

1. Aufgabe

Bei der Gärfutterbereitung werden durch das Verdichten und Abdecken der Futterstöcke und in Hochsilos auch durch gasdichte Bauausführung anaerobe Bedingungen geschaffen. Physikalischer Gasaustausch bewirkt jedoch, daß die beim Gärprozeß entstehenden Gärgase abgeführt, gleichzeitig Sauerstoff aus der Atmosphäre zugeführt und damit die Konservierungsverluste erhöht werden. Im Porenvolumen der Futterschüttungen bleiben daher nur anaerobe Bedingungen erhalten, wenn der physikalische Gasaustausch wirksam eingeschränkt wird. Seine Kenntnis gestattet eine Bewertung der Lagerungsbedingungen von Gärfutter.

Aus Modellvorstellungen über den physikalischen Gasaustausch sind ein Meßverfahren zu entwickeln und Messungen an Laborbehältern und Formsteinsilos durchzuführen.

2. Modelle des Gasaustausches

Das Aufstellen eines Modells des Gasaustausches durch mathematische Beschreibung der Partialdruckänderungen von O₂, CO₂ und anderer Gärgaskomponenten, die sich während der Gärperiode und danach im Porenvolumen vollziehen, bereitet außerordentlich große Schwierigkeiten. Es wären dazu Annahmen über die Erzeugung bzw. Absorption dieser Gase während des Gärprozesses notwendig, d. h. die Geschwindigkeit der chemischen Umsetzungen müßte bekannt sein. Daher werden Modelle des Gasaustausches aufgestellt durch mathematische Beschreibung des irreversiblen Konzentrationsausgleiches eines inerten Indikatorgases, das an chemischen Umsetzungen nicht teilnimmt. Die Geschwindigkeit des Konzentrationsausgleiches dieses Indikators wird als Maß für den physikalischen Gasaustausch angesehen. Damit wird das in einem Gärfutterbehälter eingelagerte Gut als Medium aufgefaßt, das durch einen Diffusionskoeffizienten zu charakterisieren ist. In diesem Medium verlaufen keine chemischen Umsetzungen, wird weder Gas erzeugt noch absorbiert. Konzentrationsänderungen des Indikator-

gases entstehen nur durch physikalischen Gasaustausch über Grenzflächen.

Bei Gasaustausch über freie Grenzflächen wird der Ausgleichsvorgang durch Lösungen der Diffusionsgleichung beschrieben [1] [2]. Eine zur Zeit $t = 0$ im Porenvolumen konstante Indikatorkonzentration $c(x, 0) = c_0$ fällt im Zeitablauf auf den Wert Null ab, wobei für sehr große Zeiten der Abfall exponentiell (bei beliebigem x) erfolgt (Bild 1a). Der Exponent α_a hängt nur vom Diffusionskoeffizienten D (Maß für den Porenanteil) und der Höhe l des Behälters ab. Über die Bestimmung des Exponenten α_a kann im Labormaßstab der Einfluß des Verdichtens auf den Gasaustausch untersucht werden, wenn in geeigneter Weise ein Indikatorgas in das Porenvolumen eingebracht und seine Konzentration im Zeitablauf gemessen wird.

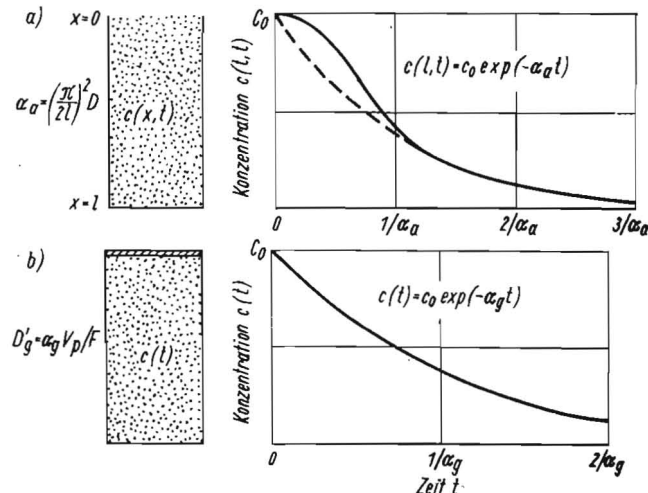
Das Modell des Gasaustausches über freie Grenzflächen ist auf reale Gärfutterbehälter nicht anwendbar, denn die Futterstöcke stehen infolge der zusätzlichen Abdeckung nur indirekt im Kontakt mit der Atmosphäre. Der Gasaustausch wird dadurch eingeschränkt. Für die exakte Lösung der Diffusionsgleichung müßten entsprechende Randbedingungen gewählt werden [3]. In stark vereinfachter Weise kann für den Gasaustausch an der Begrenzungsfläche eine Bilanz aufgestellt werden, ohne die Diffusion zu berücksichtigen, aus der sich ein rein exponentieller Verlauf der Indikatorkonzentration im Porenvolumen des Futterstockes ergibt (Bild 1b). Der Exponent α_g ist durch die Durchlässigkeit D'_g des Abdeckmaterials und das Verhältnis von Grenzfläche F und Porenvolumen V_p bestimmt.

Während die bisher genannten Modelle Untersuchungen im Labormaßstab zugrunde zu legen sind, dient das folgende Modell der Beschreibung des Gasaustausches an Hochsilos (Bild 2). Dort erfolgt der physikalische Austausch nicht direkt mit der Atmosphäre, sondern mittelbar über das nach dem Ende der Beschickung über dem Futterstock freibleibende Volumen. Die Geschwindigkeit des indirekten Gasaustausches ist durch einen Exponenten α_f bestimmt. Anschaulicher ist die Angabe der Austauschrate $\alpha_f V$, wobei V das freie Volumen bedeutet. Diese Größe ist als Maß für die Dichtheit des Baukörpers anzusehen und auch beim Aufstellen einer Gesamtbilanz, also für Aussagen über den Gärverlauf heranzuziehen (Bild 3).

Bild 1. Konzentrationsabnahme eines inerten Indikators in Gärfutterbehältern

a) Freie Grenzfläche: Die Abnahme der orts- und zeitabhängigen Konzentration $c(x, t)$ erfolgt für große Zeiten in guter Näherung exponentiell (----- wahrer Verlauf bei $x=l$, - - - - - Näherung). Der Exponent α_a ist unabhängig von der Koordinate x . Er hängt ab von der Geometrie des Behälters nur über dessen Höhe l und über den Diffusionskoeffizienten D vom Porenanteil bzw. der Dichte des eingelagerten Gutes

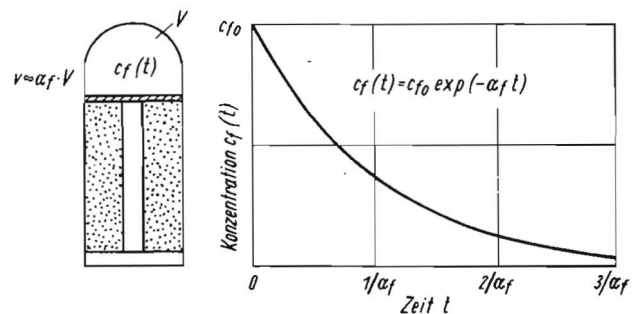
b) Abgedeckte Grenzfläche: Die Abnahme der nur zeitabhängigen Konzentration $c(t)$ erfolgt exponentiell. Aus dem Exponenten α_g , dem Porenvolumen V_p und der Grenzfläche F berechnet sich die Durchlässigkeit D'_g des Abdeckmaterials



3. Meßverfahren

Den entwickelten Modellvorstellungen entsprechend wurde als Indikator das radioaktive Edelgasisotop Kr-85 ausgewählt. Es erfüllt die gestellten Anforderungen; die Messung seiner Konzentration ($< 10^{-4}$ Ci/m³) bereitet wegen der

Bild 2. Konzentrationsabnahme eines inerten Indikators im freien Volumen von Hochsilos. Die Abnahme der zeitabhängigen Konzentration $c_f(t)$ erfolgt exponentiell. Aus den Exponenten α_f und dem freien Volumen berechnet sich das Maß für die Dichtheit des Baukörpers, die Austauschrate $\alpha_f V$



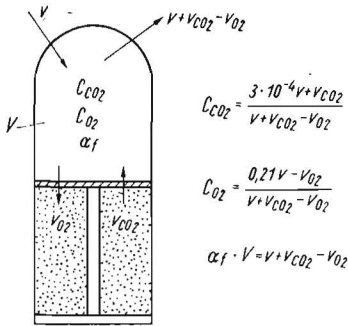


Bild 3. CO₂- und O₂-Bilanzen bei Gasaustausch im freien Volumen von Hochsilos.

Ein Teil des aus der Atmosphäre in das freie Volumen V_f fließenden Luftstroms v geht als O₂-Strom $v \cdot c_{O_2}$ in das Gärfutter über. Aus dem Gärfutter fließt ein CO₂-Strom $v \cdot c_{CO_2}$ in das freie Volumen. Daraus berechnet sich die Austauschrate $\alpha_f V$. Die sich einstellenden O₂- bzw. CO₂-Konzentrationen c_{O_2} bzw. c_{CO_2} hängen von der Austauschrate ab. Sie sind bei großer Austauschrate vergleichbar mit den entsprechenden Konzentrationen der Atmosphäre, die zu 21% bzw. 0,03% angenommen wurden.

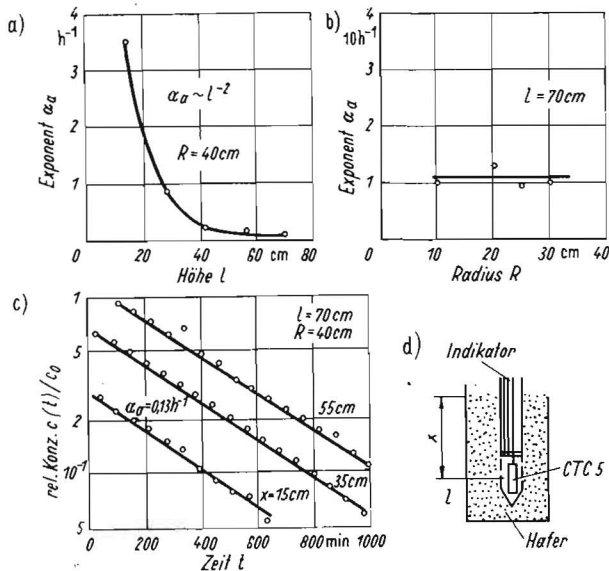


Bild 5. Gasaustausch an der Modellschubstanz Hafer ($\rho = 0,51/m^3$).
 a) Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gasaustausches α_a von der Behälterhöhe l
 b) Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gasaustausches α_a vom Behälterradius R
 c) Abhängigkeit der Indikatorkonzentration von der Zeit (halblogarithmische Darstellung). Parameter: Einstichtiefe x der Gassonde
 d) Skizze der Meßanordnung

hohen Nachweisempfindlichkeit radioaktiver Nuklide keine Schwierigkeit. Dadurch sind kontinuierliche Messungen in Gärfutterbehältern direkt möglich, und auf eine Probenentnahme kann verzichtet werden. Kr-85 besitzt eine günstige Halbwertszeit ($T_{1/2} = 10,5$ a) und einen relativ niedrigen Preis (550,— M/2,5 Ci). Es hat sich aus diesen Gründen bereits bei der Lösung von ähnlichen Meßproblemen bewährt [4].

Es mußte eine spezielle Sonde konstruiert werden, mit der es möglich ist, den Indikator in das Porenvolumen von Futterschüttungen zu drücken und nach Ablauf eines inneren Ausgleichsvorganges Messungen der Geschwindigkeit des physikalischen Gasaustausches, der sich durch die Grenzflächen vollzieht, durchzuführen. Die Forderungen führten zur Konstruktion einer Gassonde (Bild 4).

Für die Messung des Gasaustausches zwischen dem freien Volumen oberhalb des Futterstockes eines Hochsilos und der Atmosphäre ist keine spezielle Meßanordnung nötig. Die Indikatorzugabe, d. h. die Markierung des freien Volumens

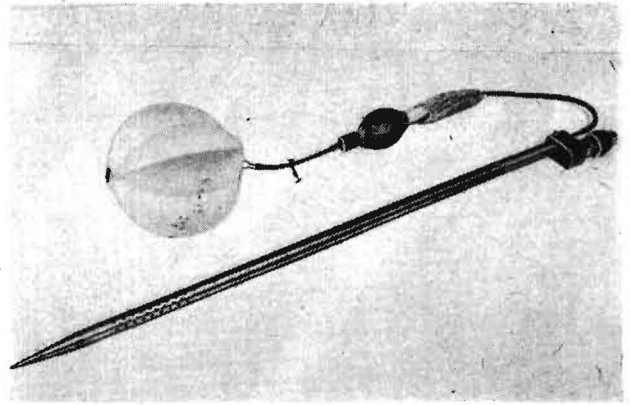


Bild 4. Gassonde. Der Indikator wird aus der Vorratsblase über eine im Innern des Sondenrohrs verlegte Gasleitung in die Futterschüttung gedrückt. Die Besonderheit der Konstruktion besteht darin, daß der Detektor (Indogen-Zählrohr CTC-5) in der durchbrochenen Spitze in Höhe des Ausblaventils angeordnet ist

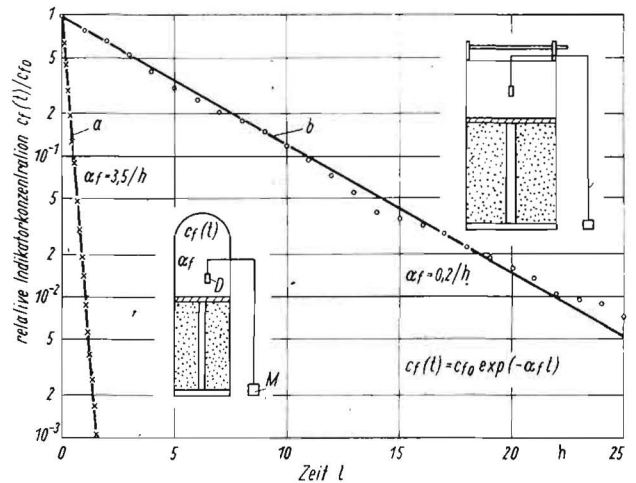


Bild 6. Gasaustausch im freien Volumen von Formsteinsilos. Abhängigkeit der Indikatorkonzentration von der Zeit (halblogarithmische Darstellung)
 D Detektor (VA-Z-113); M Meßplatz (VA-M-16D); a HS 09; b HS 25

bereitet keine Schwierigkeit und kann durch einfaches Einblasen erfolgen. Zur Messung des Konzentrationsverlaufes genügt es, einen Detektor (Geiger-Müller-Zählrohr VA-Z-413) oberhalb des Futterstockes frei aufzuhängen.

Die Registrierung der von den Detektoren angezeigten Impulsraten (Maß für die Indikatorkonzentration) erfolgt digital im allgemeinen mit dem Strahlungsmeßplatz VA-M-16 D in Verbindung mit dem Ergebnisdrucker VA-G-24. Wird gleichzeitig an mehreren Meßstellen gemessen, bleibt die Möglichkeit digitaler Anzeige durch automatische Meßstellenumschaltung erhalten. Die Zählkapazität des Strahlungsmeßplatzes wurde auf 10^7 Impulse (bei Abzug des Nulleffektes) erweitert. Dadurch wird die Auswertung erleichtert, denn die Wahl größerer Meßzeiten erlaubt eine erhebliche Reduzierung der Zahl der Meßwerte.

4. Meßergebnisse

Vorversuche zur Erprobung der Gassonde wurden an mit Hafer als Modellschubstanz gefüllten zylindrischen Blechgefäßen durchgeführt. Die Versuche bestätigten, daß der Konzentrationsausgleich nach stoßförmiger Indikatorzugabe durch Diffusion erfolgt. Der gemessene Konzentrationsverlauf zeigt zwei charakteristische Abschnitte, die sich zunächst dem inneren Ausgleichsvorgang und dann dem Austausch durch die Grenzflächen zuordnen lassen. Die Geschwindigkeit

Tafel 1. Austauschraten im freien Volumen von Formsteinsilos

Typ	$\alpha_1 V^1$ m ³ /h	\bar{w}^2 m/s	Bemerkung
HS 25	100	4	geschlossen
Dmr. 12 m	120	3,5	geschlossen
mit Flachdach	500	4,4	2 Luken geöffnet
	10000	6,6	2 Luken und Tauchdeckel geöffnet
HS 09	1200	10,6	geschlossen
Dmr. 7,3 m	4000	4,8	2 Luken und Dachklappe geöffnet

¹ Austauschrate

² mittlere Windgeschwindigkeit, Angaben des Meteorologischen Dienstes Potsdam

keit des Gasaustausches wird dem exponentiell abfallenden Kurvenabschnitt entnommen (Bild 5c).

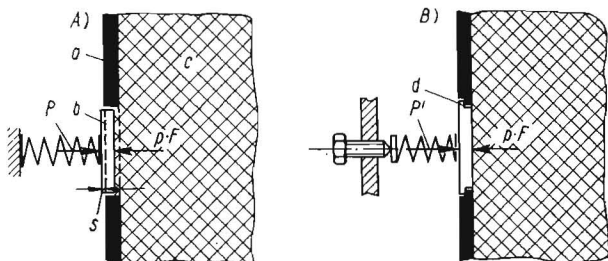
Bei freier Oberfläche wurde der Geometrieinfluß der verwendeten zylindrischen Behälter untersucht (Bild 5). Die ermittelten Exponenten α_n sind vom Radius R der Behälter und von der Einstichtiefe x der Gassonde unabhängig; die Abhängigkeit von der Höhe l entspricht dem zugrundegelegten Modell (Bild 1). Der Einfluß der Dichte auf den Gasaustausch ist an mit Siliergut gefüllten Behältern zu untersuchen. Dabei ist zu klären, inwieweit das Modell während des Gärprozesses in Anwendung gebracht werden kann. Vergleichende Untersuchungen des Gasaustausches vom freien Volumen zur Atmosphäre an Formsteinsilos ergaben deutliche vom Silotyp abhängende Unterschiede (Bild 6). Der Vergleich wurde über die Austauschrate $\alpha_1 V$ geführt (Tafel 1). Bei vollständiger Abdichtung der Silos können sich die Austauschraten um einen Faktor 10 unterscheiden. Bei nicht geschlossenen Einstiegsluken und Dachöffnungen sind die Austauschraten um Größenordnungen heraufgesetzt. Diese Tatsache ist von Bedeutung für die Bewirtschaftung von Formsteinsilos.

Dipl.-Ing. F. ZSCHAAGE, KDT

Bei der Dimensionierung von Behältern für landwirtschaftliche Siliergüter ist die Kenntnis der Beanspruchung der Behälter durch das einzulagernde Gut unbedingt erforderlich. Für die Dimensionierung stehen zur Zeit verschiedene, experimentell und theoretisch ermittelte Lastannahmen zur Verfügung, die im wesentlichen die Verteilung des Druckes des Siliergutes auf die Behälterwand und eine eventuelle Vertikalbelastung der Behälterwand durch Reibungskräfte vorzubestimmen gestatten [1]. Nach neueren Beobachtungen ist zu erkennen, daß diese Lastannahmen noch weiter vervollkommen werden müssen [2] [3].

Wegen der Abhängigkeit der Lasten nicht nur von den Eigenschaften des Siliergutes (wie Häcksellänge, Feuchtig-

Bild 1. Prinzipieller Aufbau einer Druckmeßeinrichtung und Unterscheidung der Meßverfahren. A) Ausschlagmeßverfahren, B) Kompensationsmeßverfahren; a Behälterwand, b Druckmeßplatte, c Siliergut, d Anschlag



Weitere Untersuchungen werden geführt, um in Hochsilos den Gasaustausch bei der Entnahme von Gärfutter über den Zentralschacht zu bestimmen. Die Entnahmepériode dauert wesentlich länger als die Gärperiode. Da die Futterstockoberfläche in diesem Zeitraum frei bleiben muß und die Behälter nicht abgedichtet sind, kommt dem Gasaustausch besondere Bedeutung zu.

Zusammenfassung

Über den Gasaustausch zwischen Gärfutterstock und Atmosphäre werden Modellvorstellungen entwickelt. Daraus ableitend wird ein Meßverfahren zur Bestimmung seiner Geschwindigkeit unter Verwendung des radioaktiven Edelgasisotops Kr-85 angegeben. Die Eignung des Meßverfahrens wird für vergleichende Untersuchungen an Behältern im Labormaßstab nachgewiesen. Für die Untersuchungen eignet sich eine Gassonde, die neben der Zugabe auch die Messung der Konzentration des Indikators gestattet. An Formsteinsilos erfolgen Messungen der Austauschraten zwischen dem freien Volumen oberhalb der Futterstockoberfläche und der Atmosphäre. Die Ergebnisse erlauben eine Bewertung der Dichtigkeit der Baukörper.

Literatur

- [1] MACKE, W.: Thermodynamik und Statistik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K. G. Leipzig 1962.
- [2] RETTIG, H.: Radiometrische Messung von Verweilzeitspektren an verfahrenstechnischen Anlagen der Landwirtschaft. Forschungsbericht IML Potsdam-Bornim 1969 (unveröffentlicht).
- [3] CARSLAW, M. S. / I. C. JAEGER: Conduction of Heat in Solids. Isd. „Nauka“, Moskau 1964 (russ. Übers. d. 2. engl. Ausgabe).
- [4] BEER, M. / A. HEISSNER / G. VOGEL: Bestimmung des Luftaustausches in geschlossenen Gewächshäusern. Deutsche Agrartechnik 15 (1965) H. 4, S. 166 bis 170. A 8034

Zur Problematik des Meßfehlers bei Wanddruckmessungen an Gärfuttersilos

keitsgehalt, Kompressibilität, innere Reibungszahl und andere), sondern auch von den Daten des Lagerbehälters (wie geometrische Form und Elastizität des Behälters; Oberflächenrauigkeit der Behälterinnenwand) ist eine theoretische Behandlung der Lastannahmen ohne parallel dazu laufende experimentelle Untersuchungen so gut wie ausgeschlossen.

1. Aufgabenstellung

Experimentelle Untersuchungen betreffen hauptsächlich die Messung der Seitenwand- und Bodendrücke, der Wandreihungskräfte und eventuelle Veränderungen der geome-

Bild 2. Einfluß der Druckplattenbewegung auf den gemessenen Wanddruck (nach FORDHAM). A) Druck - Weg - Diagramm, B) Versuchsschema; a Druckmeßplatte, b Sandfüllung

