

# Dichtheitsprüfung an Biogasbehältern mit Membrandichtung

Roland Stehle, Heilbronn

<b>1</b>	<b>ARTEN VON BIOGASBEHÄLTERN MIT MEMBRANDICHTUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REGELWERKE UND NORMEN ZUR DICHTHEITSPRÜFUNG</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>DICHTHEITSPRÜFUNG AN BIOGASBEHÄLTERN MIT GEWICHTSBELASTUNG</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>DICHTHEITSPRÜFUNG AN BIOGASBEHÄLTERN MIT DRUCKLUFTBELASTUNG</b>	<b>6</b>

## 1 ARTEN VON BIOGASBEHÄLTERN MIT MEMBRANDICHTUNG

Biogasbehälter mit Membrandichtung gibt es in einer großen Variantenzahl. Sie unterscheiden sich einerseits in ihrer Funktionsart:

- Niederdruckgasbehälter mit Gewichtsbelastung
- Niederdruckgasbehälter mit Druckluftbelastung
- Druckloser Gasbehälter

Andererseits unterscheiden sie sich in der Bauform des Gehäuses. Die Form des Gehäuses ist nicht zwingend mit der Funktionsart verbunden. Einige Beispiele von Gasbehältergehäusen möchte ich hier zeigen:

- Gasdicht verschweißte Stahlbleche
- Gasdicht verschraubte Stahlbleche
- Durch falzen verbundene Stahlbleche
- Stahlskelettkonstruktion mit Verkleidung
- Äußeres Stahlskelett mit Membranhülle
- Erdversenktes Betonbauwerk
- Doppelmembranbehälter
- Landwirtschaftliche Biogasbehälter

So vielfältig wie die Variantenzahl der Biogasbehälter ist, so vielfältig sind die Probleme bei deren Dichtheitsprüfung.

## 2 REGELWERKE UND NORMEN ZUR DICHTHEITSPRÜFUNG

Die Grundlagen zur Dichtheitsprüfung eines Biogasbehälters sind in Anhang A.2 des Merkblatts DWA-M 376 „Sicherheitsregeln für Biogasbehälter mit Membrandichtung“ beschrieben.

Die Technische Information 4 „Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften) enthält Angaben zur zulässigen Gaskonzentration in der Abluft landwirtschaftlicher Biogasbehälter.

Ein hoch aktuelles Merkblatt des Sachverständigenkreises Biogas „Merkblatt zur Überprüfung der Gasdichtigkeit von Biogastraglufthauben“ macht weitergehende Angaben zur Durchführung von Dichtheitsprüfungen an Biogasbehältern landwirtschaftlicher Anlagen.

Ein Niederdruckgasbehälter mit Gewichtsbelastung erfüllt die entscheidende Prüfbedingung der Norm DIN EN 1779 „Dichtheitsprüfung“. An der zu prüfenden Oberfläche liegt eine Druckdifferenz an. Durch die Druckdifferenz wird eine Strömung des Prüfgases durch eine eventuell vorhandene Leckstelle erzeugt.

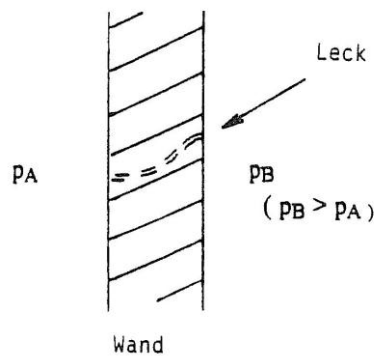


Bild 1

Leckstellen können an allen das Gas einschließenden Oberflächen auftreten. Dies sind die Gehäuseteile und deren Verbindungen z. B. die Schweißnähte oder Schraubverbindungen, die Membran und deren Abdichtung zum Gehäuse sowie die Flanschdichtungen. Insbesondere die Membran weist eine nicht zu vernachlässigende Durchlässigkeit für Gas auf. Letztendlich kann ein Biogasbehälter nicht absolut dicht sein sondern nur technisch dicht. Das heißt, ein gewisser Gasverlust des Gasbehälters ist zulässig.

Die Prüfung der Gasdurchlässigkeit der Membran erfolgt im Labor nach der Norm DIN 53380 Teil 1 oder 2. Die Prüfapparaturen sind hier abgebildet.

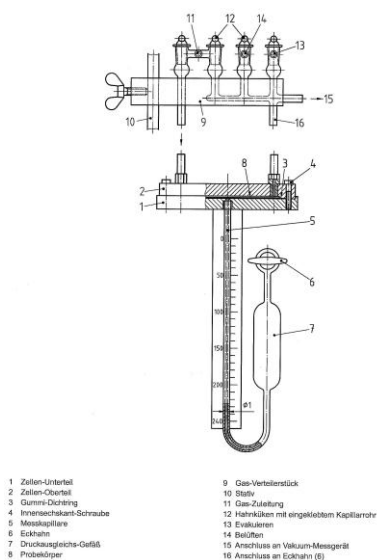
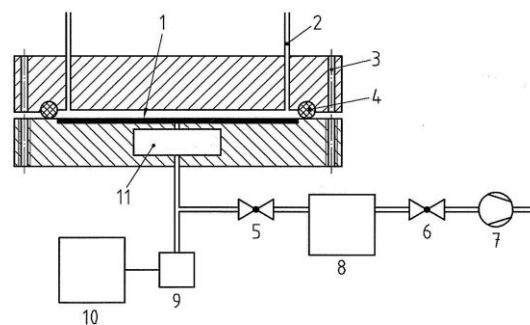


Bild 2



## Legende

- |   |                   |
|---|-------------------|
| 1 sandgestrahlte Messfläche mit Probekörper | 7 Vakuumpumpe     |
| 2 Messgas Zu- und Ableitung                 | 8 Zusatzvolumen   |
| 3 Halteschrauben                            | 9 Druckdetektor   |
| 4 O-Ringdichtung                            | 10 Auswertesystem |
| 5 Ventil 1                                  | 11 Messvolumen    |
| 6 Ventil 2                                  |                   |

Bild 3

Die Prüfkammern sind in beiden Teilnormen sehr ähnlich aufgebaut. Das Probestück der Membran liegt auf der aufgerauten Prüffläche des Unterteils der Prüfkammer. Der Außenrand ist zur Abdichtung glatt. Das Oberteil der Prüfkammer wird dicht aufgeschraubt.

Der Hohlraum im Prüfkammeroberteil wird vom Prüfgas unter Atmosphärendruck durchströmt.

Im Unterteil erzeugt eine Vakuumpumpe einen Unterdruck. Die Höhe des Unterdrucks muss der Gasdurchlässigkeit des Prüfstücks angepasst werden. Das heißt, je geringer die Gasdurchlässigkeit ist, desto höher ist die Prüfdruckdifferenz.

Die Prüfdruckdifferenz erzeugt eine Kraft die das Prüfgas durch die Mikroporen der Membran drückt.

In der Teilnorm 1 wird die Gasdurchlässigkeit durch Änderung des Volumens unter der Prüfkammer ermittelt. In der Teilnorm 2 durch die Änderung des Drucks.

Die Gasdurchlässigkeit wird in  $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  angegeben, sodass für einen Biogasbehälter der Gasverluststrom durch die Membran berechnet werden kann:

$$\text{Gasverluststrom} = \text{Gasdurchlässigkeit} \cdot \text{Membranfläche} \cdot \text{Prüfdruck} \quad (1)$$

Die Flächen der Membranen die in Niederdruckgasbehältern typischer Größe von 100 bis 5000  $\text{m}^3$  Inhalt eingebaut sind liegen im Bereich von 50 – 500  $\text{m}^2$ . Mit Betriebsdrücken von 20 – 50 mbar und einer Gasdurchlässigkeit von maximal 1.000  $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  beträgt der Gasverluststrom durch die gesamten Membran infolge deren Gasdurchlässigkeit 1 – 25 l/d. Dieser Gasverluststrom ist zu gering um in der Praxis an Biogasbehältern der genannten Größe nachweisbar zu sein.

Relevante Gasverluste können an Biogasbehältern also nur durch Leckstellen verursacht werden. Um den Gasverluststrom durch Leckstellen zu ermitteln haben wir an einem technisch dichten Behälter definierte Bohrungen angebracht. Die Versuchsergebnisse sind:

Bohrung $\varnothing$	Leckagefläche	Prüfdruck	Gasverlust	Prüfdruck	Gasverlust
1,0 mm	0,79 $\text{mm}^2$	18,7 mbar	2,81 $\text{m}^3/\text{d}$	35,7 mbar	3,90 $\text{m}^3/\text{d}$
1,5 mm	1,77 $\text{mm}^2$	18,7 mbar	5,88 $\text{m}^3/\text{d}$	35,7 mbar	8,40 $\text{m}^3/\text{d}$
2,0 mm	3,14 $\text{mm}^2$	18,7 mbar	10,88 $\text{m}^3/\text{d}$	35,7 mbar	15,71 $\text{m}^3/\text{d}$

**Mittelwert Gasverluststromdichte bei 20 mbar: 3,2  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{mm}^2)$**

**Die gesamte Membranfläche entspricht einer Leckstellenfläche < 0,01  $\text{mm}^2$**

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Gasverluststrom über die gesamte Membranfläche vernachlässigbar ist gegenüber dem Gasverluststrom durch eine Leckstelle mit einer Fläche weit unter einem Quadratmillimeter.

### 3 DICHTHEITSPRÜFUNG AN BIOGASBEHÄLTERN MIT GEWICHTSBELASTUNG

In Anhang A.2 des Merkblatts DWA-M 376 wird zum Nachweis der technischen Dichtheit zwischen einer unmittelbaren und einer mittelbaren Prüfung unterschieden.

Die Durchführung der unmittelbaren Prüfung erfordert den Nachweis, dass die gesamte Oberfläche des Biogasbehälters frei von Leckstellen ist. Als Prüfverfahren hierzu eignen sich die Benetzung der Oberfläche mit schaumbildenden Mitteln oder die Detektion des austretenden Prüfgases mit einem geeigneten Gassensor.

Eine Leckanzeige mit schaubildenden Mittel zeigt Bild 4:



**Bild 4**

Das Prüfverfahren ist hoch sensibel und geeignet kleinste Leckstellen zu detektieren. Aus der Geschwindigkeit mit der sich der Schaumteppich bildet kann der Gasverluststrom abgeschätzt werden.

Zur Durchführung des Dichtheitsnachweises mit schaubildenden Mitteln oder mit einem Gassensor muss die Oberfläche unter den Prüfbedingungen uneingeschränkt zugänglich sein. Die Zugänglichkeit der Oberfläche ist aber nur bei den wenigsten Bauformen von Biogasbehältern gegeben. Möglich ist die Durchführung der unmittelbaren Dichtheitsprüfung z. B. bei dieser Bauform:



**Bild 5**

Die Mehrheit der auf Kläranlagen eingesetzten Biogasbehälter weist jedoch nicht zugängliche Oberflächen auf, zum Beispiel ein auf dem Fundament aufliegendes Bodenblech. Oder der Biogasbehälter ist einfach zu groß, um die unmittelbare Dichtheitsprüfung anzuwenden.

Bild 6 zeigt ein Beispiel:



**Bild 6**

Wenn eine unmittelbare Dichtheitsprüfung nicht möglich ist, muss die technische Dichtheit durch eine mittelbare Prüfung nachgewiesen werden. Das heißt es muss nachgewiesen werden, dass der Gasverluststrom eine zulässige Grenze nicht übersteigt.

Der zulässige Gasverluststrom (Leckagerate) wird in Anhang A.2 des Merkblatts DWA-M 376 mit 2‰ des Nenninhalts pro Tag angegeben. Abhängig vom Nenninhalt des Biogasbehälters können somit Leckstellen erkannt werden, die entweder einzeln oder in ihrer Summe die Fläche von 0,2 - 3 mm<sup>2</sup> übersteigen.

In der Praxis wird zur Prüfung der technischen Dichtheit der Biogasbehälter mit Luft oder einem Prüfgas gefüllt. Danach wird der Biogasbehälter dicht verschlossen und die Abnahme des Prüfgasvolumens über die Prüfzeit gemessen.

Der Biogasbehälter ist während der Prüfung den äußeren Witterungseinflüssen ausgesetzt. Eine Erwärmung durch Sonneneinstrahlung führt zur Ausdehnung des Volumens, eine Änderung des umgebenden Luftdrucks führt zur Kompression oder Ausdehnung des Volumens. Dieses Verhalten wird durch die Zustandsgleichung von Gasen beschrieben. Hieraus abgeleitet ergibt sich für die Abnahme des Volumens:

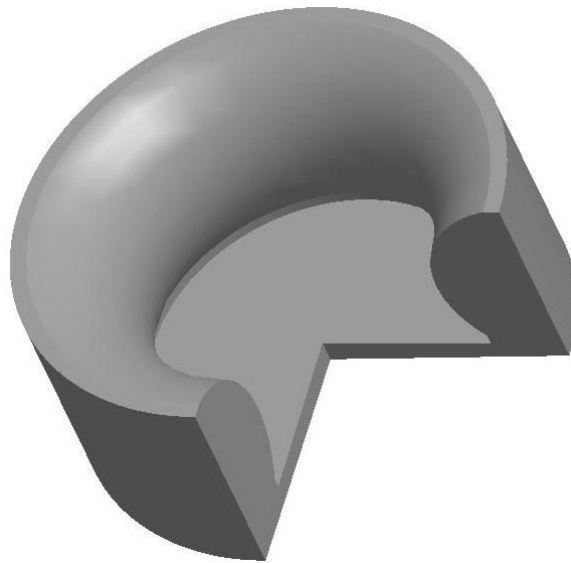
$$\Delta V_N = V_A \cdot p_A/p_N \cdot T_N/T_A - V_E \cdot p_E/p_N \cdot T_N/T_E \quad (2)$$

Während die Messung des Luftdrucks noch einfach durchzuführen ist, kann die Messung der Temperatur mit großen Messfehlern behaftet sein. Sobald der Biogasbehälter durch Sonneneinstrahlung einseitig erwärmt wird, kann eine einheitliche Temperatur innerhalb des Prüfgasvolumens nicht mehr erwartet werden. Das Merkblatt DWA-M 376 empfiehlt daher an sonnigen Tagen den Start und das Ende der Messung vor Beginn der Sonneneinstrahlung am Morgen vorzunehmen. Die Messung wird durch eine dazwischen liegende Erwärmung oder Abkühlung des Biogasbehälters nicht beeinträchtigt.

Ein messtechnischer Vorteil ist es, die Messung an einem nur mit geringem Volumen befüllten Biogasbehälter vorzunehmen. Dies ist möglich, da auch bei geringem Füllstand alle zu prüfenden Oberflächen mit dem Prüfgasdruck belastet sind. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die durch die äußeren Bedingungen verursachten Volumenänderungen proportional mit der Verringerung des Prüfgasvolumens abnehmen und somit die Abnahme des Füllvolumens durch den Gasverluststrom mit höherer Genauigkeit gemessen werden kann.

Die Bestimmung des Prüfgasvolumens ist in diesem Zustand jedoch nicht einfach wie diese Darstellung des Prüfgasvolumens zeigt.

Das Bild stellt die das Gasvolumen begrenzenden Flächen des Biogasbehältermantels, der Belastungsscheibe und der Membran dar.



**Bild 7**

Die Volumenberechnung dieses Körpers mit Mitteln der Stereometrie ist schwierig und nur näherungsweise möglich. Mithilfe eines 3-D Konstruktionsprogramms ist die Berechnung dagegen schnell und mit hoher Genauigkeit durchführbar.

Die Ungenauigkeit der Temperaturmessung ist der dominierende Fehler des Verfahrens. Die im Merkblatt angegebene zulässige Leckagerate von 2‰ des Nenninhalts pro Tag ist so gewählt, dass im Allgemeinen ein verlässliches Ergebnis in längstens 24 Stunden erzielt werden kann.

Mit diesen Maßnahmen ist ein Nachweis der technischen Dichtheit des Biogasbehälters entsprechend der Vorgaben des Merkblatts DWA-M 376 möglich.

Nach bestandener Dichtheitsprüfung kann der Biogasbehälter mit dem Zertifikat „technisch dicht“ versehen werden.

Lautet das Prüfergebnis „nicht technisch dicht“ beginnt eine schwierige Suche nach einer sehr kleinen Leckstelle in einem sehr großen Gasbehälter.

#### **4 DICHTHEITSPRÜFUNG AN BIOGASBEHÄLTERN MIT DRUCKLUFTBELASTUNG**

Nun wenden wir uns der schwierigeren Aufgabe zu, die Dichtheit eines Biogasbehälters mit Membrandichtung ohne Prüfdruck nachzuweisen. Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung der Norm DIN EN 1779 ist ohne Prüfdruck nicht erfüllt.

Der Sachverständigenkreise Biogas hat im März diesen Jahres ein Merkblatt zur Überprüfung der Gasdichtigkeit von Biogastraglufthauben vorgestellt, das eine Lösung für dieses Problem aufzeigen möchte.

Die im Merkblatt vorgestellte Prüfmethode möchte ich im Folgenden diskutieren.



Zentraler Punkt im Merkblatt ist die Gleichung:

$$\dot{V} = \text{Membrankonstante} * A * (p_1 - p_2) \quad (3)$$

mit  $(p_1 - p_2) = 0,557 \text{ bar}$

Gleichung (3) ist analog zu Gleichung (1) aufgebaut. In beiden Gleichungen ist der Gasverluststrom gleich dem Produkt aus der Gasdurchlässigkeit der Membran, deren Fläche und einer Druckdifferenz. Im Merkblatt des SVK Biogas wird erläutert dass die Druckdifferenz durch den Partialdruck des Gases erzeugt wird und das Gas infolge Diffusion die Membran durchdringt.

Den in meinem Vortrag bereits erwähnten Begriffen Druck, Partialdruck und Diffusion möchte ich noch einen weiteren hinzufügen, die Permeation. Zum besseren Verständnis der Begriffe möchte ich mit Ihnen einen kurzen Exkurs in die Physik der Gase machen.

Zuerst betrachten wir eine mit Gas gefüllte Zelle.

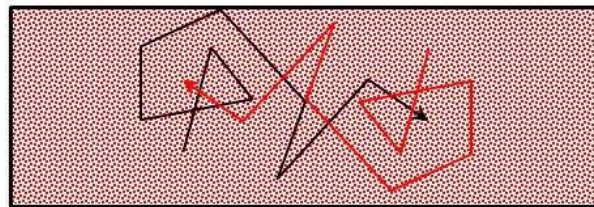


Bild 8

Die Moleküle des Gases sind in ständiger Bewegung und stoßen gegeneinander. Bekannt ist dies als brownsche Molekularbewegung. Im mikroskopischen Maßstab betrachtet ändert jedes Molekül ständig seine Position im Raum. Im makroskopischen Maßstab ist die Summe über die Bewegungen aller Moleküle jedoch zu jedem Zeitpunkt exakt 0. Von außen ist keine Bewegung zu beobachten.

Die Häufigkeit der Stöße nimmt zu mit der Abnahme des Wegs zwischen den Stößen und Zunahme der Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Das heißt mit Zunahme der Dichte und der Temperatur des Gases.

Die Stöße der Gasmoleküle gegen eine Wand verursachen eine Kraft gegen die Wand. Diese Kraft ist der messbare Gasdruck und hiervon abgeleitet der Differenzdruck und der Prüfdruck.

Nun unterteilen wir die Zelle mit einer Membran die aufgrund von Mikroporen nicht vollständig dicht ist.

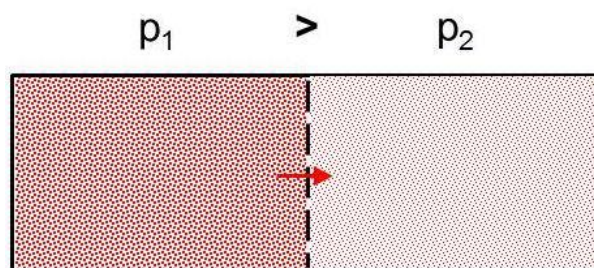
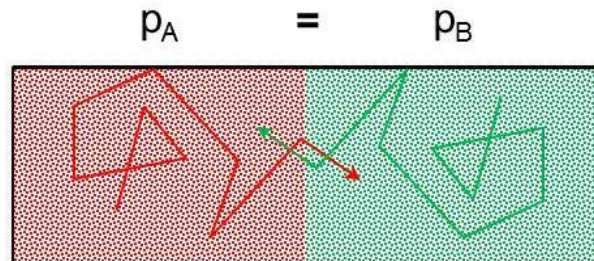


Bild 9

Der Druck in den beiden Zellen soll nicht gleich sein damit ein Differenzdruck auf die Membran wirkt. Folge hiervon ist ein Gasstrom gemäß Gleichung (1) von der Zelle mit höherem Druck in die Zelle mit niedrigerem Druck.

Dieser Prozess der Durchdringung eines Gases durch einen Festkörper infolge eines Differenzdrucks wird Permeation genannt.

In einem weiteren Experiment füllen wir in die nicht mit einer Membran unterteilte Zelle zwei verschiedene Gase, die sich jeweils in einer Hälfte der Zelle befinden sollen. Natürlich herrscht dann in der gesamten Zelle derselbe Druck.



**Bild 10**

Aufgrund der Druckverhältnisse besteht kein Anlass zu einer Änderung des Zustands in der Zelle. Trotzdem wird man beobachten, dass sich die beiden Gase gegenseitig mischen bis letztendlich beide Gase gleichmäßig in der Zelle verteilt sind.

Ursache dieses Prozesses ist die brownische Molekularbewegung. Ein Molekül wird sich während seiner ständigen Bewegung mit höherer Wahrscheinlichkeit aus dem Raum höherer Konzentration in den Raum geringerer Konzentration bewegen als in umgekehrte Richtung. Erst wenn die Gleichverteilung erreicht ist sind alle Bewegungsrichtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit versehen und ein stabiler Zustand erreicht.

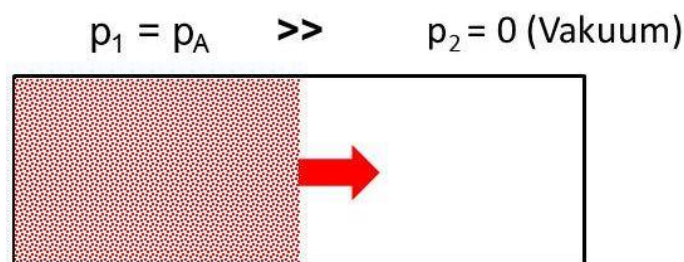
Von außen betrachtet sieht es aus, als ob die Gase sich aufgrund eines Differenzdrucks bewegen, allerdings mit sehr viel geringerer Geschwindigkeit als unter der Wirkung eines realen Differenzdrucks.

Der diesen Prozess bewirkende Druck wird daher Partialdruck genannt, die Proportionalitätskonstante ist die Diffusionskonstante.

Die Geschwindigkeit des Gastransports durch Diffusion ist gegenüber dem Gastransport durch einen Differenzdruck sehr gering.

Dies kann man sehr gut verdeutlichen durch folgenden Gedankenversuch:

Anstelle des zweiten Gases befindet sich in der Zelle nichts, das heißt ein Vakuum. Der Druck des Gases ist genau so hoch wie zuvor sein Partialdruck.



**Bild 11**

Das Gas wird sich im Gegensatz zum zuvor geschilderten langsamen Diffusionsprozess nun in extrem kurzer Zeit gleichmäßig im Raum verteilen.

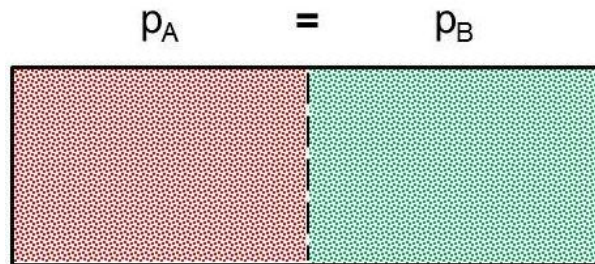
Obwohl Druck und Partialdruck in der gleichen Maßeinheit gemessen werden sind sie physikalisch unterschiedlich zu bewerten.



Nun zurück zum Merkblatt des SVK Biogas.

In Gleichung (3) wird die mit einem Differenzdruck nach DIN 53380 gemessene Gasdurchlässigkeit der Membran mit der Partialdruckdifferenz an der Membran multipliziert. Dies ist falsch wie wir gesehen haben und entsprechend falsch sind auch alle weiteren hieraus gezogenen Schlüsse.

Korrekt wäre es, die Diffusionskonstante der Membran in der Weise zu bestimmen, dass auf einer Seite der Membran Methan und der anderen Seite Luft unter gleichem Druck ansteht.



**Bild 12**

Allerdings erwarte ich bei diesem Versuch einen nachweisbaren Gasdurchgang erst nach sehr langer Messzeit und eine entsprechend geringe Diffusionskonstante des Methans durch die Membran. Es scheint, dass diese Messung bisher noch nicht durchgeführt wurde, denn Messwerte habe ich nicht gefunden.

Tatsächlich wird in der Abluft von Biogastraglufthauben häufig eine nicht unerhebliche Methankonzentration gemessen. Die Ursache der Methankonzentration kann nicht, wie im Merkblatt angegeben, die Diffusion von Methan durch die Membran sein. Der auf diesem Weg mögliche Gasstrom ist viel zu gering um die Ursache der messbaren Methankonzentration zu sein.

Ein denkbarer Weg für den Methanübertritt in den Zwischenmembranraum ist die Diffusion an Grenzflächen an denen Methan in unmittelbarem Kontakt mit der Stützluft steht. Diese Grenzflächen sind Löcher in der Membran.

Bei einer Begutachtung nach einem Unfall einer Biogasanlage wurden Löcher dieser Größe an der Biogasspeichermembran festgestellt:



**Bild 13**

Wir haben gesehen, dass das Merkblatt des SVK Biogas an entscheidender Stelle einen schwerwiegenden Fehler enthält. Folge ist, dass mit dem im Merkblatt geschilderten Verfahren nicht die Gasdichtigkeit von Biogastraglufthauben geprüft werden kann.

Die diesbezügliche Aussage im Merkblatt DWA-M 376:

**„Eine Prüfung der technischen Dichtigkeit kann in der Regel aufgrund der Bauart solcher Behälter nicht durchgeführt werden“**

ist nicht widerlegt sondern betätigt worden.

Die Dichtheitsprüfung hat einen hohen sicherheitstechnischen Stellenwert. Sobald die Biogasspeichermembran einer Biogastraglufthaube an die Grenze ihres Füllstands gerät wird durch nicht erkannte Leckstellen bei Überfüllung Biogas in großer Menge in den Stützluftraum gedrückt oder bei vollständiger Entleerung Luft in den Biogasraum. Folge ist die Bildung eines zündfähigen Gemischs.

In Fachkreisen ist bekannt, dass Biogasanlagen ein hohes Unfallrisiko aufweisen. Das Unfallrisiko ist wesentlich höher als das vergleichbarer Kläranlagen.

Ich möchte die Vermutung äußern, dass das falsche Verständnis der Eigenschaften von Gasen zu einer falschen Beurteilung der Sicherheit von Biogasanlagen führt. Die angenommene Sicherheit ist tatsächlich nicht vorhanden. Dies könnte der Grund für einige schwere Explosionsunfälle mit Biogasanlagen sein.

Fermenter mit Biogastraglufthauben werden seit vielen Jahren gebaut. Die Diskussion um ein geeignetes Verfahren zur Prüfung der technischen Dichtigkeit wird seit über 10 Jahren in Fachausschüssen der DWA, dem Fachverband Biogas und anderen geführt.

In dieser Zeit konnte keine anerkannte praktikable Methode zur Feststellung der Eigenschaft „technisch dicht“ für Biogastraglufthauben gefunden werden, wie im Entwurf des Merkblatts zu lesen war. Nun ist es an der Zeit die Frage zu stellen ob der Bau und der Betrieb dieser Anlagen weiterhin zu verantworten ist.

Alternative, prüfbare und daher sichere Technologien die auf Kläranlagen eingesetzt werden, stehen zur Verfügung.

#### **Bildquellennachweis:**

Bild 1: DIN EN 1779

Bild 2: DIN 53380 Teil 1

Bild 3: DIN 53380 Teil 2

Bild 4: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 5: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 6: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 7: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 8: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 9: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 10: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 11: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 12: Eisenbau Heilbronn GmbH

Bild 13: DAS-IB GmbH Tagungsbuch 7. April 2008 ISBN-Nr.: 3-938775-07-6