingebracht. Die Lagerung von besonders geruchsintensiven Substraten wie Pansen- oder Darminhalt, Gastroabfälle und Gewürzextrakt erfolgte nicht generell in geschlossenen Behältern.

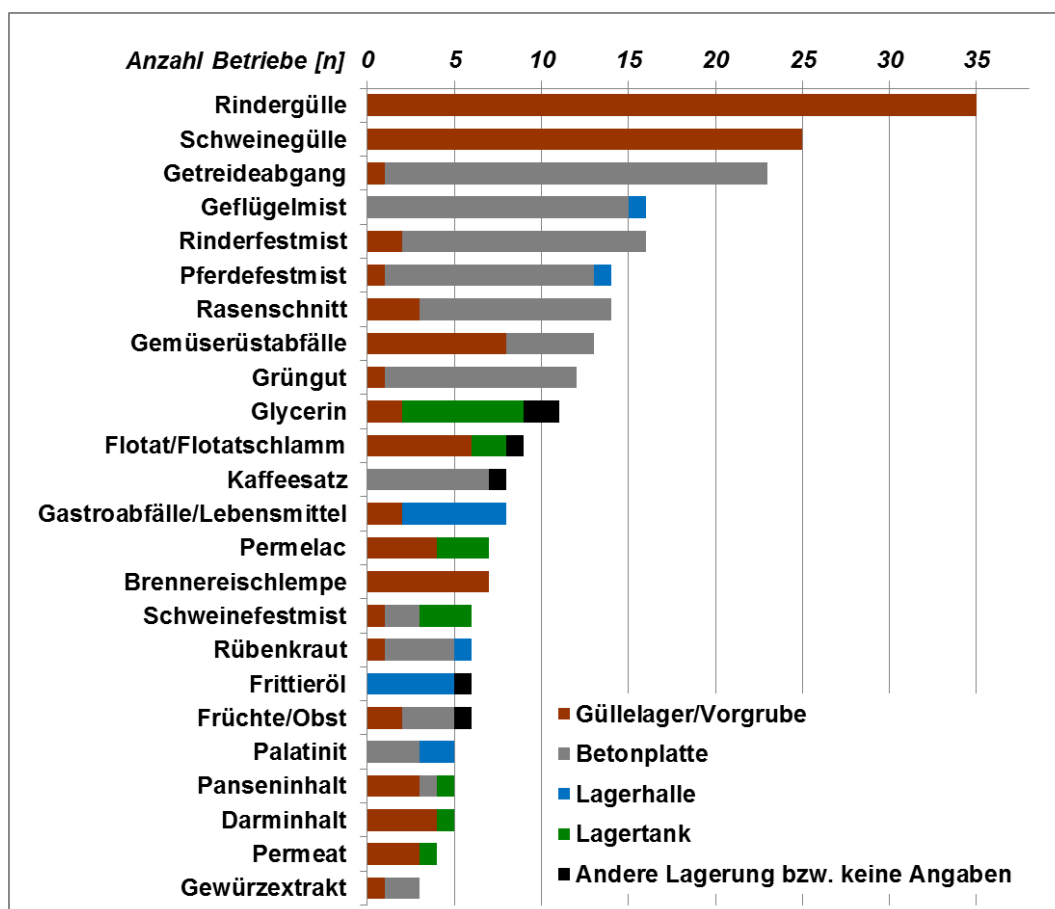


Abbildung 1: Häufigkeit einzelner Substrate auf den 38 Betrieben der Befragung rangiert nach der Häufigkeit ihres Vorkommens differenziert nach unterschiedlicher Lagerung (n = Anzahl Betriebe).

Die in Tabelle 11 aufgeführten Substratlager unterschieden sich in der Anzahl pro Betrieb sowie in der Grösse und Ausführung. Die Anzahl der einzelnen Lager auf den jeweiligen Betrieben variierte. So kamen insbesondere Gülle-, Flüssigsubstrat-, Festsubstrat- und Gärrestlager auf einigen Betrieben mehrfach vor. Die Gruben und Lager für Flüssigstoffe waren meist abgedeckt, wiesen aber Eintrags-, Entnahme- bzw. Entlüftungsöffnungen auf. Von den 29 vorhandenen Gärrestlagern (flüssig) waren zehn offen ausgeführt, während bei den Flüssigsubstratlager und der Vorgrube nur je ein bzw. zwei nicht abgedeckt waren. Die Fläche der Öffnungen war unterschiedlich gross (zwischen 0,03 und 10 m²). Die vorhandenen Festsubstrat- sowie Gärrestlager (fest) waren in der Regel offen ausgeführt. Von insgesamt 32 Festsubstratlager waren nur vier überdacht. Bei den festen Gärresten waren

elf von 16 Lagern überdacht. Bei drei Betrieben mit Gärrestseparierung war kein Lager vorhanden, da der feste Gärrest gleich nach der Separierung abtransportiert wurde. Bei 14 Betrieben mit Feststoffeintragssystem war die Hälfte abgedeckt.

Tabelle 11: Ausführung verschiedener Lager auf den 38 Betrieben (n = Anzahl)

Art und Ausführung der Lager	Gülle-lager	Flüssig-substrat-lager	Fest-substrat-lager	Misch-grube	Vor-grube	Vorlage-behälter	Gärrest-lager flüssig	Gärrest-lager fest
Betriebe x Anzahl Lager [n]	17 x 1 8 x 2 1 x 3	5 x 1 1 x 2 1 x 3	30 x 1 1 x 2 1 x 3	4 x 1 - -	38 x 1 - -	14 x 1 - -	20 x 1 8 x 2 1 x 3	17 x 1 - -
Kein Lager	12	31	7	34	-	24	9	21
Lager offen	-	1	28	-	2	7	10	5
Lager überdacht	-	-	4	-	-	7	-	11
Lager abgedeckt	26	6	-	4	36	-	19	1
– mit Öffnungen	6	5	-	3	31	-	14	-
– Fläche der Öffnungen [m ²]	1.2-6	0.05-10	-	2-4	1-7.7	-	0.03-3	-

Die genutzten Substrat- sowie Gärrestlager stellen anhaltend emittierende Geruchsquellen dar. Dabei sind sie mehrheitlich der Witterung ausgesetzt.

Aktivitäten, wie der Transport, die Anlieferung oder der Umschlag von Substraten, können weitere Einflussgrößen für eine sich ändernde Geruchsfreisetzung sein. Tabelle 12 zeigt einige dieser kurzzeitigen Aktivitäten auf. Die Vielzahl der Substrate auf den einzelnen Betrieben kann zu einer häufigeren Anlieferung und als Folge zu einem häufigeren Substrateintrag in die Lager führen. Bei Festsubstraten fand eine Zerkleinerung häufig in den Vorlagebehältern statt, welche nur in 50 % der Fälle gedeckt waren. Zur Vermeidung von Schwimmschichten sowie zur Homogenisierung des Substratgemisches wurde häufig Rühr- und Mischtechnik eingesetzt. Dabei unterschied sich die Häufigkeit und Dauer des Rührens zwischen den Betrieben ebenso wie zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten. Bei den flüssigen Gärrestlagern wurde lediglich bei Bedarf vor und während der Ausbringung gerührt. In der Vorgrube bzw. in den Flüssiglageren bilden sich durch den Eintrag von Feststoffen Schwimmschichten, daher waren hier die Rührintervalle kürzer. Bei der Separierung von flüssigem und festem Gärrest kann sich - insbesondere bei nicht vollständig vergorenem Gärsubstrat - verstärkt Geruch bilden. Hinzu kommt, dass die Separierung in den meisten Fällen im Freien erfolgte.

Weitere Geruchsbelastungen können bei einer Freisetzung von Biogas entstehen. Bei etwa der Hälfte der befragten Betriebe sprach laut Betriebsleiter das Überdruckventil etwa ein bis zweimal pro Monat an. Gründe hierfür waren meist eine Überproduktion von Gas sowie Schäden am BHKW. Probleme mit Gasverlusten durch Beschädigungen an der Gasspeicherole kam nach Aussagen der Betriebsleiter bei 25 von 38 Betrieben vor.

Tabelle 12: Kurzzeitige Aktivitäten im Biogasbetrieb (n = Anzahl Betriebe)

Kurzzeitige Aktivitäten		Ort
Substrateintrag	Verdrängungsluft: Häufigerer Eintrag bei grösserer Anzahl verschiedener Substrate	Güllelager Flüssiglager Mischgrube Vorgrube
Substrataufbereitung	Zerkleinern (n=22) Homogenisieren (n=26) Hygienisieren (n=6)	Vorgrube Futtermischwagen Vorlagesystem Feststoffe Hygienisierungstank
Rühren	Intervall (über 24 h): jede Stunde bis alle 14 d Mischdauer: zwischen 1 und 180 min	Güllelager Flüssiglager Mischgrube Vorgrube
Separierung	Schneckenpresse (n=11) anderes System (n=4)	Offen (n=4) Überdacht (n=11) Halle (n=4)
Freisetzung Biogas	Ansprechen Überdruckventil: 50 % der Betriebe: 1-2 x pro Monat 50 % der Betriebe: 2-6 x pro Jahr Beschädigte Folie: auf 25 von 38 Betrieben	Überdruckventil Beschädigte Folie

3.2.3. Tierhaltung

Von den 38 besuchten Betrieben war auf 36 Betrieben Tierhaltung vorhanden. Am häufigsten waren dabei reine Rindviehbetriebe. Auf neun Betrieben gab es Rinder- und Schweinehaltung kombiniert und fünf Betriebe hielten nur Schweine. Abbildung 2 zeigt die Betriebe hinsichtlich des Tierbestandes in Grossvieheinheiten (GVE) als Gesamtzahl der einzelnen Tierarten und -kategorien. Höhere GVE-Werte mit bis zu 250 GVE zeigten reine Schweinebetriebe sowie die Kombination von Schweine- und Rindviehhaltung. Bei der Hälfte der Betriebe lagen die Werte über 50 GVE pro Betrieb.

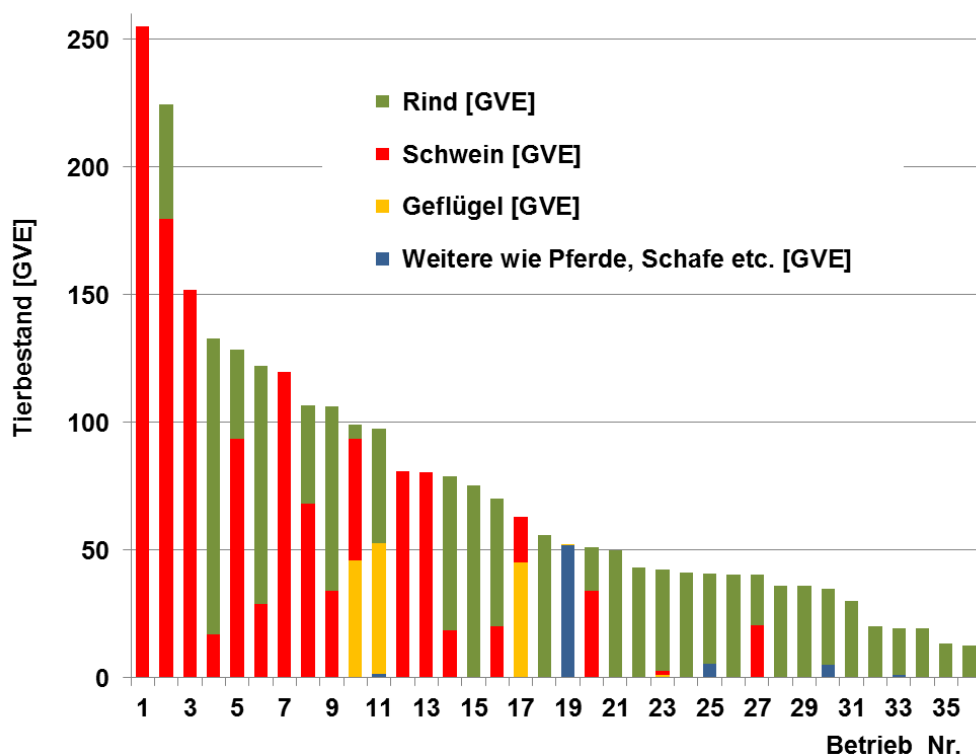


Abbildung 2: Tierbestand in Grossvieheinheiten (GVE) und Kombination von verschiedenen Tierarten der 36 Betriebe mit Tierhaltung

In der Art des Lüftungssystems unterschieden sich Rinder- und Schweineställe. Waren die Rinderställe mit einer Ausnahme alle frei gelüftet, so wurde bei den Schweineställen die Abluft in zwei Drittel der Fälle mit Zwangslüftung über Kamine abgeführt (Tabelle 13).

Bei den Rindviehställen waren bei 27 von 29 Ställen Laufhöfe vorhanden. Die Fläche der Laufhöfe war sehr unterschiedlich und betrug je nach Tierbestand zwischen 60 und 1100 m². Bei den Schweineställen hatten zwölf von 17 Betrieben einen Auslauf.

Tabelle 13: Ausführung der Ställe bei verschiedenen Tierarten

Ställe mit...	Rind	Schwein	Geflügel	Pferd
Zwangslüftung	1	12	3	0
Freie Lüftung	28	5	1	4
Laufhof/Auslauf	27	12	3	3
Total	29	17	4	4

Tabelle 14 gibt Hinweise zur Futterlagerung auf Betrieben mit Rindviehhaltung als weitere mögliche Geruchsquelle. Mais- bzw. Grassilage wurde auf 17 bzw. 20 Betrieben mit Rinderhaltung verfüttert. Die Silage wurde dabei lediglich auf einem Betrieb im Flachsilo gelagert. Auf den anderen Betrieben waren Siloballen vorhanden. Hochsilos kamen insgesamt viermal vor.

Tabelle 14: Futterkomponenten und Lagerung auf Rinderbetrieben

Futterkomponenten	[n]	Lagerung Futter	[n]
Grassilage	20	Siloballen	17
Maissilage	17	Hochsilos	4
Heu	13	Flachsilo	1
Gras	7	Heulager	13
Zuckerrübenschnitzel	2		

3.2.4. Standorte der Betriebe und Erfahrungen der Landwirte mit der Geruchsthematik

Abbildung 3 zeigt die Betriebe mit Biogasanlagen rangiert nach dem Abstand zur nächsten Wohn- bzw. Dorfzone ausgehend von den Betriebsgebäuden. Weiter ist der Abstand zum nächsten Wohngebäude, zur nächsten Wohn- und Gewerbezone bzw. Mischzone oder Weilerzone dargestellt. Die Betriebe lagen meist in der Landwirtschaftszone. Drei der Betriebe befanden sich in einer Weilerzone. Über die Hälfte der Betriebe waren weniger als 500 m von der nächsten Wohnzone entfernt. Bei grossen Abständen zur Wohnzone lagen häufig noch weitere Landwirtschaftsbetriebe oder Wohngebäude zwischen dem Biogasbetrieb und der Wohnzone. Der Abstand zu den nächsten betriebsfremden Wohngebäuden betrug bei allen Betrieben weniger als 400 m.

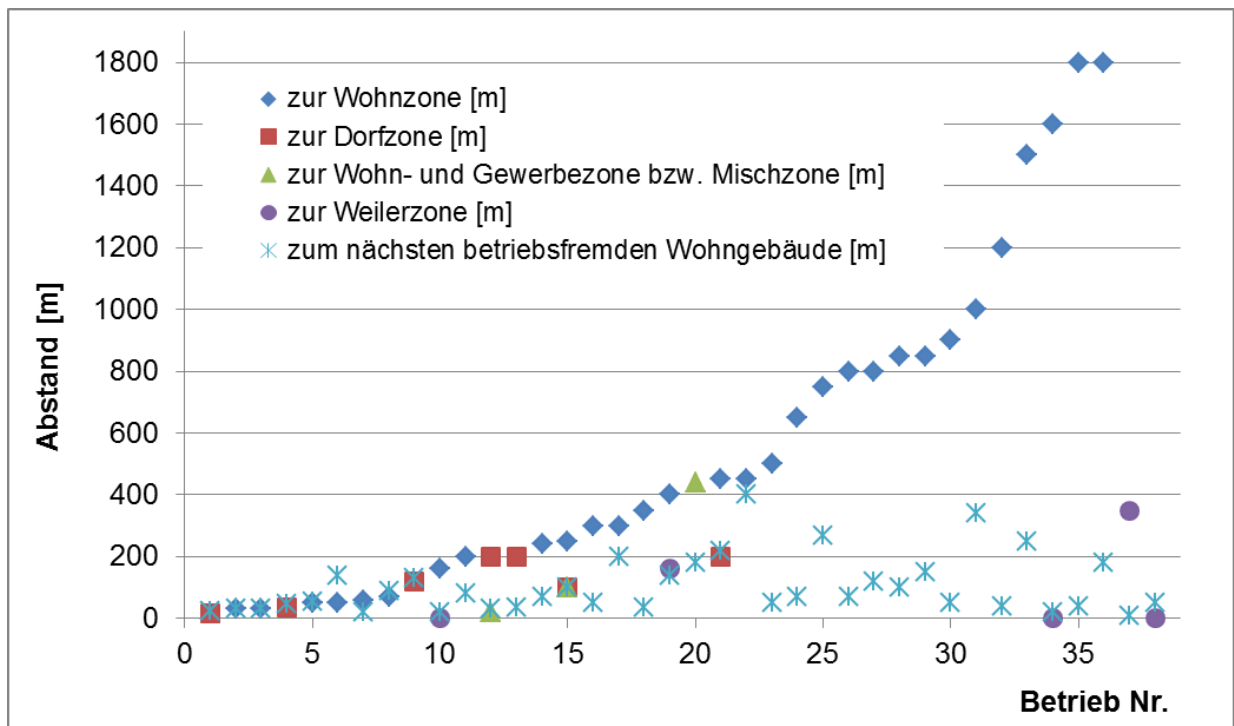


Abbildung 3: Abstand [m] der einzelnen Betriebe zur nächsten Wohn-, Dorf-, Wohn- und Gewerbe- bzw. Mischzone sowie zum nächsten betriebsfremden Wohngebäude

Erfahrungen mit Geruchsproblemen wurden von neun Betriebsleitern angeführt. Zum Teil gab oder gibt es Beschwerden nicht nur von angrenzenden Wohn- oder Dorfzonen, sondern auch von Bewohnern einzelner betriebsfremder Wohngebäude, da diese meist sehr nahe bei den Betrieben mit Biogasanlagen waren. Bei Beschwerden betrugen die Abstände zu den Dorf- oder Wohnzonen weniger als 200 m bzw. in zwei Fällen sogar 450 bzw. 600 m. Ein Anlagenbetreiber erhielt anonyme Beschwerdemeldungen. Teils wurden aufgrund der Beschwerden Massnahmen zur Geruchsminderung umgesetzt (z.B. Einschränkungen bei der Substratwahl, Reparatur bzw. Wechsel der Gasspeichermembran). In zwei Fällen war die Umsetzung von Minderungsmaßnahmen (Biofilter bei Vorgrube, Abdeckung des Gärrestlagers) Auflage für einen Weiterbetrieb der Anlage, weil Geruchsklagen vorlagen.

Auf 13 Betrieben gab es Abluftreinigungssysteme (Tabelle 15). Auf zehn Betrieben kamen Biofilter meist im Bereich der Vorgrube zum Einsatz. Die Hälfte der Betriebe hatte diese im Eigenbau ausgeführt. Ein Betrieb reinigte die Abluft aus dem Vorlagebehälter mit einem Biowäscher. Eine gezielte Ableitung der Abluft über Rohre erfolgte auf zwei Betrieben. Auf einem der Betriebe wurde die Abluft bodennah am Rand des Betriebes in Richtung Wald abgeleitet, auf dem anderen Betrieb wurde die Abluft in einer Höhe von 20 m über der Halle mit dem Vorlagesystem ausgelassen. Weitere zwei Betriebe errichteten eine Umwandlung um die Vorgrube. Einzelne Betriebsleitende vermeiden inzwischen den Einsatz besonders geruchsintensiver Substrate.

Tabelle 15: Abluftreinigungsverfahren (n = Anzahl Betriebe)

Abluftreinigung	[n]	Materialien	Erfasste Abluft	Hersteller
Biofilter	10	Holzschnitzel, Torf, Heidekraut, Heublumen, Stroh, Kokosmatten, Kombination von Materialien	Vorgrube (n=8) Flüssiglager (n=3) Vorlagebehälter (n=1) Gärrest (n=2)	Eigenbau (n=5) Bill (n=3) Hungerbühler (n=1) Keine Angabe (n=1)
Biowäscher	1	Wasser Mikroorganismen Füllkörper	Gasaufbereitung Vorlagebehälter	Keine Angabe
Abluftableitung	2	-	Vorgrube	Eigenbau

3.3. Folgerungen

Die untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Schweiz wiesen grosse Unterschiede hinsichtlich Anlagen- und Verfahrenstechnik sowie bezüglich der Anlagengrösse, des Biogasprozesses, der Leistung und Managementaspekten auf. Weiter ist die Vielfalt der verwendeten Substrate sehr gross. Der Substrateinsatz verändert sich je nach Angebot und Jahreszeit. Zudem gibt es grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Betrieben. Auf keinem der Betriebe wurden gezielt nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. In dieser Hinsicht unterscheiden sich Schweizer Biogasbetriebe von denen in Deutschland. Kategorien typischer Biogasbetriebe der Schweiz liessen sich aufgrund der grossen Heterogenität unter anderem hinsichtlich Grösse, baulichen und verfahrenstechnischen Bedingungen sowie Substraten nicht ableiten. Die Unterschiede zwischen den Betrieben haben zur Folge, dass bei detaillierten Geruchserhebungen für eine aussagekräftige Datengrundlage eine grössere Anzahl von Betrieben notwendig ist.

Bei nahezu allen befragten Betrieben war zusätzlich zur Biogasanlage Tierhaltung vorhanden. Darüber hinaus gab es bei einigen Betrieben weitere Tierhaltung in unmittelbarer Nachbarschaft. Weiter können die Systemgrenzen zwischen Tierhaltung und Biogasanlage insbesondere bei Futter- und Hofdüngerlagerung nicht einheitlich voneinander abgegrenzt werden.

Biogasanlagen in der Nähe zur Wohnbebauung können eine Geruchsbelästigung der Anwohner und Anwohnerinnen mit sich bringen. Der geringe Abstand eines Grossteils der Biogasanlagen in der Befragung zu Wohnzonen und besonders zu bewohnten Gebäuden unterstreicht die Notwendigkeit einer fundierten Datengrundlage für die Planung und den Betrieb von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Weiter sind Massnahmen zur Minderung von Gerüchen aus Biogasanlagen nötig.

4. Geruchsstoffkonzentration von Einzelquellen landwirtschaftlicher Betriebe mit Biogasanlagen

Um die Quellstärke der relevanten Flächenquellen von Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu bestimmen, wurden auf acht Betrieben Geruchsstoffkonzentrationen von Flächenquellen aus den Bereichen Tierhaltung und Biogas erhoben. Die Untersuchungen erfolgten im Zeitraum von Mai 2011 bis September 2012 während der Sommer- und Übergangszeit. Die Flächenquellen wurden jeweils im Ruhezustand beprobt. An den Erhebungsterminen wurden zusätzlich Geruchsfahnenbegehungen mit Testpersonen durchgeführt (siehe Kapitel 6).

In diesem Kapitel sind die Geruchsstoffkonzentrationen der einzelnen Geruchsquellen auf landwirtschaftlichen Betrieben in den Bereichen Tierhaltung und Biogasanlage beschrieben. Zunächst ist das Vorgehen bei der Probenahme und der Erfassung der beschreibenden Parameter sowie der Ermittlung der Geruchsstoffkonzentrationen aufgezeigt. Anschliessend sind Ergebnisse dargestellt und daraus Folgerungen abgeleitet.

4.1. Vorgehen

4.1.1. Betriebsübersicht

Für die Erhebung wurden acht landwirtschaftliche Biogasanlagen ausgewählt. Ein Hauptkriterium der Betriebsauswahl war die Begehrbarkeit der Umgebung der Betriebsstandorte für Geruchsfahnenbegehungen mit Testpersonen (siehe Kapitel 6). Die Tierhaltung der acht Betriebe mit den wichtigsten Tierkategorien, Angaben zu den Haltungsverfahren und Bestandesgrössen ist aus Tabelle 16 ersichtlich. Auf allen Betrieben wurde Rindvieh gehalten. Davon hielten sechs Betriebe Milchvieh, teils mit oder ohne Jungviehaufzucht und Kälbermast, zwei weitere hatten Mutterkühe und einer Mastmunis. Mastschweine und Mastpoulets gehörten darüber hinaus auf jeweils einem Betrieb zum Tierbestand. Der Betrieb mit Pouletmast, Mutterkuhhaltung und Biogasanlage (Betrieb Ia) befand sich in direkter Nachbarschaft zu einem Milchviehbetrieb (Betrieb Ib). Da sich deren Geruchsfahnen überlagern, wurden diese Betriebe als ein Gesamtbetrieb behandelt.

Angaben zur baulich-technischen Ausführung der Biogasanlagen der Erhebungsbetriebe sind in Tabelle 17 aufgeführt. Neben dem Baujahr der Anlage sind Bauweise, das Material, die Grösse und Art der Abdeckung der wichtigsten Elemente wie Lager, Fermenter und Nachgärer dargestellt. Nicht angeführt sind nur zeitweise genutzte Elemente wie beispielsweise Notgasspeicher. Das Festsubstrat lagerte bei allen Betrieben auf einer Betonplatte und war bei einem Teil der Betriebe überdacht. Die Güllelagerung erfolgte auf den Betrieben A, B, C, D, F und I unterirdisch. Auf den Betrieben G und H war kein separates Güllelager vorhanden, die Gülle wurde direkt in die Vorgrube eingetragen. Die Fermenter waren mit Ausnahme von Betrieb G oberirdisch errichtet und mit einer Stahlbetondecke (A, B, D, G) oder Doppelmembran-Folie (C, F, H, I) versehen. Ein Nachgärer war auf den Betrieben A, D und H vorhanden. Eine Separierung des Gärrestes wurde auf den Betrieben F, G und I vorgenommen. Betrieb G pelletierte den separierten festen Gärrest zusätzlich.

Tabelle 16: Übersicht der Betriebe mit Angaben zu den wichtigsten Tierkategorien: Anzahl Tiere nach Termin, Haltungsform, Ausführung der Stallbereiche und Lüftung. (LB = Liegeboxen; n.v. = nicht vorhanden; perf. = perforiert; planb. = planbefestigt)

Betrieb	Tierart und -kategorie	Anzahl Tiere [n] nach Erhebungsterminen				Haltungsform	Anordnung und Ausführung von Laufhof/Auslauf/ Wintergarten	Lüftung
		1	2	3	4			
A	Milchvieh	61	65	64	-	LB: Stroh/Komfortmatten; Laufgänge: planb./perf.	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Jungvieh	12	31	29	-	Tiefstreu / LB: Stroh; Laufgänge perf.	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Mastkälber	0	18	13	-	Tiefstreu	n.v.	frei
B	Mastmunis	100	79	79	-	Tretmist; Fressbereich perf.	Laufhof integriert, planb.	frei
	Jungvieh	20	12	12	-	Tretmist; Fressbereich planb.	n.v.	frei
	Kälber	0	20	20	-	Tiefstreu	n.v.	frei
C	Milchvieh	70	70	71	-	LB: Strohhäcksels; Laufgänge planb.	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Kälber	0	6	0	-	Tiefstreu	n.v.	frei
	Mastkälber	0	35	24	-	Tiefstreu	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Mastschweine	200	184	130	-	Mehrflächenbucht: eingestreut; planb./perf.	Auslauf am Rand planb./perf.	Zwangslüftung
D	Milchvieh	30	32	26	26	LB: Stroh und Gärrest; Laufgänge planb.	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Kälber	1	5	1	4	Tiefstreu	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Schafe	0	5	0	0	Tiefstreu	Laufhof am Rand, planb.	frei
F	Milchvieh	27	28	26	27	LB: Stroh und Gärrest; Laufgänge planb./perf.	Laufhof integriert, planb.	frei
	Jungvieh	13	15	3	13	Tiefstreu; Fressbereich perf.	n.v.	frei
	Kälber	0	0	17	0	Tiefstreu; Fressbereich perf.	n.v.	frei
G	Mutterkühe	37	41	43	-	LB: Stroh; Laufgänge planb.	Laufhof integriert, planb.	frei
	Kälber	25	27	31	-	Kälberschlupf Tiefstreu; Laufgänge planb.	Laufhof integriert, planb.	frei
H	Milchvieh	38	36	36	-	LB: Stroh; Laufflächen planb./perf.	Laufhof integriert, planb./perf.	frei
	Mastkälber	4	6	3	-	Tiefstreu	Laufhof am Rand, planb.	frei
	Kälber	3	1	2	-	Tiefstreu	n.v.	frei
la	Mutterkühe	27	27	-	-	LB: Stroh	Laufhof integriert, planb.	frei
	Kälber	24	26	-	-	Kälberschlupf: Tiefstreu	Laufhof integriert, planb.	frei
	Mastpoulets	9100	12800	-	-	Bodenhaltung eingestreut	Wintergarten eingestreut	Zwangslüftung
lb	Milchvieh	39	39	-	-	LB: Stroh; Laufgänge planb.	Laufhof am Rand, planb.	frei

Tabelle 17: Übersicht über die baulichen Bestandteile der Biogasanlagen und deren Ausführung auf den Erhebungsbetrieben
(Anz. = Anzahl; n.v. = nicht vorhanden)

Betrieb	A	B	C	D	F	G	H	Ia
Baujahr Biogasanlage	2008	1995	2006	2008	2006	2005	2000	2006
Festsubstratlager ausgeführt als Betonplatte(n)								
Anz. Seitenwände [n]	1	1	3/ 2	3	3/ 1	1	1	3
Abdeckung	offen	offen	Dach/ offen	Dach	Dach/ offen	offen	offen	Dach
Güllelager								
Bauweise	unterirdisch	unter Stall	unter Schweinestall	unter Stall	unterirdisch	n.v., direkt in Vorgrube	n.v., direkt in Vorgrube	unter Stall
Material	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton			Beton
Abdeckung	offen	Spaltenboden	Spaltenboden	Betondecke	Betondecke, Spaltenboden			Betondecke
Fermenter ausgeführt als Betonbehälter								
Bauweise	oberirdisch	oberirdisch	oberirdisch	oberirdisch	oberirdisch	unterirdisch	oberirdisch	oberirdisch
Material	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton
Volumen [m³]	850	280	730	700	490	1000	300	800
Abdeckung	Betondecke	Betondecke	Doppel- membran	Betondecke	Doppelmembran	Betondecke	Doppelmembran	Doppelmembran
Nachgärer ausgeführt als Betonbehälter								
Bauweise	oberirdisch	n.v.	n.v.	oberirdisch	n.v.	n.v.	unterirdisch	n.v.
Volumen [m³]	1200			1400			250	
Abdeckung	Doppelmembran			Doppelmembran			Betondecke	
Besonderheiten	keine			keine			beheizt	
Gärrest-Separierung	nein	nein	nein	ja, teils	ja	ja	nein	nein
Gärrestlager (flüssig) ausgeführt als Betonbehälter								
Bauweise	oberirdisch	unterirdisch	unter Stall	n.v. Bodenleitung zu abnehmenden Betrieben	unterirdisch	unterirdisch	unter Laufhof	unterirdisch
Volumen [m³]	2 x 440	750	2 x 400		400	1050	650	300
Abdeckung	offen	Betondecke	Betondecke		Betondecke	Betondecke	Betondecke, Spaltenboden	Betondecke
Gärrestlager (fest) ausgeführt als Betonplatte								
Anz. Seitenwände [n]	n.v.	n.v.	n.v.	3	1	3	n.v.	n.v.
Abdeckung				Dach	Dach	Dach		
Besonderheiten				keine	keine	Pelletierung		

4.1.2. Ablauf der Erhebungen

Abbildung 4 zeigt schematisch den Tagesablauf bei der Erhebung von Geruchsstoffkonzentrationen und beschreibender Parameter. Bei einem Rundgang auf dem Betrieb wurden am Vormittag zunächst Orte und Dauer für die Probenahme festgelegt. Beprobt wurden passive Flächenquellen wie Futter-, Lauf- und Liegeflächen im Tierbereich, Festmistlager sowie Substrat- und Gärrestlager (fest) der Biogasanlage. Möglichst zeitnah zur Probenahme erfolgte die Erhebung von beschreibenden Parametern. Am späten Nachmittag oder abends wurde im Labor am Olfaktometer mit Testpersonen die Geruchsstoffkonzentration bestimmt.

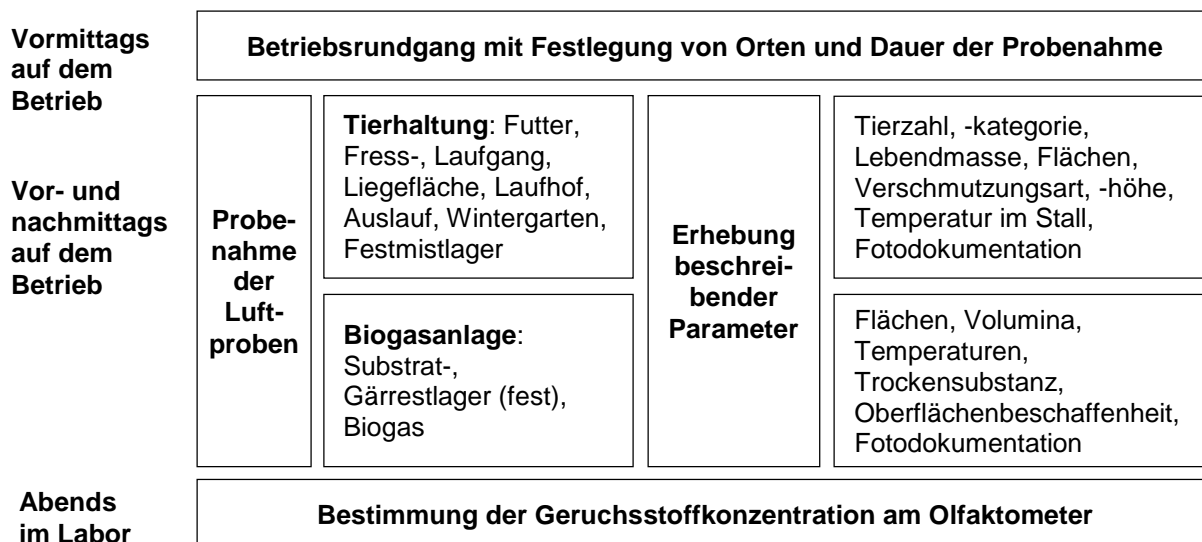


Abbildung 4: Übersicht über den Tagesablauf der Erhebung und der Analytik von Geruchsstoffkonzentrationen sowie beschreibender Parameter.

4.1.3. Beschreibende Parameter

Eine Vielfalt beschreibender Parameter diente zur Dokumentation der jeweiligen Betriebs-situation und als potenzielle Einflussgrößen auf die Geruchsstoffkonzentration bzw. Geruchsintensität.

Im Tierbereich wurden mittels eines Bonitierungsschemas die Art und Anteile der verschmutzten Lauf- und Liegeflächen geschätzt, die Verschmutzungshöhe festgehalten sowie Art, Kategorie und Anzahl der Tiere und deren Lebendmasse erhoben. Des Weiteren wurde die Temperatur der Stallluft und der Oberflächen mit Thermoelementen von Fluke 50S (Everett, USA) erfasst und in der Einstreu von Liegeflächen (Tiefstreu, Tretmist) mit einem Einstechfühler die Temperatur 20 cm unter der Oberfläche. Anhand der Fotodokumentation der einzelnen Probenahmeorte konnte nachträglich die Verschmutzung der Flächen im Aufenthaltsbereich der Tiere differenziert nach Feuchtigkeit und dem Anteil an Exkrementen in folgende sechs Kategorien eingeteilt werden: trocken wenig, trocken viel, feucht wenig, feucht viel, nass wenig, nass viel.

Die einzelnen Volumenquellen (Futter, Festmistlager, Festsubstrate, fester Gärrest) wurden mit einem Lasermessgerät DISTO A6, Leica Geosystems AG (Heerbrugg, CH) vermessen, um neben der Grundfläche das Volumen sowie die emittierenden Oberflächen zu berechnen. Die Temperaturen der Umgebungsluft und 20 cm unter der Oberfläche wurden erfasst. Weiter wurden der Zustand (trocken, feucht, frisch, verrottet) und bei Mischungen die einzelnen Bestandteile beschrieben sowie die Anteile der jeweiligen Bestandteile geschätzt. Von jedem Substrat wurde zusätzlich eine Sammelprobe entnommen und im Labor der Trockensubstanzgehalt bestimmt. Wenn möglich, wurde auch das Alter der aktuell vorhandenen Substrate erfragt oder geschätzt. Weiter wurde bei allen emittierenden Oberflächen die Exposition (z.B. offen, überdacht, in geschlossenem Gebäude, im Schatten, besonnt) erfasst.

4.1.4. Probenahme

Ziel bei der Probenahme war es, eine möglichst repräsentative Luftprobe der jeweiligen Flächenquelle im Bereich Tierhaltung und Biogasanlage zu erhalten. Bei homogenen Flächen wurden Einzelproben von 10 min oder 30 min Dauer genommen, bei heterogenen Flächen Mischproben von zweimal 15 min oder dreimal 10 min Dauer durch Umsetzen der Probenahmehaube.

Die Probenahme erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 13725 (2003) und die VDI-Richtlinie 3880 (2011) mit einer belüfteten Probenahmehaube EVH (Grundfläche 1030 mm x 530 mm), ECOMA GmbH, Honigsee, D, für Passivquellen mit vorgeschaltetem Aktivkohlefilter und einem Probenehmer Typ CSD 30, ECOMA GmbH, Honigsee, D (Abbildung 5). Verwendet wurden Probenahmebeutel aus Nalophan (PET) mit einem Volumen von rund 8 l. Um die Stabilität der Probe zu gewährleisten und den Gasaustausch mit der Aussenluft zu verhindern, wurden die Probenahmebeutel jeweils in einem zweiten Beutel gleichen Materials verschlossen (Bag-in-Bag-System).



Abbildung 5: Belüftete Probenahmehaube mit Probenehmer und Probenahmebeutel aus Nalophan auf Substrat aufgesetzt.

Zusätzlich zu den Flächenquellen wurden bei den Betrieben D, G und H sowie in einer Versuchsbiogasanlage (nachfolgend bezeichnet als Betrieb J) direkt mit Überdruck Probenahmebeutel mit Biogas befüllt und nach Vorverdünnung die Geruchsstoffkonzentration ermittelt.

4.1.5. Olfaktometrie

Die Geruchsproben wurden innerhalb von zwei bis maximal neun Stunden am Olfaktometer TO8, ECOMA GmbH, Honigsee, D, von jeweils vier Testpersonen in Anlehnung an DIN EN 13725 (2003) bewertet (Abbildung 6). Zur Ermittlung der Geruchsstoffkonzentration werden die Proben den Testpersonen nach dem Ja/Nein-Modus jeweils in aufsteigender Konzentration durch Verdünnung mit Neutralluft dargeboten. Als Messeinheit für die Geruchsstoffkonzentration dient die Europäische Geruchseinheit pro Kubikmeter [GE/m³]. Die Testpersonen erfüllten die Anforderungen nach DIN EN 13725 (2003) in Bezug auf Genauigkeit und Wiederholpräzision gegenüber dem Referenzgeruchsstoff n-Butanol (184.5 bzw. 59.7 ppm). Die Anforderungen an die Testpersonen nach DIN EN 13725 (2003) sind in Tabelle 20 (Anhang) dargestellt.



Abbildung 6: Darbietung der Geruchsproben am Olfaktometer TO8 und Bewertung durch vier Testpersonen.

4.2. Ergebnisse

4.2.1. Beschreibende Parameter

Die Lufttemperatur betrug während der Probenahme zwischen 8 und 39 °C. Zwischen der Luft- und Oberflächentemperatur der Flächen im Bereich Tierhaltung zeigte sich ein Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmass von 0.79. Die Temperatur 20 cm unter der Oberfläche von Tiefstreu, Festmist, Substraten und Gärrest lag zum Teil deutlich höher als die Lufttemperatur, im Maximum bei 73 °C.

Abbildung 7 zeigt die emittierenden Oberflächen auf den Betrieben an den jeweiligen Erhebungsterminen. Der Betrieb mit der grössten Gesamtfläche ist Betrieb I mit Mutterkühen und Pouletmast sowie Milchviehhaltung des Nachbarbetriebs. Der Betrieb mit der kleinsten Fläche ist Betrieb D mit Milchviehhaltung. Der Bereich Tierhaltung nimmt mit Ausnahme von Betrieb F auf allen Betrieben den grössten Anteil an der Gesamtfläche ein.

Unterschiede in der Grösse der emittierenden Oberfläche der Substratlager sind sowohl zwischen den Betrieben als auch zwischen den Erhebungsterminen erkennbar. Auf Betrieb D beispielsweise war die Substratoberfläche am ersten Termin deutlich höher als an den drei Folgeterminen. Die Betriebe B und H lagerten am wenigsten Substrat. Die grössten Flächen an Substrat befanden sich auf Betrieb F, gefolgt von Betrieb G. Auf den Betrieben F und G ist zusätzlich eine relevante Fläche an festem Gärrest erkennbar. Bei Betrieb I wurde die Luft aus der Vorgrube über einen Biofilter geleitet.

Die Betriebe wiesen eine grosse Vielfalt und Heterogenität an Substraten auf. An allen Erhebungsterminen war Rindergülle vorhanden. Weiter kamen die Substrate Festmist von Rindvieh, Pferden und Geflügel sowie Getreideabgang, Rasen-, Strauch- und Wiesenschnitt, Gemüserüstabfälle sowie Kartoffeln häufig vor. Vereinzelt waren Zuckerrübenschnitzel, Zwiebeln, Kräuterextrakt, Maltodextrin, Trester, Weinhefe und Fleischsuppe anzutreffen.

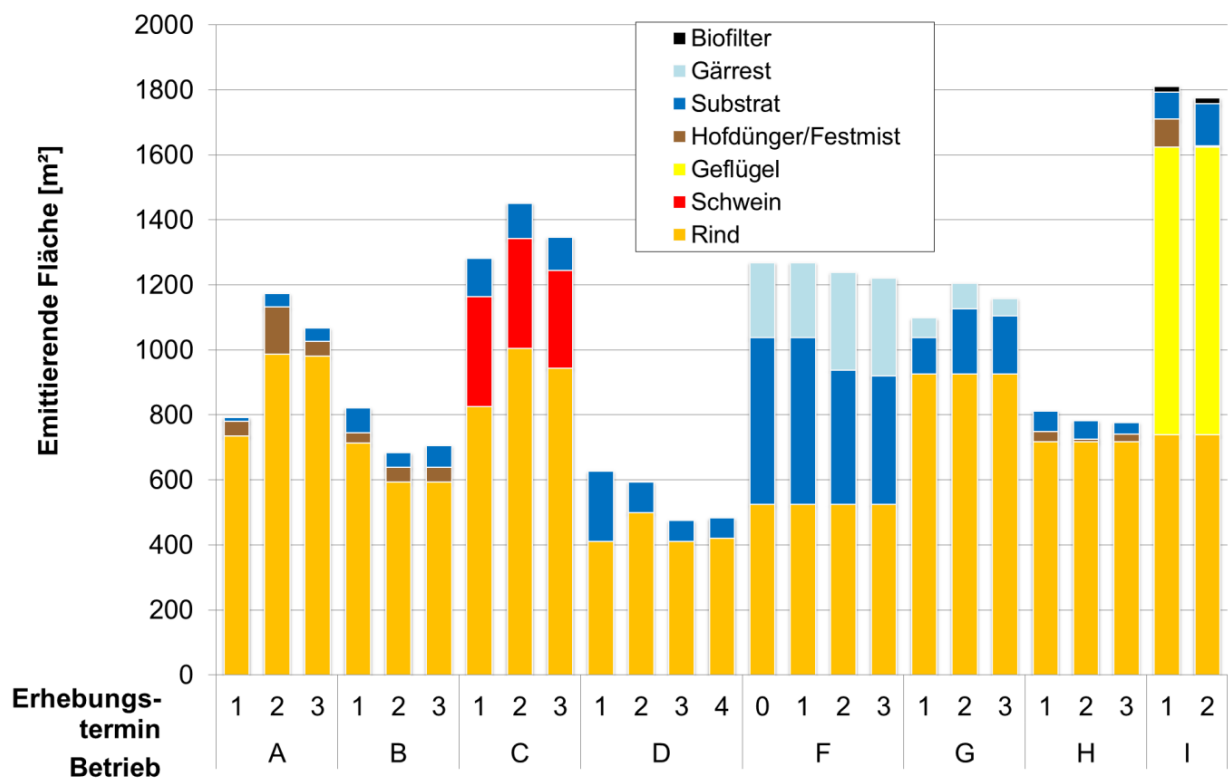


Abbildung 7: Emittierende Fläche [m²] der acht Betriebe aus der Erhebung differenziert nach Biofilter, Gärrest-, Substrat- und Festmistlager sowie den Tierkategorien Geflügel, Schwein und Rind.

4.2.2. Geruchsstoffkonzentration

Im Folgenden sind die Geruchsstoffkonzentrationen der Erhebungen aus den Bereichen Tierhaltung und Biogasanlage der acht landwirtschaftlichen Betriebe als Einzelwerte (●) und als Median (—) dargestellt. Zusätzlich ist der Erhebungsumfang mit der Anzahl der Einzelwerte (n) angegeben. Um die grosse Vielfalt der verwendeten Substrate und Substratkombinationen abzudecken, sind auch die Werte einzelner Substrat-Proben abgebildet. Da es sich dabei um Einzelwerte handelt, können diese nicht verallgemeinert werden.

Abbildung 8 zeigt die Geruchsstoffkonzentration aus den Bereichen Tieraufenthalt aller Rinderkategorien differenziert nach Laufbereich planbefestigt, Laufbereich perforiert, Liegeboxen und Tretmist/Tiefstreu. Zum Laufbereich zählten jeweils Proben aus den Laufgängen im Stall (Fress- und Liegegang sowie Kombinationen) und aus dem Laufhof. Die Geruchsstoffkonzentration der planbefestigten Laufbereiche lag im Median bei 966 GE/m³ (MW 1503 GE/m³) und somit deutlich über dem Median der perforierten Laufflächen mit 333 GE/m³ (MW 759 GE/m³). Bei den Liegeboxen wurden sowohl Stroh-Mist-Matratzen als auch Tiefboxen mit Gärrest und Kombinationen mit Stroh und Gärrest zusammengefasst. Der Median der Liegeboxen lag mit 152 GE/m³ etwas unter dem von Liegeflächen mit Tretmist/Tiefstreu mit 220 GE/m³. Bei den Proben des vorgelegten Futters war die Geruchsstoffkonzentration der Mischration (Mais- und Grassilage) mit 1121 GE/m³ (MW 1825 GE/m³) deutlich höher als Zuckerrübenschnitzel mit 610 GE/m³ und Heu mit 410 GE/m³. Die Streuung innerhalb der Kategorien war mit Ausnahme der Daten von Liegeboxen und Heu sehr gross. Im planbefestigten Laufbereich beispielsweise erreichten Einzelwerte bis zu 5800 GE/m³, während der Median bei 970 GE/m³ und der Mittelwert bei 1500 GE/m³ lag. Dementsprechend war der Mittelwert jeweils deutlich höher als der Median.

Aufgrund der geringen Anzahl an Proben (n < 3) sind die Aufenthaltsbereiche bei Schweinen und Geflügel nicht dargestellt.

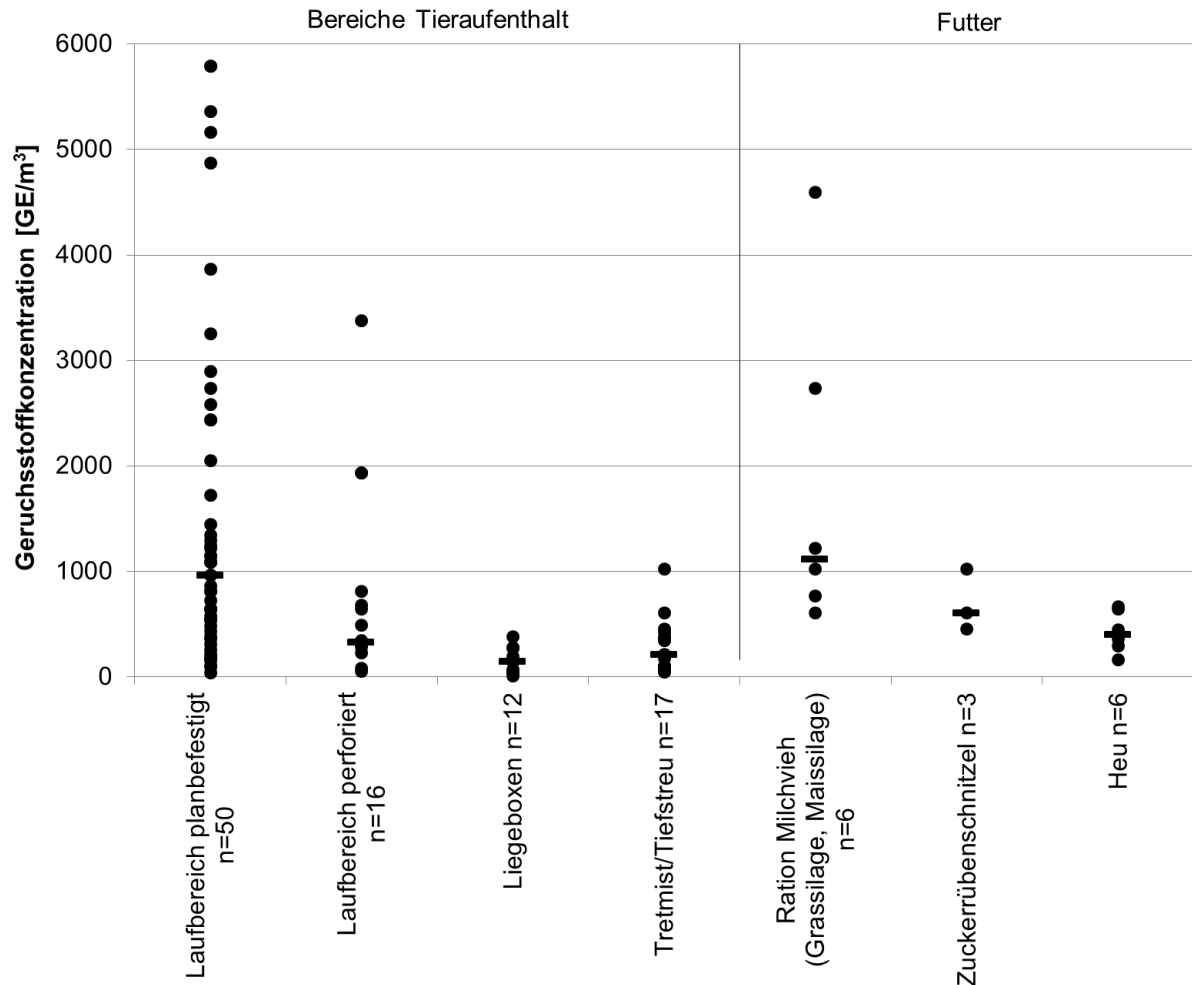


Abbildung 8: Geruchsstoffkonzentration [GE/m³] differenziert nach den Bereichen Tieraufenthalt Rind sowie Futter mit Ration Milchvieh, Zuckerrübenschnitzel und Heu dargestellt als Einzelwerte (•) und Median (—).

Die Geruchsstoffkonzentrationen von Festmist einzelner Tierarten sowie von Mischungen verschiedener Tierarten bzw. Kombinationen mit weiteren Substraten sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Geruchsstoffkonzentration von Geflügelfestmist lag mit Werten zwischen 2734 und 24 548 GE/m³ deutlich über dem Bereich von Rinderfestmist (Median 684 GE/m³; MW 2496 GE/m³) sowie dem von Pferdefestmist (Median 992 GE/m³, MW 1871 GE/m³). Auch die Geruchsstoffkonzentration von Kombinationen mit Geflügelfestmist und weiteren Substraten war gegenüber Kombinationen mit Rinder- bzw. Pferdefestmist tendenziell erhöht. Eine Ausnahme bildete eine Einzelprobe Rinderfestmist kombiniert mit Kartoffeln mit einer sehr hohen Geruchsstoffkonzentration von über 32 700 GE/m³. Eine Mischung mit Getreideabgang führte sowohl bei Geflügelfestmist als auch bei Pferdefestmist zu einer Verringerung der Geruchsstoffkonzentration gegenüber des reinen Festmists.

Innerhalb der einzelnen Kategorien ist eine Streuung der Werte erkennbar. Insbesondere bei Kategorien mit einer vergleichsweise grossen Anzahl an Proben fallen einzelne sehr hohe Werte auf. So lagen die Maxima der Geruchsstoffkonzentration bei Festmist aus der Rindviehhaltung um das Fünfzehnfache und bei Festmist aus der Pferdehaltung um das Siebenfache höher als der jeweilige Median.

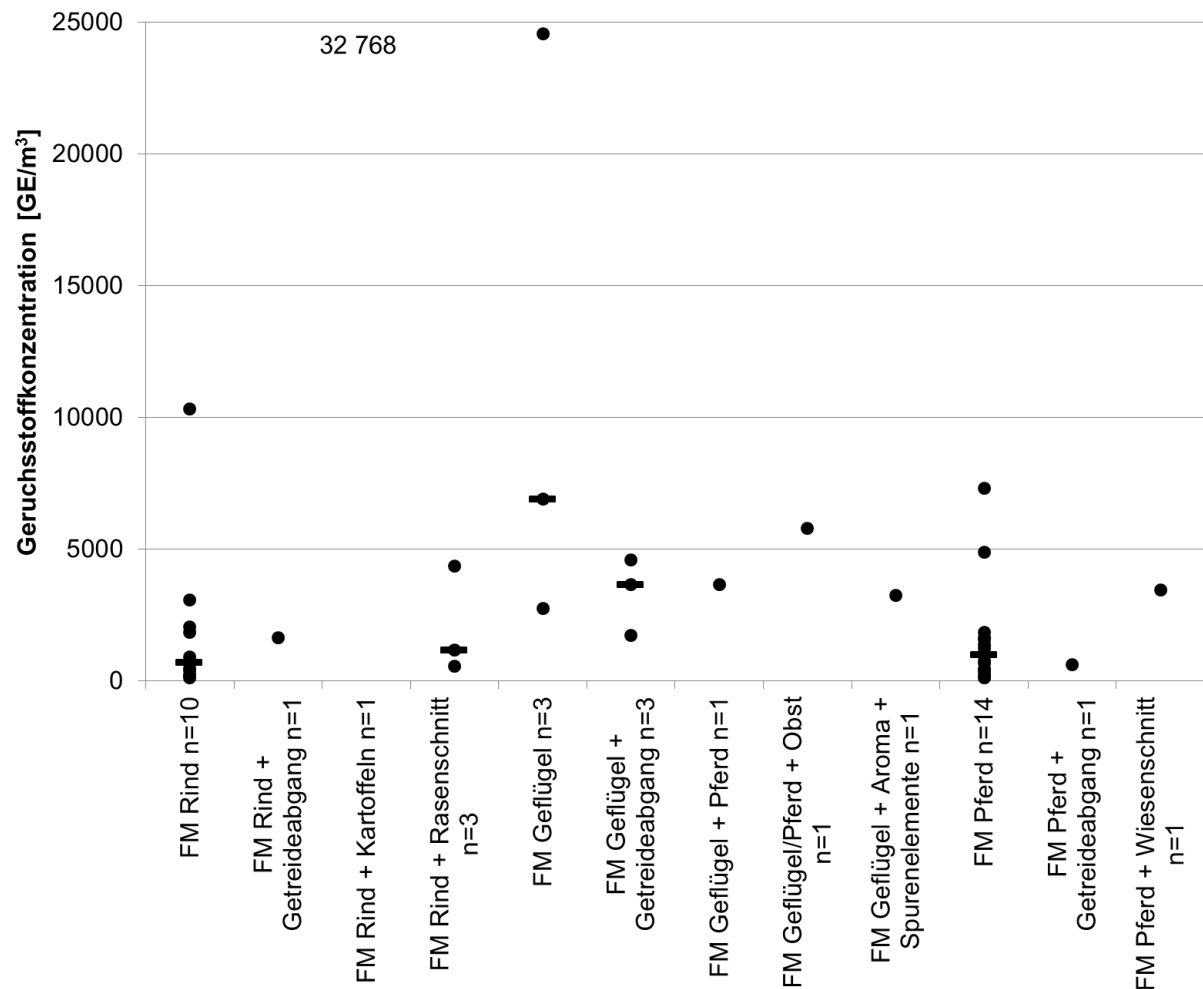


Abbildung 9: Geruchsstoffkonzentration [GE/m³] von Festmist (FM) je nach Tierart sowie Kombinationen mit weiteren Substraten dargestellt als Einzelwerte (●) und Median (—).

Abbildung 10 zeigt die Geruchsstoffkonzentration der Substrate Getreideabgang, Heu, Rasen-, Wiesen-, Strauchschnitt sowie Kompost, Gärrest und Kombinationen. Der Median der Geruchsstoffkonzentration von Rasenschnitt lag mit 2433 GE/m³ (MW 5462 GE/m³) nur etwas höher als der von Wiesenschnitt mit 2178 GE/m³ (MW 3549 GE/m³), jedoch deutlich über dem von Gärrest mit 798 GE/m³ (MW 3324 GE/m³) und dem von Getreideabgang mit 251 GE/m³ (MW 398 GE/m³). Während bei Rasen-, Wiesenschnitt und Gärrest einzelne sehr hohe Geruchsstoffkonzentrationen resultierten, blieb Getreideabgang in einem vergleichsweise engen Bereich.

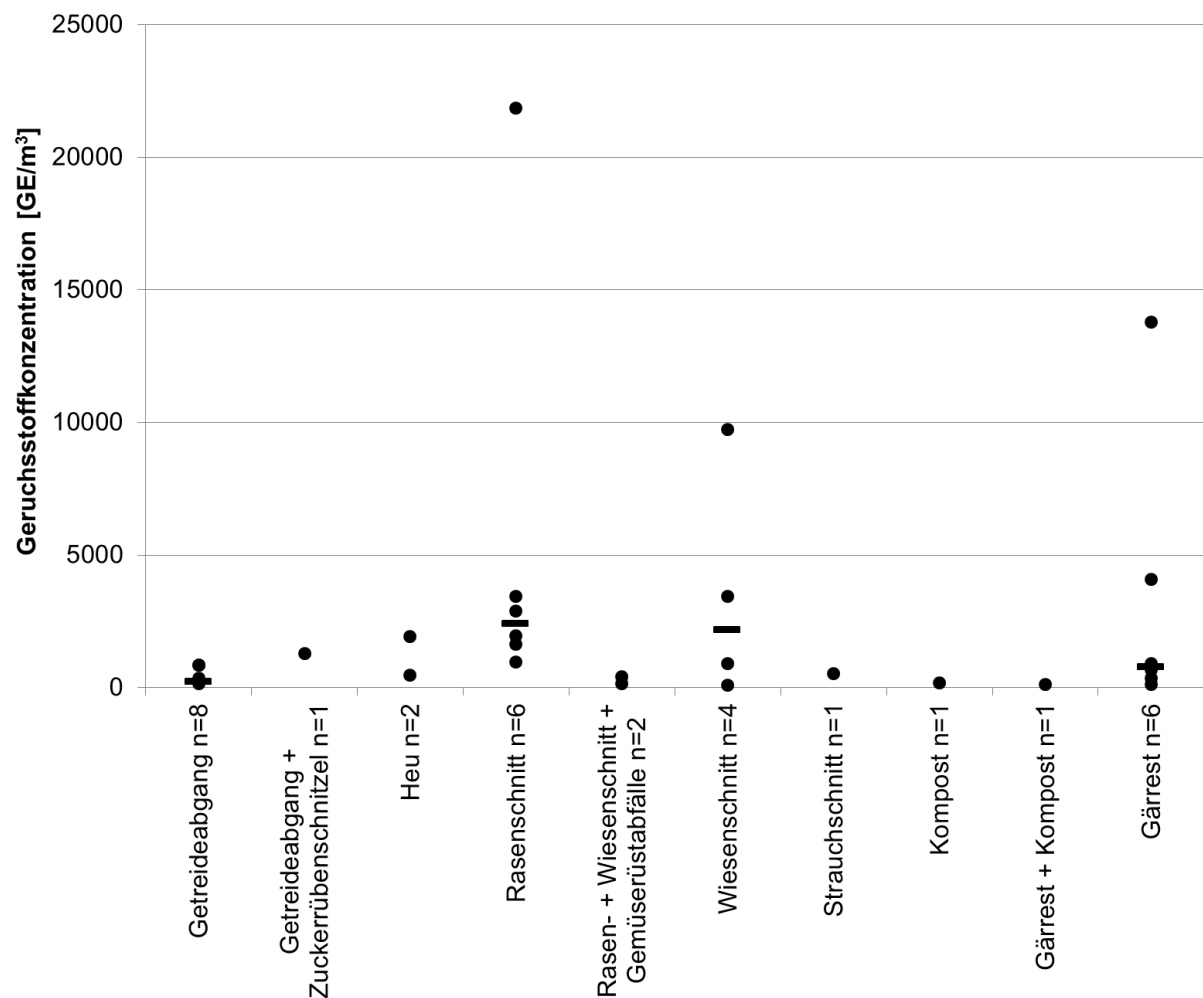


Abbildung 10: Geruchsstoffkonzentration [GE/m³] von Getreideabgang, Heu, Rasen-, Wiesen-, Strauchschnitt, Kompost und Gärrest sowie Kombinationen dargestellt als Einzelwerte (●) und Median (—).

In Abbildung 11 sind Geruchsstoffkonzentrationen von Gemüserüstabfällen, Karotten, Kartoffeln, Kräuterextrakt, Maisabgang, Trester, Zierkürbis, Zwiebeln und Sickersaft dargestellt. Bei der Kategorie Gemüserüstabfälle handelt es sich um Proben mit unterschiedlichen Anteilen einzelner Komponenten wie Salat, Karotten, Kohl, Kartoffeln, Rote Beete (Randen), Zwiebeln usw. Dementsprechend zeigen die Werte der Geruchsstoffkonzentrationen der Gemüserüstabfälle eine Streuung von 196 bis 14 597 GE/m³. Der Median für Sickersaft lag bei 1448 GE/m³ (MW 2305 GE/m³), wobei mit Werten bis zu 4871 GE/m³ auch deutlich höhere Geruchsstoffkonzentrationen auftraten. Während die Einzelwerte der Substrate Karotten, Kartoffeln, Maisabgang und Zierkürbis jeweils unter 2000 GE/m³ lagen, war die Geruchsstoffkonzentration einer Zwiebelprobe um das Siebenfache höher. Die Geruchsstoffkonzentration einer einzelnen Probe bei Kräuterextrakt war mit rund 49 000 GE/m³ insgesamt am höchsten.

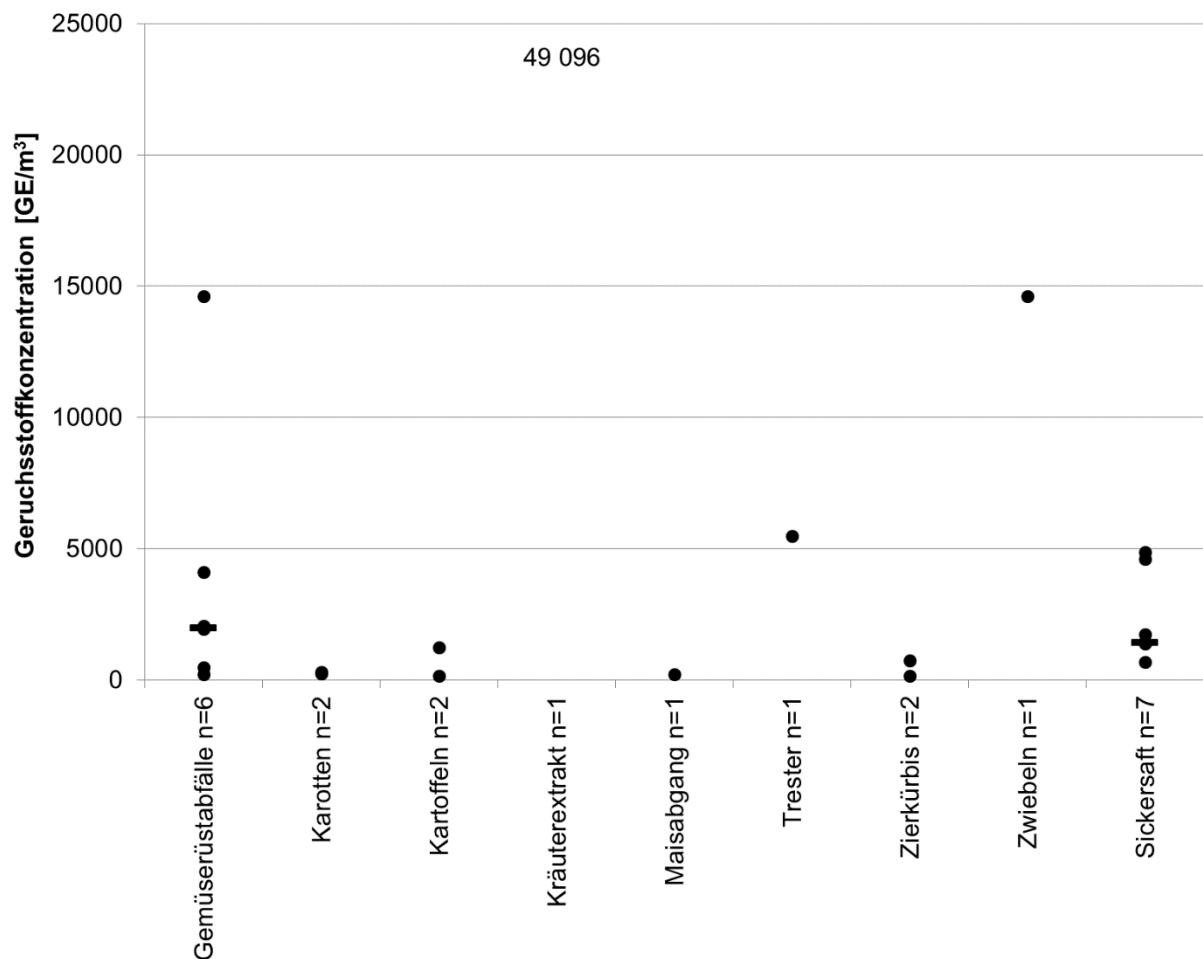


Abbildung 11: Geruchsstoffkonzentration [GE/m³] von Gemüserüstabfällen, Karotten, Kartoffeln, Kräuterextrakt, Maisabgang, Trester, Zierkürbis, Zwiebeln und Sickersaft dargestellt als Einzelwerte (●) und Median (—).

Die Geruchsstoffkonzentrationen von Biogasproben der Betriebe D, G, H und J zeigt Abbildung 12. Von Betrieb D ist eine Datenbasis mit zwölf Werten verfügbar, während von den Betrieben G, H und J lediglich Einzelproben vorlagen. Der Median der Geruchsstoffkonzentrationen von Biogas bei Betrieb D lag bei 98 000 GE/m³. Mit Werten zwischen ca. 30 000 und über 250 000 GE/m³ liegen die Geruchsstoffkonzentrationen aller abgebildeten Biogasproben deutlich über denen der Tierhaltung (Abbildung 8) und über dem Grossteil der Geruchsstoffkonzentrationen der Substrate (Abbildung 9 bis Abbildung 11).

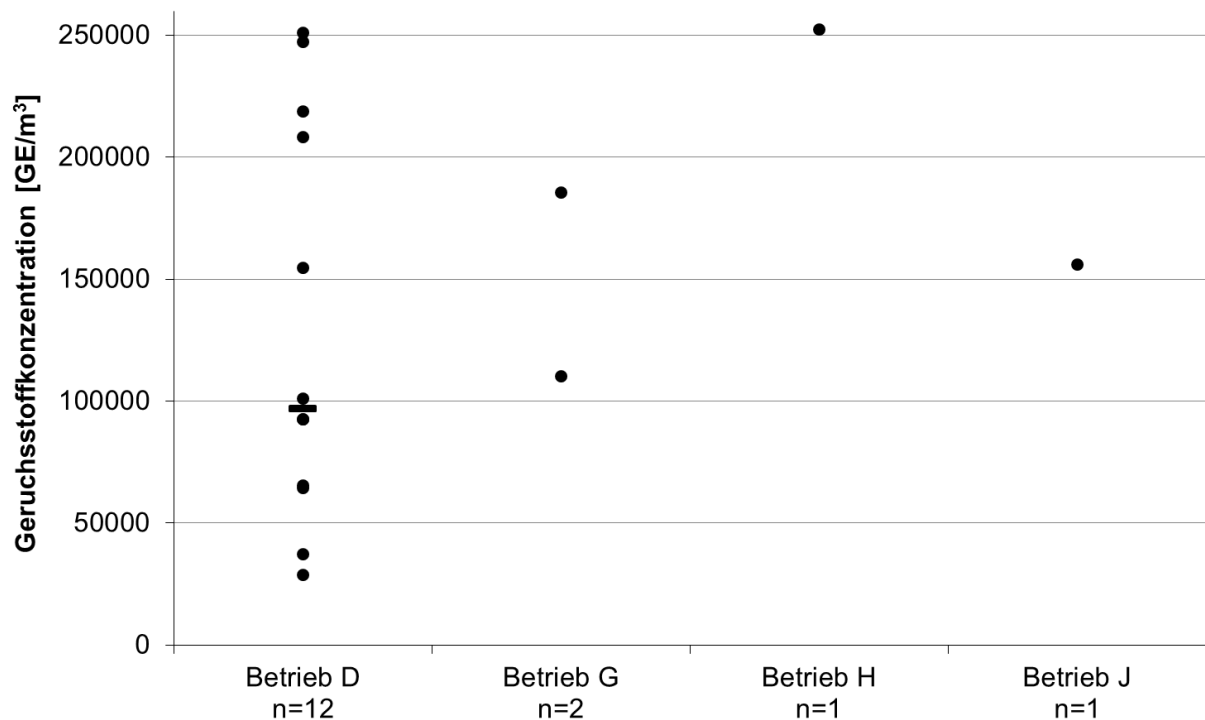


Abbildung 12: Geruchsstoffkonzentration [GE/m³] von Biogasproben dargestellt als Einzelwerte (●) und Median (—).

4.3. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung verbessert die Datengrundlage zu Geruchsstoffkonzentrationen von Flächenquellen landwirtschaftlicher Betriebe mit Biogasanlage der Schweiz.

Im **Bereich Tierhaltung** lagen für Schweizer Tierhaltungsbedingungen bisher nur Daten von Flächenquellen aus der Milchviehhaltung und der Schweinehaltung von Keck et al. (2005; 2011) vor. Der Median der Geruchsstoffkonzentration aus Liegeboxen lag bei der vorliegenden Untersuchung mit etwa 150 GE/m³ auf demselben Niveau wie Ergebnisse aus früheren Messungen von Keck et al. (2011). Von planbefestigten Laufflächen in der Rindviehhaltung dieser Untersuchung war der Median der Geruchsstoffkonzentration mit 966 GE/m³ (siehe Abbildung 8) nur etwas höher als der Median für planbefestigte Laufgänge in der Milchviehhaltung mit 870 GE/m³ aus der Studie von Keck et al. (2011). Eine grosse Streubreite der Werte insbesondere bei den Laufflächen konnten auch Keck et al. (2011) feststellen. Bei früheren Untersuchungen von Schweineausläufen wiesen planbefestigte Flächen eine höhere Geruchsstoffkonzentration aus als perforierte Flächen (Keck et al. 2005). Dies deckt sich mit den vorliegenden Daten aus der Rindviehhaltung, wobei der Median für planbefestigte Laufflächen mit 966 GE/m³ rund drei Mal höher als der Median für perforierte Laufflächen mit 333 GE/m³ war. Die belüftete Probenahmehaube kann bei perforierten Flächen nicht luftdicht schliessen und saugt somit auch Luft aus dem Luftraum unter den Spalten und Umgebungsluft ein. Mit diesem Messansatz könnte somit die Geruchsstoffkonzentration von perforierten Laufflächen unterschätzt werden. Bisher ist jedoch keine verlässlichere Methode bekannt.

Für **Flächenquellen aus dem Bereich Biogas** sind aus der Literatur lediglich Messwerte von Hunkeler und Stoll (2011) sowie Daten für Gärrest von Plätzer (2008) vorhanden. Der Schwerpunkt der Studie von Hunkeler und Stoll (2011) lag in der vergleichenden Untersuchung von Flächenquellen in unterschiedlichen Lager- bzw. Behandlungssituationen: z.B. Substrate bzw. Gärrest im Ruhezustand und nach dem Aufwerfen sowie Lagerung offen, überdacht oder mit Folie. Da es sich dabei meist um Einzelwerte handelt, ist deren Aussagekraft und Vergleichbarkeit begrenzt.

Die Geruchsstoffkonzentrationen dargestellt in Abbildung 10 für separierten, festen Gärrest variierten in der vorliegenden Untersuchung zwischen 114 bis 13 777 GE/m³ (Median 798 GE/m³; MW 3324 GE/m³). Damit war die Streuung deutlich grösser als bei den Untersuchungen von Plätzer (2008) mit 200 bis 1100 GE/m³ und bei Hunkeler und Stoll (2011) mit 360 bzw. 1020 GE/m³ im Ruhezustand bzw. frisch aufgeworfen (siehe Tabelle 3).

Bei Geflügelfestmist im Ruhezustand lag der Einzelwert von Hunkeler und Stoll (2011) mit 210 GE/m³ deutlich unter dem Median der Geruchsstoffkonzentrationen der eigenen Untersuchung mit 6889 GE/m³ (siehe Abbildung 9 sowie Tabelle 1). Der Median der Gemüserüstabfälle der eigenen Untersuchungen war mit knapp 2000 GE/m³ um einiges höher als der Einzelwert für Salat und Rüstabfälle von Hunkeler und Stoll (2011) mit 540 GE/m³. In beiden Untersuchungen waren die Geruchsstoffkonzentrationen von Getreideabgang im Ruhezustand mit bis zu 250 GE/m³ (Hunkeler und Stoll 2011) im Vergleich zu anderen Substraten sehr tief (siehe Abbildung 10 sowie Tabelle 1).

Da bei der vorliegenden Untersuchung die Bonitierung der Einzelflächen aus technischen und personellen Gründen nicht exakt zeitgleich mit der Probenahme erfolgte, entsprachen die dokumentierten beschreibenden Parameter wie Temperatur, Bestrahlung etc. nicht immer genau den tatsächlichen Bedingungen während der Probenahme. Daher erfolgte keine weitere Auswertung der Daten in Abhängigkeit der physikalischen Parameter.

Die Vielfalt der Substrate einzeln und in Mischungen sowie von Gärrest, die Unterschiede bei den Lagerungsbedingungen (offen, eingehaust, überdacht, mit Folie abgedeckt etc.), bei den klimatischen Bedingungen sowie beim Alter erschweren die Bildung von Kategorien und die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Substraten bzw. Substratgruppen. Einzelwerte sind weniger aussagekräftig als Mediane bzw. Mittelwerte, die sich auf eine grössere Datenbasis stützen. Dies gilt insbesondere für Substrate in unterschiedlichem Gärzustand. Mit Blick auf Empfehlungen zur Vermeidung von Geruch aus Biogasanlagen ist deshalb eine grössere Datengrundlage erwünscht.

Die Geruchsstoffkonzentrationen von **Biogasproben** der eigenen Untersuchungen erreichten mit 28 000 bis rund 250 000 GE/m³ (Abbildung 12) die Werte von Brun und Völlmecke (2008) mit rund 270 000 GE/m³, während Liebich (2004) über 500 000 GE/m³ angibt. Biogasaustritt über Leckagen kann aufgrund der sehr hohen Geruchsstoffkonzentration zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen. Zur Verminderung von Gerüchen aus Biogasanlagen sind Leckagen deshalb zu vermeiden bzw. zu beheben. Die Vermeidung von Biogasaustritt bedeutet ausserdem weniger Methanverluste und somit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Treibhausgasbilanz.

5. Berechnung der erforderlichen Mindestabstände für den Bereich Tierhaltung

Zur Orientierung wurden für die Tierhaltung der acht Erhebungsbetriebe (Tabelle 16) die erforderlichen Mindestabstände zur Wohnbebauung berechnet. Da derzeit keine Berechnungsgrundlage für den Bereich Biogas mit Zufuhrmaterial von fremden Betrieben bzw. von nicht landwirtschaftlicher Herkunft vorhanden ist, konnte lediglich der Bereich Tierhaltung berücksichtigt werden. Diese Mindestabstandsberechnung bezogen auf die Tierhaltung dient auch zur Einordnung der Ergebnisse der Geruchsfahnenbegehungen (siehe Kapitel 6).

5.1. Vorgehen

Die Berechnung der Mindestabstände wurde pro Betrieb für die einzelnen Erhebungstermine durchgeführt. Dabei wurden der jeweilige Tierbestand und die Haltungssituation während des Erhebungstermins berücksichtigt. Die Mindestabstandsberechnung erfolgte mit dem Revisionsentwurf des FAT-Berichts Nr. 476 (Agroscope Tänikon und BUWAL 2005), da im FAT-Bericht Nr. 476 (Richner und Schmidlin 1995) Haltungssysteme mit freier Lüftung und Auslauf bzw. Wintergarten nicht berücksichtigt sind. Berechnet wurden für die einzelnen Erhebungstermine sowohl die Geruchsbelastung (GB) als auch der Normabstand der einzelnen Stallgebäude. Weiter wurde der erforderliche Mindestabstand ohne sowie mit Berücksichtigung der Standortsituation (Geländeform) für den jeweiligen Betrieb ermittelt. Auch die Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Stallgebäude sind mit der gegenseitigen Beeinflussung berücksichtigt. Für Mastkälber wurden dieselben Ansätze wie für Rindvieh verwendet, da Daten aus den eigenen Erhebungen zu Geruchsstoffkonzentrationen von Tiefstreu, Tretmist und Laufhof keine erhöhten Werte bei der Kälbermast zeigten. Für die Umrechnung der Tierbestände in Grossvieheinheiten (GVE) wurden die derzeit aktuellen GVE-Faktoren der Landwirtschaftlichen Begriffsverordnung (LBV 1998) verwendet. Stallgebäude mit einer Quellstärke unter 4 GB wurden zu anderen naheliegenden Stallgebäuden mit derselben Tierart gezählt.

5.2. Ergebnisse, Diskussion und Folgerungen

Die Ergebnisse der Mindestabstandsberechnung für den Bereich Tierhaltung sind über alle Betriebe und Erhebungstermine beschrieben. Mit Blick auf Datenschutz wurde auf eine einzelbetriebliche Darstellung verzichtet.

Der Tierbestand pro Betrieb wies über alle Betriebe und Erhebungstermine eine Spannweite von 26 bis 118 GVE auf. Dabei erstreckte sich die Lebendmasse der Tiere zwischen 18 235 bis 73 433 kg pro Betrieb.

Die berechnete Geruchsbelastung für die einzelnen Stallgebäude wies mit rund 4 bis 90 GB eine grosse Spannweite auf. Der Normabstand pro Stallgebäude erstreckte sich von 20 bis 153 m. Zwei der Rindviehställe lagen zu einigen Erhebungsterminen unter der Grenze von 4 GB. Da die Berechnung des Normabstandes erst ab 4 GB gilt, wird für Ställe unter 4 GB ein Mindestabstand von 20 m veranschlagt. Für die Betriebe und Erhebungstermine lag der erforderliche Mindestabstand ohne Berücksichtigung der jeweiligen Standortsituation zwischen 20 und 183 m. Bei den Berechnungen war eine deutliche Hebelwirkung der beiden Tierkategorien Mastpoulet und Mastschweine erkennbar. Stallgebäude mit Poulet- bzw. Schweinemast wiesen eine höhere Geruchsbelastung und somit auch grössere Normabstände als die Ställe nur für Rindvieh (Milchvieh, Mutterkuh, Munimast) auf. Die erforderlichen Mindestabstände lagen bei den Betrieben mit Poulet- bzw. Schweinemast mit 97 bis 183 m deutlich höher als bei reinen Rindviehbetrieben mit 20 bis 77 m.

Bei fünf Betrieben ist aufgrund der Topographie und Landnutzung Kaltluftabfluss zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Standortsituation vergrösserte sich bei Ställen dieser Betriebe der erforderliche Mindestabstand um 45 bis 82 % im Kaltluftabflusspfad. Der hohe Anteil der Untersuchungsbetriebe mit Kaltluftabfluss spiegelt die Situation in der Schweiz mit komplexem Terrain wieder.

Die Berechnungen anhand des Vernehmlassungsentwurfs des FAT-Berichts Nr. 476 (Agroscope Tänikon und BUWAL 2005) erlauben eine Einschätzung zur Geruchsbelastung und zu erforderlichen Mindestabständen des Bereichs Tierhaltung. Geruch aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist damit jedoch nicht berücksichtigt. Mit Blick auf die erforderlichen Mindestabstände des Gesamtbetriebs ist der Bereich Biogasanlage zwingend in die Mindestabstandsberechnung zu integrieren. Weiter ist eine detailliertere Abbildung der Standortsituation im Hinblick auf die topographischen und meteorologischen Bedingungen wünschenswert.

6. Geruchswahrnehmung des Gesamtbetriebs bei Fahnenbegehungen am Beispiel einer Biogasanlage mit Tierhaltung

Nachdem in Kapitel 4 die Geruchsstoffkonzentrationen der Einzelquellen von acht Betrieben beschrieben wurden, folgt in Kapitel 6 die gesamtbetriebliche Betrachtung immissionsseitig mit Geruchsfahnenbegehungen. Dies ist Teil der Untersuchung mit dem Ziel, Grundlagen für Mindestabstände zu bewohnten Zonen zu erarbeiten. Im Folgenden werden Erhebungen von Geruchsimmissionen beispielhaft bei einem Milchviehbetrieb mit einer Biogasanlage vorgestellt und daraus Empfehlungen zur Geruchsminderung abgeleitet. Die Geruchsimmission und das Abklingverhalten von Geruch mit der Distanz des gesamten Betriebes mit den Flächenquellen im Bereich der Tierhaltung, des Hofdünger- und Substratlagers waren zu erfassen.

6.1. Vorgehen

Die Untersuchungen wurden 2012 an drei Tagen während des Sommers und der Übergangszeit auf einem Betrieb mit Milchvieh und Biogasanlage durchgeführt. Nach den Erhebungen zur Geruchsstoffkonzentration wurden an denselben Terminen immissionsseitig auch Geruchsfahnenbegehungen durchgeführt. Pro Erhebungstag wurde jeweils ein Block mit Begehungsrunden am Nachmittag und einem am Abend durchgeführt. Damit sollte den unterschiedlichen meteorologischen Ausbreitungssituationen, die tagsüber bzw. in den Abendstunden herrschen, Rechnung getragen werden.

Betriebliche Voraussetzung für Fahnenbegehungen ist die Begehbarkeit in der Umgebung der Betriebsstandorte. Neben möglichst ebenem Gelände am Betriebsstandort soll die Begehbarkeit in den relevanten Himmelsrichtungen nicht von Hecken, Wald, stark befahrenen Strassen, Bahnlinien, Wohnbebauung oder grossen Wasserflächen eingeschränkt werden. Als weitere Einschränkung sollten möglichst keine weiteren geruchsintensiven Industrie- oder Landwirtschaftsbetriebe in der Umgebung vorhanden sein, damit eine Zuordnung der Geruchswahrnehmung zur konkreten Einzelanlage erfolgen kann.

Entscheidend für die Wahl der Erhebungstage waren neben der Einsatzbereitschaft der Testpersonen und betrieblichen Voraussetzungen, z.B. keine Gülleausbringung in der Umgebung und keine Weidehaltung während der Begehungen, Wettervorhersagen ohne Niederschlag. Bei der Lufttemperatur wurde möglichst ein Gradient zwischen den einzelnen Tagen pro Betrieb angestrebt. Weiter sollte im Bereich der zu erwartenden Windrichtung und damit Geruchsfahne genügend freie Fläche für Begehungen sein.

6.1.1. Beschreibung des Betriebes

In Kapitel 4.1.1 gibt Tabelle 16 einen Überblick über den Tierbestand zu den Erhebungsterminen. Tabelle 17 zeigt die baulich-technische Ausführung der Biogasanlagen. Die Kühe waren in einem frei belüfteten Laufstall mit Liegeboxen und Laufhof untergebracht. Die Biogasanlage wurde zweistufig mit einem Hauptfermenter und Nachgärer betrieben. Als Substrate kamen zusätzlich zu Gülle und Festmist vor allem Rüstabfälle von Gemüse und Obst zum Einsatz. An allen Erhebungstagen dominierte, wie in Abbildung 13 ersichtlich, die emittierende Fläche der Tierhaltung mit 88–92 % im Vergleich zum Festmistlager (1–4 %) und zum Substratlager (5–8 %).

Futter, Mischration 30 m²

Liegeboxen 160 m²; Laufhof 282 m²

Laufflächen 220 m²



Anteil an der
emittierenden Gesamtfläche
von ca. 800 m²:

Tierhaltung 88–92 %
Festmistlager 1–4 %
Substratlager 5–8 %

Festmist 30 m²; Sickersaft 20 m²

Rüstabfälle, Gemüse, Obst 30 m²

Abbildung 13: Übersicht zu den verschiedenen Geruchsquellen und deren Anteil an der emittierenden Gesamtfläche auf dem Praxisbetrieb.

Mit den Fahnenbegehungen sollte Geruch im Betriebszustand mit den Dauerquellen wie Flächen der Tierhaltung, Hofdünger, Substrat- und Gärrestlager erfasst werden. Während den Begehungsrunden durften keine kurzzeitigen speziellen Aktivitäten wie Futtervorlage, Entmistung, Anlieferung von Substraten, Feststoffeintrag oder Güllerühren bei nicht abgedecktem Lager erfolgen.

6.1.2. Geruchsfahnenbegehungen

Abbildung 14 zeigt den Ablauf der Geruchsfahnenbegehungen. In den Tageszeiten Nachmittag und Abend wurden jeweils mindestens vier Begehungsrunden durchgeführt. Die Testpersonen kamen gemäss den Anforderungen der EN 13725 (2003) auch am Olfaktometer TO8 (ECOMA, Honigsee, G) zum Einsatz und wurden mit dem Referenzgeruchsstoff n-Butanol geprüft. Nach den Vorbereitungen (Ermitteln der Windrichtung, Festlegen des Startpunkts sowie der Distanzen der Begehungspositionen etc.) erfolgte eine Besprechung mit Einweisung der sechs Testpersonen. Vor jedem Erhebungsblock wurden den Testpersonen verschiedene Geruchsproben vorgelegt und die Geruchsarten und -intensitäten abgeglichen. Weiter diente eine Abstimmungsrunde, in welcher alle Testpersonen an derselben Position platziert waren, zum Abgleich der Geruchsintensitäten und als Test der synchronen Reaktion.

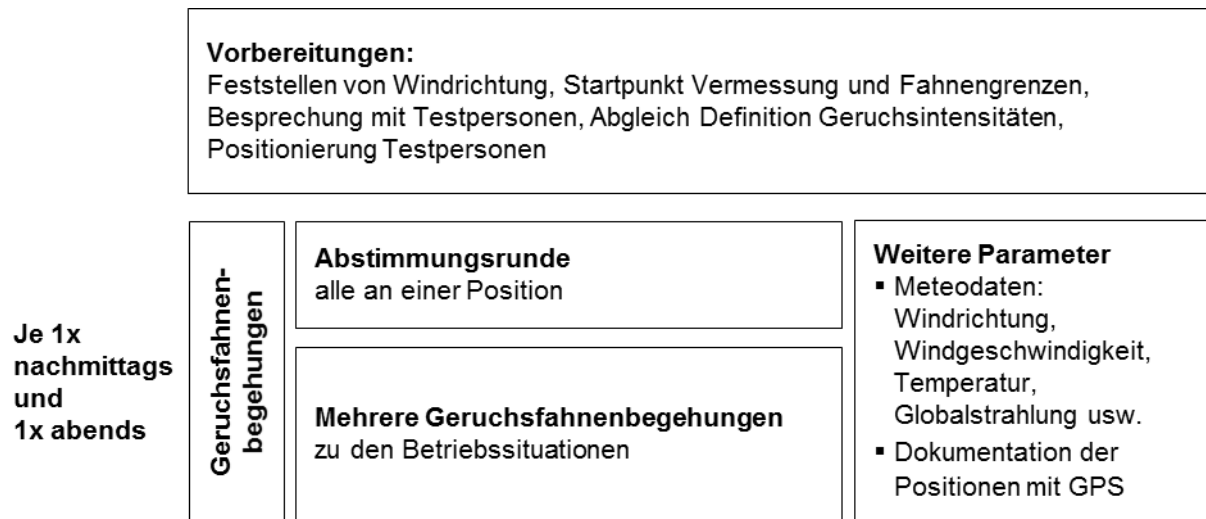


Abbildung 14: Übersicht über den Ablauf der Geruchsfahnenbegehungen und der Erhebung von beschreibenden Parametern.

Die Geruchsfahne wurde jeweils im Lee der Quelle mit Windfahnen oder Rauchproben lokalisiert (Abbildung 15). Sechs Testpersonen waren in Richtung der aktuell vorherrschenden Fahnenachse hintereinander positioniert. Um das Abklingverhalten entlang der Geruchsfahnen aufnehmen zu können, sollte ein deutlicher Gradient der Geruchshäufigkeit und -intensität zu den vorderen Positionen bestehen. Der Abstand zwischen den Testpersonen und der Abstand der ersten Person zum Betrieb wurden somit je nach Wind- und Quellstärke festgelegt. Eine Begehungsrunde dauerte zehn Minuten. Die Testpersonen registrierten mit Handheld-PCs für jedes 10-Sekunden-Intervall ihre Geruchswahrnehmung als Intensität. Die Dokumentation der Geruchsintensität (Tabelle 18) erfolgte in sieben Stufen von 0 (nicht wahrnehmbar) bis 6 (extrem stark), angelehnt an die VDI-Richtlinie 3940 (VDI 2010a). Da bei den landwirtschaftlichen Betrieben mit Tierhaltung und Biogasanlage aufgrund der vielfältigen Geruchsquellen meist Mischgerüche zu erwarten waren, erfolgte die Definition der Intensitätsstufen abweichend zur VDI 3940. Die unterste Stufe „sehr schwach“ wurde nicht erst beim klaren Erkennen einer Geruchsart nach Anlage gewählt, sondern bereits bei der ersten Wahrnehmung.

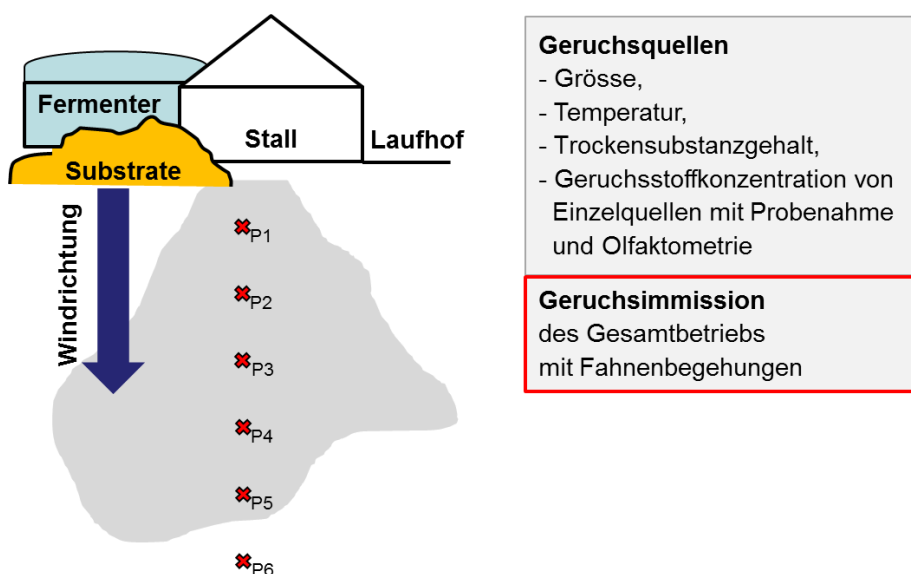


Abbildung 15: Geruchsfahnenbegehungen in der jeweils vorherrschenden Fahnenachse mit sechs Testpersonen P1–P6.

Tabelle 18: Beschreibung der verschiedenen Intensitätsstufen der Geruchswahrnehmung

Stufe	In Worten nach VDI 3940, Blatt 3	Erläuterung der einzelnen Stufen, abgestimmt auf die vorliegenden Untersuchungen von ART
0	Nicht wahrnehmbar	Keine Geruchswahrnehmung
1	Sehr schwach	"Ein Hauch von Geruch"; der Eindruck, dass Geruch da ist
2	Schwach	Geruchsart nicht bestimmbar; Geruch wahrnehmbar, aber nicht beschreibbar
3	Deutlich	Geruch ist deutlich erkennbar, es riecht nach „...“; Adjektive wie z.B. muffig, süsslich, würzig können zugeordnet werden
4	Stark	Intensität stärker; mehr als deutliche Geruchswahrnehmung; Geruch ist eindeutig erkennbar
5	Sehr stark	Sehr starke Geruchswahrnehmung; es ist unangenehm in der Fahne zu stehen
6	Extrem stark	Gestank ist unerträglich; man möchte sich aus der Fahne entfernen

Im Anschluss an jede Begehungsrunde notierten die Testpersonen Kommentare zu ihrer Position, zur Geruchsqualität und -art sowie deren Häufigkeit mit „selten“, „manchmal“, „häufig“ oder „immer“. Damit sollten sowohl Hinweise zu Standortgerüchen (z.B. Kartoffelpflanzen, Rapsgeruch) als auch zu den wahrgenommenen Gerüchen des Betriebs (z.B. Biogas, Geflügelstall, Rasenschnitt) dokumentiert werden.

6.1.3. Weitere Parameter

Während der Fahnenbegehungen wurden mit einer mobilen Wetterstation Windgeschwindigkeit, -richtung, Globalstrahlung, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit erfasst:

- Windgeschwindigkeit [m/s] und Windrichtung [°]: 3D-Ultraschallanemometer USA-1-Scientific mit Turbulenzerweiterung, Version 4.42t von METEK (Elmshorn, D)
- Globalstrahlung [kW/m²]: FLA613 GS von Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (Holzkirchen, D)
- Luftdruck [P]: MSR Electronics GmbH (Seuzach CH)
- Lufttemperatur [°C] und relative Luftfeuchtigkeit [%]: Rotronic Messgeräte GmbH (Ettlingen, D)

Die Wetterstation war 200 m vom Betrieb entfernt, möglichst unbeeinflusst von Betriebsgebäuden, Bäumen, Wald usw. positioniert. Das 3D-Ultraschallanemometer befand sich auf einem 10 m hohen Teleskopmast. Es erfasste die Windrichtung in drei Dimensionen mit einer Frequenz von 10 Hz und speicherte Mittelwerte von 10 Sekunden ab.

Zur Berechnung der Distanz der einzelnen Positionen der Testpersonen, unabhängig von Begehungsrichtung und Quellkonfiguration, wurde zunächst der Flächenschwerpunkt anhand der x-y-Koordinaten der Grundrisse mit emittierenden Quellen (Tierhaltung, Hofdünger, Substrate, Gärrest) am jeweiligen Erhebungstag ermittelt. Ausgehend von der emittierenden Fläche der Einzelquellen und den Geruchsstoffkonzentrationen wurde ein sogenannter geruchsgewichteter Schwerpunkt bestimmt, der neben der Fläche auch die Geruchsstoffkonzentration der jeweiligen Einzelquelle berücksichtigt. Die in Kapitel 4.2.2 ermittelten Geruchsstoffkonzentrationen wurden dazu herangezogen. Dieser geruchsgewichtete Schwerpunkt wurde schliesslich für die Ermittlung der Distanz der Testpersonen verwendet.

6.2. Ergebnisse und Diskussion der Geruchsfahnenbegehungen

Tabelle 19 gibt eine Übersicht über die Verteilung der insgesamt 22 Begehungenrunden an drei Erhebungsterminen zu jeweils zwei Tageszeiten. Die Lufttemperatur variierte zwischen 12 und 20 °C in einem engen Bereich. Die Windgeschwindigkeit war jeweils in den Abendstunden niedriger als nachmittags. In einzelnen Begehungenrunden am Abend stimmte die Windrichtung, gemessen in 10 m Höhe, nicht mit der lokalen bodennahen Strömung überein.

Tabelle 19: Angaben zu den Geruchsfahnenbegehungen: Anzahl der Begehungenrunden [n] mit einer Dauer von zehn Minuten; Minima und Maxima von Lufttemperatur [°C], Windgeschwindigkeit [m/s] und Windrichtung

Erhebungstermin, Tageszeit	Anzahl der Begehungenrunden [n]	Temperatur [°C]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung
1, Nachmittag	2	12–14	1.5–2.4	West, Süd
1, Abend	5	12–14	0.4–1.4	Ost, Südost
2, Nachmittag	4	19–20	3.8–5.2	Südwest, West
2, Abend	4	19–20	0.7–3.1	Nordwest, West
3, Nachmittag	5	14–15	2.1–3.3	Nordwest, West
3, Abend	2	15	0.8–0.9	Süd

Über alle Begehungenrunden hinweg ist das Abklingverhalten der mittleren Geruchsintensität mit zunehmender Distanz zum Betrieb deutlich sichtbar (Abbildung 16). Die Geruchsfahne wurde meist als Mischgeruch wahrgenommen. Hohe mittlere Geruchsintensitäten traten vor allem in den ersten 200 m auf. Die gesamte Reichweite der Geruchsfahnen konnte aufgrund der lokalen Situation nicht bei allen Begehungenrunden erfasst werden, da es teils nicht möglich war, die hintere Testperson ausserhalb der Fahnen zu positionieren (hohe Vegetation, Strassen etc.). Weil es sich bei den dargestellten Werten um Mittelwerte über zehn Minuten handelt, kamen zum Teil als Einzelwerte auch deutlich höhere Intensitäten vor. Bei Mittelwerten mit hohen Intensitäten war somit die Geruchswahrnehmung über den Begehungszeitraum anhaltend hoch.

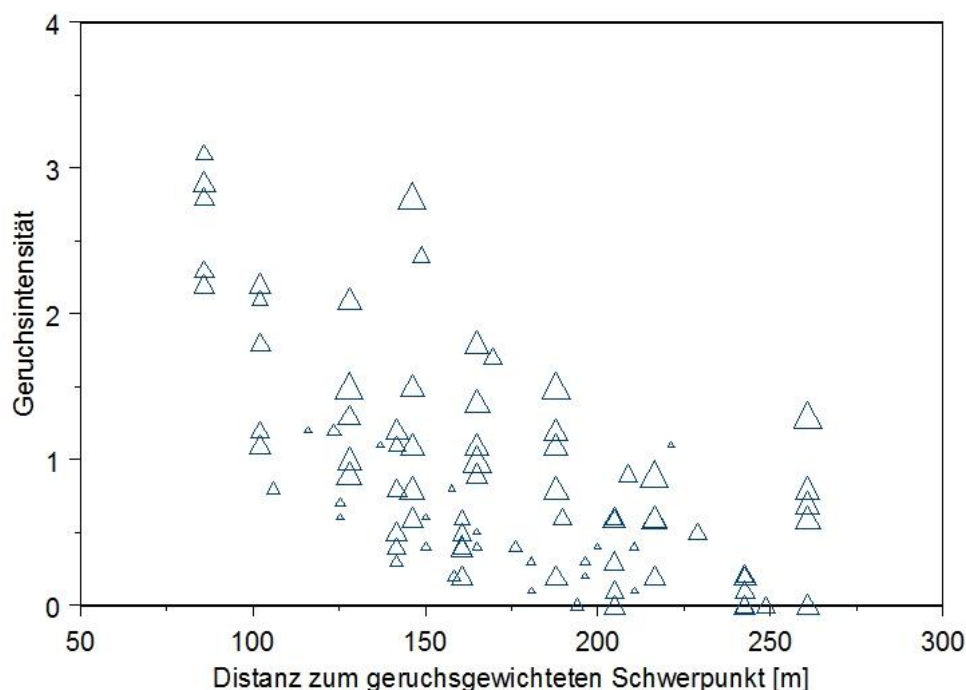


Abbildung 16: Mittlere Geruchsintensität der einzelnen Testpersonen pro Begehungsrunde in Abhängigkeit von der Distanz zum geruchsgewichteten Schwerpunkt [m]. Das Symbol variiert in der Grösse mit der Windgeschwindigkeit in einem Bereich von 0,7 m/s bis 4,0 m/s.

Abbildung 17 zeigt als Beispiel die Verteilung der Geruchsintensitäten der sechs Testpersonen während vier Begehungen am Nachmittag eines Erhebungstages. Die Werte wurden jeweils über zehn Minuten aggregiert. Die Distanz der sechs Testpersonen vom geruchsgewichteten Schwerpunkt betrug bei der vorderen Testperson 86 m, bei der letzten Testperson 243 m. Die vordere Testperson nahm während 80–100 % der Erhebungsintervalle Geruch wahr. Mit zunehmender Distanz resultierte eine deutliche Abnahme des Zeitanteils mit Geruch wie auch der hohen Geruchsintensitäten. Ein deutlicher Effekt der Distanz auf die Geruchswahrnehmung ergab sich auch in den Erhebungen mit Haltungssystemen für Schweine (Keck et al. 2005).

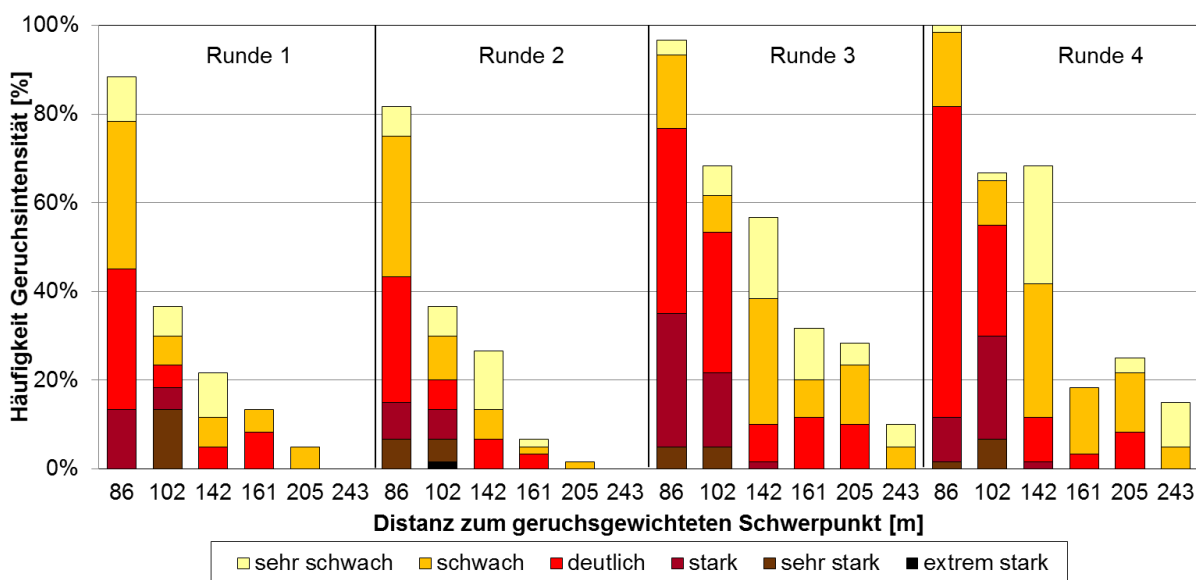


Abbildung 17: Verteilung der Geruchsintensitäten 1–6 (1 = sehr schwach, 6 = extrem stark), aggregiert über jeweils zehn Minuten; Testpersonen in sechs verschiedenen Distanzen zum geruchsgewichteten Schwerpunkt während vier Begehungen.

Abbildung 16 zeigt auch den Effekt der Windgeschwindigkeit auf. Bei höherer Windgeschwindigkeit war zum einen die Reichweite des Geruchs grösser und zum anderen die Geruchsintensität höher. Ein Effekt der Windgeschwindigkeit auf die Geruchsimmission ergab sich auch bei Fahnenbegehungen in der Schweinehaltung mit Auslauf (Keck et al. 2005).

6.3. Ergebnisse und Diskussion zum Biogasgeruch

Während den Fahnenbegehungen notierten die Testpersonen auf diesem Betrieb an allen drei Erhebungstagen und zu beiden Tageszeiten Biogasgeruch. Die Testpersonen konnten zeitweise auch andere Anlagengerüche wie Tierhaltung, Gülle oder Motorenabgas identifizieren.

Zur Bewertung der hedonischen Geruchswirkung (d.h. wie angenehm bzw. unangenehm der Geruch erscheint) wurde die Methode des Polaritätenprofils aus der VDI-Richtlinie 3940 (2010c) herangezogen. Testpersonen haben zunächst die Konzepte Duft und Gestank ausgehend von ihrer Erfahrung und Vorstellung mit vorgegebenen Wortpaaren beschrieben. Ziel war damit, die Eignung der Testpersonen anhand dem theoretischen Polaritätenprofil Duft und Gestank zu prüfen. Abbildung 18 zeigt die grafische Darstellung der theoretischen Polaritätenprofile Duft und Gestank sowie von Biogas, als Mittelwerte über 19 Testpersonen. Zum Vergleich sind repräsentative Duft- und Gestankprofile nach der VDI-Richtlinie 3940, Blatt 4 (VDI 2010c) angeführt. Die Duft- und Gestankprofile der Testpersonen korrelieren stark mit den repräsentativen Duft- und Gestankprofilen. Ein weiteres Ziel war die hedonische Geruchswirkung von Biogasgeruch zu bewerten. Biogasgeruch von Erhebungsbetrieben wurde

von allen Testpersonen eindeutig als unangenehm eingestuft. Der Mittelwert von Biogasgeruch über alle Eigenschaften und Testpersonen liegt bei -1.5 und damit deutlich im Bereich des Gestanks.

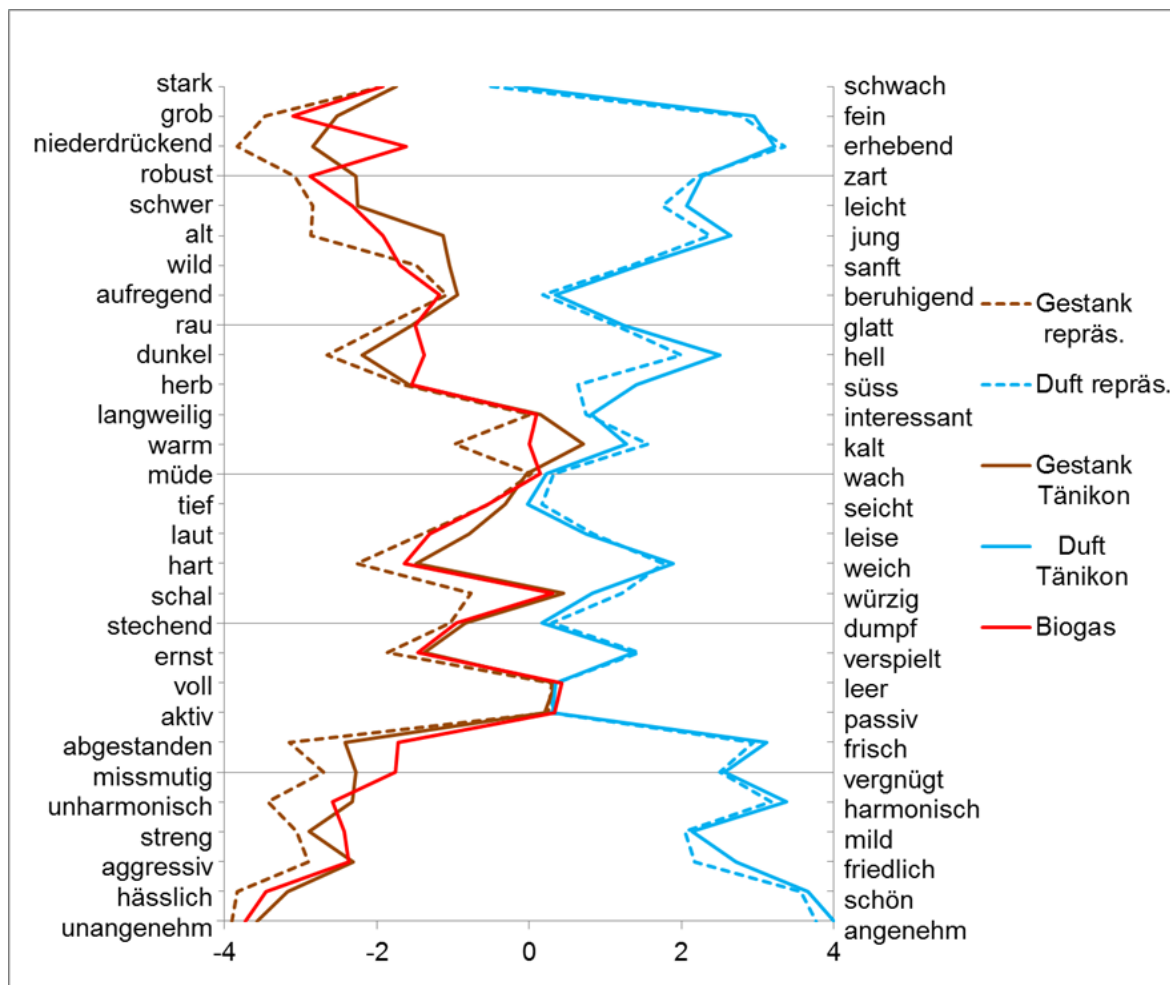


Abbildung 18: Polaritätenprofile von Duft und Gestank sowie von Biogas (durchgezogene Linien) dargestellt als Mittelwerte über 19 Testpersonen sowie repräsentative Duft- und Gestankprofile (gestrichelte Linien) nach der VDI-Richtlinie 3940, Blatt 4 (VDI 2010c).

Verschiedene Flächenquellen aus der Tierhaltung, im Bereich des Substratlagers und des Gärrests (Keck et al. 2014) erreichten nicht annähernd ein derart hohes Niveau der Geruchsstoffkonzentration wie Biogasgeruch. Die Geruchsstoffkonzentration von Biogasproben in eigenen Erhebungen auf anderen Betrieben variierte zwischen 28 000 und 250 000 Geruchseinheiten (GE) pro m³. Sowohl Brun und Völlmecke (2008) wie auch Liebich (2004) zeigen übereinstimmend die grosse Relevanz von Biogasgeruch mit Geruchsstoffkonzentrationen von 270 000 bzw. 500 000 GE/m³ auf. Biogasaustritt über Leckagen kann zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen. Nach Eindrücken während der Erhebungen auf Praxisbetrieben und basierend auf der Literatur sind häufige Quellen für Biogasaustritt Leckagen, Membran und Tragluft, Überdruckventil, Sichtfenster, Rührwerksöffnungen etc. (u. a. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007 und 2011; Beck 2009; Sax et al. 2013; Weber et al. 2006).

7. Ausblick, Forschungsbedarf und Empfehlungen

In diesem Kapitel werden weitere Schritte vorgestellt, der Forschungsbedarf aufgezeigt und Empfehlungen für die Praxis abgeleitet.

7.1. Ausblick

Die nun vorliegenden Geruchsstoffkonzentrationen von Substraten und Gärrest aus den Erhebungen bilden zusammen mit Literaturdaten eine wissenschaftliche Datengrundlage zu Geruch von Flächenquellen im Bereich Biogas. Damit besteht eine Datenbasis zur Beurteilung und Rangierung von Substraten und Gärrest für die Ausarbeitung und Umsetzung der Vollzugshilfe Biogas sowie für Strategien zur Minderung von Geruch.

Die Ergebnisse der Geruchsstoffkonzentrationen von Einzelquellen und der Abklingkurven aus Fahnenbegehungen bei Betrieben mit Tierhaltung und Biogasanlage sind in die Empfehlung Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen zu integrieren. Dies ist nötig, damit bereits in der Planungsphase belastbare Entscheidungsgrundlagen vorliegen und eine Betrachtung der Gesamtanlage möglich wird.

Die Geruchsstoffkonzentrationen aus dem Bereich Tierhaltung (Aufenthaltsflächen, Hofdüngerlager, Futter etc.) werden mit Daten aus bisherigen und geplanten Erhebungen sowie Literaturdaten ergänzt und ebenfalls in die Revision der Mindestabstandsempfehlung Tierhaltungsanlagen integriert.

Weiter fließen methodische Erfahrungen und Optimierungen aus diesem Projekt in laufende und zukünftige Geruchserhebungen von ART ein: z.B. Eignung, Kontrolle und Abstimmung von Testpersonen, Positionierung bei Fahnenbegehungen.

7.2. Forschungsbedarf

Zur Verbesserung der Datengrundlage zu Geruchsstoffkonzentrationen von Substraten sind ausgehend von der grossen Vielfalt der verwendeten Substrate bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz weitere Erhebungen anzustreben.

Erfolgversprechende Minderungsmassnahmen sind mit Blick auf ihr Minderungspotenzial vergleichend zu untersuchen. Mit einem speziellen Versuchsansatz und mit Variation innerhalb des einzelnen Betriebes an wesentlichen Elementen wäre der immissionsseitige Effekt zu prüfen: z.B. mit/ohne Austritt von Biogas, mit/ohne Prozessüberwachung, mit/ohne Abdeckung des Substrat- und Gärrestlagers bei erheblichen Gradienten.

Bisher fehlen systematische Erhebungen zum Zusammenhang von Biogasaustritt z.B. am Überdruckventil, an Membranen, am Tragluftauslass etc. und dem immissionsseitigen Nachweis von Biogas. Damit geht die Untersuchung des Abklingverhaltens der Geruchsfahne sowie der Geruchsintensitäten einher.

Um Überkapazitäten und damit auch das Risiko von Biogasaustritt zu vermeiden, ist Forschung und Entwicklung zur Optimierung und Überwachung von Prozessen nötig. Dabei ist die Situation landwirtschaftlicher Biogasanlagen der Schweiz mit Blick auf Anlagengrösse, Verfahrenstechnik sowie die Vielfalt der verwendeten Substrate zu berücksichtigen.

Einflüsse durch spezielle Standortsituationen mit komplexer Topographie, Talwind, Kaltluftabfluss, heterogener Landnutzung und lokalen Ausbreitungsbedingungen auf die Geruchsausbreitung und –immission sind durch gezielte Erhebungen zu quantifizieren: Vorkommen, Häufigkeit und Relevanz. Geeignete Kriterien zur Standortabklärung sind zu erarbeiten.

7.3. Empfehlungen für die Praxis

Im Folgenden sind die wichtigsten **Minderungsansätze** abgeleitet von den eigenen Erhebungen zu Geruchsstoffkonzentrationen, von den Fahnenbegehungen sowie aus der Literatur aufgelistet:

- Weniger geruchsintensive Substrate wie z.B. Getreideabgang sind insbesondere bei kritischen Standorten geruchsintensiven Substraten vorzuziehen.
- Bei geruchsintensiven Substraten wie beispielsweise Gemüserüstabfällen, Rasenschnitt oder Geflügelmist sollte die Lagerdauer möglichst kurz gehalten werden.
- Durch die Mischung von geruchsintensiveren Substraten wie beispielsweise Geflügelfestmist mit weniger geruchsintensiven Substraten wie Getreideabgang kann eine hohe Geruchsstoffkonzentration vermindert werden.
- Zur Vermeidung von sehr hohen Geruchsstoffkonzentrationen können geruchsintensivere Substrate mit weniger geruchsintensiven Substraten abgedeckt werden.
- Aktivitäten wie Umschichten und Aufwerfen von Substraten und Gärrest sollten möglichst vermieden werden.
- Durch Einhausen und Abdecken von Substraten und Gärrest kann deren Exposition gegenüber Sonne, Wind und Niederschlag verringert und damit auch eine Erhöhung der Geruchsfreisetzung durch Witterungseinflüsse vermindert werden, dies gilt besonders für geruchsintensive Substrate.
- Flächen mit Sickersaft sollten vermieden und dieser möglichst rasch auf kurzem Weg über ein entsprechendes Gefälle abgeleitet werden.
- Feststoffdosierer sind abzudecken, um Geruchsfreisetzung im Ruhezustand und während des Substrateintrags zu vermindern.
- Biogasaustritt aus Leckagen sowie über Rührwerksöffnungen, Sichtfenster, Verbindungen, Behälterkrone etc. sind durch eine sachgemässe bauliche Ausführung, regelmässige Kontrollen und sorgfältige Wartung möglichst auszuschliessen.
- Um die Freisetzung von Biogas durch die Gasspeichermembran zu vermeiden, muss diese regelmässig auf Dichtigkeit geprüft und rechtzeitig ersetzt werden.
- Mit einer optimalen Abstimmung von Fermentervolumen und Substratbeschickung sowie einer regelmässigen Prozessüberwachung kann die Freisetzung von Biogas über das Überdruckventil vermieden werden.
- Um allfällige Schwankungen im Biogasanfall aufzufangen, sollte genügend Speichervolumen zur Verfügung stehen.
- Für unvermeidbare Notfälle (Betriebs- oder Prozessstörungen, Reparatur- oder Wartungsarbeiten) muss ein zusätzlicher Verbraucher (Motor) und/oder eine stationäre, automatische Gasfackel bereitgehalten werden.

Im Sinne der Vorsorge ist bei der **Standortwahl** für neue landwirtschaftliche Biogasanlagen, meist als Ergänzung zu Betrieben mit Tierhaltung, grosse Sorgfalt geboten. Die Abstände zu Wohngebieten sind ausreichend zu bemessen. Dabei sind neben der Biogasanlage auch weitere Geruchsquellen des Betriebs und in der näheren Umgebung zu berücksichtigen. Eine Gesamtbetrachtung von Biogasanlage und Tierhaltung ist zwingend.

Ausgehend von der vorliegenden Untersuchung ist eine Unterschreitung der bisherigen Empfehlungen zu Abständen zu bewohnten Zonen (Kapitel 1.1) nicht angezeigt.

Über Standortabklärungen sind spezielle Ausbreitungsbedingungen mit komplexer Topographie, Talwind, Kaltluftabfluss, heterogener Landnutzung und lokalen Ausbreitungsbedingungen zu berücksichtigen, um eine Geruchsausbreitung über noch grössere Distanzen ausschliessen zu können.

8. Zusammenfassung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Schweiz sind meist auf Betrieben mit Tierhaltung ergänzt. Anlagen in der Nähe von Wohngebieten können zu Klagen über Gerüche bei Anwohnern führen.

Ziel dieser Untersuchung war es, relevante Flächenquellen im Bereich der Biogasanlagen zu identifizieren und deren Geruchsstoffkonzentration zu quantifizieren. Die Geruchsimmissionen sind mit Blick auf erforderliche Abstände zu bewohnten Zonen mittels systematischer Fahnenbegehungen mit Testpersonen bei Betrieben mit Biogasanlage und Tierhaltung untersucht. Hinweise zur Geruchsminderung sollen als Entscheidungsgrundlage für die Planung und den Betrieb von Anlagen dienen.

Literatur zur Geruchsstoffkonzentration von Einzelquellen liegt zu Abgasen aus Blockheizkraftwerken vor, zu anderen Quellen wie Substraten und Gärrest jedoch nur punktuell Einzelwerte. Empfehlungen zur Geruchsminderung aus der Literatur basieren auf Praxiserfahrungen oder wurden von allgemeinen Reduktionsprinzipien abgeleitet. Die Empfehlungen setzen bei Transport, Anlieferung und Aufbereitung von Substraten, bei der Substratlagerung, -eintrag, Vorgrube, Fermenter, Nachgärer und beim Gasspeicher an. Weitere Hinweise liegen zur Behandlung und Lagerung von Gärrest, zu Blockheizkraftwerken, Wartung, Sauberkeit und Umgang mit Prozessstörungen vor.

Eine Befragung bei 38 Anlagenbetreibern in der Schweiz zeigte auf den Betrieben eine grosse Heterogenität bei der Anlagen- und Verfahrenstechnik sowie eine grosse Substratvielfalt. Als Substrate stehen Hofdünger, Ernterückstände, Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung und Grüngut im Vordergrund. Zu den Flächenquellen im Bereich der Biogasanlage zählen Substrat- und Gärrestlager. Aus dem Bereich der Tierhaltung kommen als Geruchsquellen emittierende Stall- und Auslaufflächen, Futter- und Hofdüngerlager hinzu.

Auf acht Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Tierhaltung erfolgten Erhebungen an 25 Tagen, an jeweils zwei bis vier Terminen pro Betrieb. Bei den Einzelquellen wurden beschreibende Parameter wie die Grösse der emittierenden Oberflächen erfasst. Die Flächen aus dem Bereich der Tierhaltung waren mit Ausnahme eines Betriebes grösser als das Substrat- und Gärrestlager. Bei passiven Quellen erfolgte die Probenahme mit belüfteten Hauben, mit einer Probenahmedauer zwischen zehn und 30 Minuten. Bei homogenen Quellen wurden Einzelproben, bei heterogenen Quellen Mischproben an bis zu drei Probenahmeorten genommen. Die Geruchsstoffkonzentration wurde am Olfaktometer TO8 mit jeweils vier Testpersonen bestimmt. Zu den geruchsintensiven Quellen zählten Festmist von Geflügel, Rind und Pferd, Rasenschnitt, Gemüserüstabfälle, Sickersaft und Gärrest sowie Biogas direkt von der Anlage.

Bei einem Milchviehbetrieb mit Biogasanlage erfolgten Geruchsfahnenbegehungen an drei Tagen während der Sommer- und Übergangszeit. Sechs Testpersonen registrierten in verschiedenen Distanzen zum Betrieb ihre Geruchswahrnehmung. Als beschreibende Parameter wurden zeitgleich u.a. Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst. Die Testpersonen ermittelten an den Positionen nahe zum Betrieb hohe Zeitanteile mit Geruch und mit hohen Geruchsintensitäten. Es zeigte sich, in welchen Distanzen zum Betrieb sowohl eine Abnahme der Zeitanteile mit Geruch als auch eine Abnahme der hohen Intensitätsstufen erkennbar ist. Häufig wurde in der Geruchsfahne Mischgeruch wahrgenommen. Von der Hedonik her wurde Biogasgeruch von den Testpersonen anhand des Polaritätenprofils mit grosser Übereinstimmung als unangenehm eingestuft. Wenn Biogas austrat, war die Geruchsimmission erhöht. Der Austritt von Biogas bei Biogasanlagen ist mit einem genügend grossen Speichervolumen, der Prozessoptimierung und einer regelmässigen Wartung zu vermeiden. Für neue Biogasanlagen ist grosse Sorgfalt bei der Standortwahl geboten.

Die Integration der Ergebnisse der Geruchsstoffkonzentrationen von Einzelquellen und der Abklingkurven aus Fahnenbegehungen bei Betrieben mit Tierhaltung und Biogasanlage in die Empfehlung Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen ist erforderlich, damit belastbare Entscheidungsgrundlagen vorliegen und bereits in der Planungsphase eine Betrachtung der Gesamtanlage möglich wird.

Zur Geruchsminderung gilt es, vor allem bei geruchsintensiven Flächenquellen anzusetzen. Emittierende Oberflächen sind möglichst gering zu halten. Schutz vor Sonne, Regen und Wind sind anzustreben. Flächen mit Sickersaft sind zu vermeiden sowie dieser mit Gefälle rasch abzuleiten. Unnötige Materialbewegungen sind ebenso zu vermeiden. Allenfalls empfiehlt sich bei geruchsintensiven Substraten ein Vermischen mit weniger geruchsintensiven Substraten oder Abdecken. Um den Austritt von Biogas zu vermeiden, ist bei Prozessoptimierung und Wartung anzusetzen. Weiter sind Biogasverluste über die Membran oder Leckagen durch regelmässige Kontrolle und ggf. Ersatz zu verhindern. Im Sinne der Vorsorge ist bei der Standortwahl für neue landwirtschaftliche Biogasanlagen, meist als Ergänzung zu Betrieben mit Tierhaltung, grosse Sorgfalt geboten. Abstände zu Wohngebieten sind ausreichend zu bemessen. Dabei ist eine Gesamtbetrachtung von Biogasanlage und Tierhaltung zwingend. Im Fall von speziellen Ausbreitungsbedingungen, mit komplexer Topographie, Talwind, Kaltluftabfluss, heterogener Landnutzung ist eine Standortabklärung erforderlich, um eine Geruchsausbreitung über noch grössere Distanzen ausschliessen zu können.

9. Literatur

- Agroscope Tänikon u. BUWAL, 2005: Revision FAT-Bericht Nr. 476 - Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen – Entwurf. 7.3.2005. 33 S.
- Angele H.-C., Märki A., Wüthrich N., Membrez Y. u. Tacchini C., 2010: Mandat Biomasse (ohne Holz). BiomassEnergie, Jahresbericht 2009, 25 S.
- Aschmann V., Effenberger M., Gronauer A., Kaiser F., Kissel R., Mitterleitner H., Naser S., Schlattmann M., Speckmair M. u. Ziehfried G., 2007: Grundlagen und Technik. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. 1.1-1.5, Augsburg, 90 S.
- Basler und Partner, 2005: Biogasanlagen in der Landwirtschaft – Leitfaden zur Entscheidungsfindung. Ernst Basler + Partner AG, Zollikon, 13 S.
- Baudisch C., 2008: Aufgaben des Gesundheitsamtes bei der Beurteilung von Stellungnahmen für genehmigungspflichtige Anlagen nach § 4 des BImSchG wie z.B. Abfallbehandlungsanlagen, Biogasanlagen, Biomasseheizkraftwerke, Gärrestlager. Fortbildungsveranstaltung für die Gesundheitsämter 23.4.2008, Präsentation, Güstrow.
- Baumann A.-R., 2006: Geruchsvermeidung bei Biogasanlagen. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft: Emissionen in der Tierhaltung - Sektion Biogas, 5.-7.12.2006, Kloster Banz, 6 S.
- Beck R., 2006: Schwefelwasserstoff- und Ammoniak-Immissionsmessungen an einer Vergärungsanlage für Abfälle und am relevanten Immissionsort vom 23.8.-20.9.2006. 12.12.2006, Präsentation, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Beck R., 2009: Geruchsimmissionen im Umfeld von Abfälle verarbeitenden Biogasanlagen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, S. 13 S.
- Bundesgerichtsentscheid BGE 1C_437/2009, Baubewilligung. Vom 16.6.2010, 8 S.
- Bigatec, 2004: Quellen, Ursachen und Lösungen für Geruchsprobleme bei Biogasanlagen - Ein Erfahrungsbericht. 13. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. 28.-30.1.2004, Präsentation, Leipzig.
- Brun M. u. Völlmecke S., 2008: Geruchsimmissionprognose. uppenkamp und partner, Geruchsimmissionsprognose 13 601 08-1, Ahaus, 57 S.
- Burkhalter R., 2010: Neue Massstäbe gesetzt. Die Grüne, 3, S. 14–17.
- C.A.R.M.E.N. e.V., 2009: Geruchsemissionen an Biogasanlagen erfolgreich vermeiden. 2 S.
- DIN EN 13725, 2003: Luftbeschaffenheit - Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie. Kommission Reinhaltung der Luft, 7/2003, 71 S.
- Ebertsch G., Fiedler A., Beck R., Karrasch T., Zell B. u. Ruttka B., 2011: Materielle Anforderungen an Einrichtung und Betrieb – Immissionsschutz, einschliesslich Klimaschutz. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): Biogashandbuch Bayern – Materialienband Kapitel 2.2.2, Augsburg, 31 S.
- Einfeldt D., 2006: Auf gute Nachbarschaft: Weniger Lärm und Geruch schafft mehr Akzeptanz. 15. Jahrestagung Fachverband Biogas 25.-27. Januar 2006, Präsentation, Freising.
- Faber M., 2012: Explosionsschutz für Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Belange des Immissionsschutzes. Kommission Reinhaltung der Luft, KRdl-Expertenforum Biogasanlagen, 30.10.2012, Bonn, KTBL Schriftenreihe 46, S. 75–89.
- Gubler N., Gazzarin C., Dux D. u. Engeli E., 2007: Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen – Wichtige Einflussfaktoren am Beispiel von zwei Modellanlagen. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, ART-Bericht Nr. 676, Tänikon, 12 S.
- Hunkeler J. u. Stoll J.-M., 2011: Geruchsemissionen aus Biogasanlagen – Geruchsmessungen mittels dynamischer Olfaktometrie. Hochschule für Technik Rapperswil, UMTEC, 09/030, Rapperswil, 61 S.
- Jäger-Urban U., 2006: Leitfaden für die Genehmigung von Biogasanlagen in Oberösterreich. Land Oberösterreich, Abteilung Umwelt- und Anlagentechnik, S. 1–26.
- Kaufmann U., 2012: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2011. Bundesamt für Energie (BFE), 73 S.

- Keck M., Schmidlin A. u. Sager A., 1999: Mehr Geruch von Milchviehställen mit Laufhöfen. Agrarforschung, 6, 1, S. 5–7.
- Keck M., Koutny L., Schmidlin A. u. Hilty R., 2005: Geruch von Schweineställen mit Auslauf und freier Lüftung. Agrarforschung, 12, 2, S. 84–89.
- Keck M., Schmidlin A., Zeyer K., Emmenegger L. u. Schrade S., 2011: Geruchskonzentration und -emission von Milchviehställen mit Laufhof. Agrarforschung Schweiz, 2, 3, S. 114–119.
- Kretschmann R., Rothe F., Poppitz W. u. Moczigemba T., 2012: Abluftreinigung bei BHKW – Erfahrungsbericht. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Sachsen, Schriftenreihe 21, 85 S.
- Landwirtschaftliche Begriffsverordnung vom 1. Juli 2011 (LBV; SR 910.91).
- Liebich T., 2004: Gerüche an Biogasanlagen. Erneuerbare Energien, 5, S. 78–79.
- Liebich T., 2009: Minimierung von Konfliktpotential durch Gerüche an Biogasanlagen. TÜV Nord Umweltschutz GmbH & Co. KG, Hannover, S. 1–10.
- Moczigemba T., Jacob J., Poppitz W., Kath H.-G., Krath H.-G., Kretschmann R. u. Rothe F., 2008: Messprogramm "Geruchsemissionen aus Abgasen von mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW)". Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, Gerüche aus Abgasen bei Biogas-BHKW 35, 125 S.
- Nicolas J., Adam G., Ubeda Y. u. Romain A.C., 2013: Multi-method monitoring of odor emissions in agricultural biogas facilities. In: Proceedings of the 5th IWA conference on odours and air emissions, 4.-7.3.2013, San Francisco, USA, 8 S.
- Plank R., 2009: Biogas-Betreiberschulung: Bewertung der Umweltauswirkungen von Biogasanlagen. 1.09, Präsentation.
- Plätzer M., 2008: Neue Erkenntnisse zur Geruchsproblematik bei Biogasanlagen. 23.10.2008, Präsentation, Brandenburg.
- Plätzer M., 2010: Gutachtliche Stellungnahme zu Geruchsemissionen und nachbarschaftlichen -immissionen im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb der Biogasanlage der Bioenergie Sittensen GmbH & Co. KG Standort Freetz. TÜV Nord, Hannover, S. 1–30.
- Postel J. u. Fischer E., 2010: Emissionsquellen und Minderungsmaßnahmen. Biogas-Schwerpunkt: Erfahrungsberichte, 25.3.2010, Präsentation, Bernburg/Strenzfeld.
- Raumplanungsverordnung vom 28. Juni 2000 (RPV; SR 700.1).
- Reitberger S., 2002: Emissionsminderungsmöglichkeiten bei Biogasanlagen - entlang der Prozesskette der Biogaserzeugung. In: Umweltschutz B. L. f. [Hrsg.]: Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung, 17.10.2002, Augsburg, S. 58–70.
- Richner B. u. Schmidlin A., 1995: Mindestabstände von Tierhaltungsanlagen. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik FAT, FAT Bericht Nr. 476, Tänikon, 16 S.
- Sax M., Schick M., Bolli S., Soltermann-Pasca A. u. Van Caenegem L., 2013: Methanverluste bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Abschlussbericht zuhanden des BFE, 93 S.
- Serafimova K., Steiner R. u. Frantz H., 2008: Landwirtschaftliche Biogasanlagen – Lärm und Geruch vermeiden. Präsentation, Zollikon.
- Ubeda Y., Neyrinck R., Calvet S., López A. u. Nicolas J., 2010: Odour evaluation of a dairy farm with anaerobic digestion. Chemical Engineering Transactions 23, S. 255–260.
- VDI 2010a: VDI-Richtlinie 3475, Blatt 4 - Emissionsminderung Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger. 79 S.
- VDI 2010b: VDI-Richtlinie 3940, Blatt 3 - Bestimmung von Geruchsstoffimmissionen durch Begehung - Ermittlung von Geruchsintensität und hedonischer Geruchswirkung im Feld. 67 S.
- VDI 2010c: VDI-Richtlinie 3940 Blatt 4 - Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung – Polaritätenprofile. 44 S.
- VDI 2011: VDI-Richtlinie 3880 - Olfaktometrie - Statische Probenahme. 48 S.

Völlmecke S., 2007: Quantifizierung der Geruchsemissionen von NAWARO-Biogasanlagen und deren Immissionsrelevanz. In: Gerüche in der Umwelt Innenraum- und Aussenluft, 13./14.11.2007, Bad Kissingen, VDI-Berichte 1995, Kommission Reinhaltung der Luft VDI, S. 203–210.

Weber R., Reinhold G. u. Georgi B., 2006: Informationen zum Immissionsschutz bei Biogasanlagen. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Schriftenreihe der TLUG, Jena, 21 S.

10. Anhang

Tabelle 20: Anforderungen an die Testpersonen nach DIN EN 13725 (2003)

Anforderungen an Testpersonen allgemein	<ul style="list-style-type: none">– Mindestalter 16 Jahre– Geprüftes Geruchsprofil mit Referenzstoff n-Butanol– Sollten für die gesamte Messkampagne zur Verfügung stehen
Anforderungen an Testpersonen am Erhebungstag	<ul style="list-style-type: none">– Gewissenhafte Aufgabenerfüllung– Ab 30 Minuten vor einer olfaktometrischen Messung sowie während einer Messung nicht essen, rauchen, trinken (ausser Wasser)– Keine Verwendung von Parfums, Deos oder anderen stark riechenden Körperpflegemitteln– Testpersonen mit Erkältung oder anderen den Geruchssinn beeinträchtigenden Unpässlichkeiten sind von einer Messung auszuschliessen– Während der Messung kein Austausch der Ergebnisse zwischen den Testpersonen

Unser Dank gilt...

- ... den Praxisbetrieben für ihre Kooperationsbereitschaft bei der Befragung.
- ... den Erhebungsbetrieben für die gute Zusammenarbeit bei der Beprobung der Flächenquellen und bei den Fahnenbegehungen.
- ... den Testpersonen für ihren wertvollen Einsatz bei den Fahnenbegehungen und am Olfaktometer.
- ... den Versuchstechnikern Hans Lüthi, Urs Marolf und Martin Schlatter für ihre tatkräftige Unterstützung bei den Erhebungen.