

# Bau- und siliertechnische Anforderungen an Gärfutterbehälter

Dr. H. Rettig / Dipl.-Landw. G. Suckow, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim

Dr. G. Weise, Institut für Futterproduktion Paulinenaue

## 1. Aufgabe

Silage macht den Hauptanteil der Grobfutterkonservate aus. Die verlustarme Produktion großer Partien qualitativ hochwertiger Silagen hat daher eine hohe volkswirtschaftliche Bedeutung. Neben der Bereitstellung vergärbaren Pflanzengutes sind anaerobe Silierbedingungen dafür Voraussetzung. Gegenwärtig resultiert der größte Teil der Silierverluste aus einer unzureichenden Erfüllung anaerober Silierbedingungen. Es wird eingeschätzt, daß sich die Silierverluste absolut um 10 bis 15 Prozent durch silier- und bautechnische Maßnahmen senken lassen.

Anaerobe Silierbedingungen bedeuten die Ausschaltung des Luftenflusses in der Phase der intensivsten Gärung (1. bis 6. Gärtag) und in der Phase der Lagerung. Wissenschaftlich begründet müssen daraus bau- und siliertechnische Anforderungen an Gärfutterbehälter, wie Mindestfüllmenge, Lagerungsdichte und Hermetisierung, abgeleitet werden.

Bei der Formulierung von bau- und siliertechnischen Anforderungen muß von dem Prozeß des physikalischen Gasaustausches ausgegangen werden.

Vorliegende Untersuchungen zum Gasaustausch an Gärfutterbehältern beziehen sich auf die Wirkungsweise von Druckausgleichssystemen bei witterungsbedingten Temperatur- und Luftdruckschwankungen, die Gasdurchlässigkeiten von Folienverschlüssen und Baumaterialien sowie auf die Entwicklung von Modellvorstellungen und Meßverfahren [1] [2] [3] [4] [5].

In Weiterentwicklung der Modellvorstellungen über den physikalischen Gasaustausch waren:

- Grenzwerte der Durchlässigkeit für Gärfutterbehälter abzuleiten und diese mit Meßwerten von monolithischen Hochsilos und Formsteinsilos zu vergleichen
- für die Befüllphase Mindestfüllhöhenbereiche anzugeben und
- für die Lagerungsphase der jeweilige Einfluß der Bewirtschaftungsmaßnahmen Verdichten und Zudecken des Futterstockes auf den Randverlust abzuschätzen.

## 2. Durchlässigkeit von Hochsilos

In Hochsilos vollzieht sich neben dem physikalischen Gasaustausch zwischen dem freien Volumen über dem Futterstock und der Atmosphäre auch ein Austausch von Kohlendioxid und Sauerstoff zum Futterstock. Die Zusammenhänge zwischen den Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen im freien Volumen bzw. in der Atmosphäre und zwischen der Gasaustauschrate und der Sauerstoffabsorption bzw. Kohlendioxidbildungsrate wurden mathematisch formuliert [4]. Unterstellt man, daß der optimale Gärprozeß unter anaeroben Bedingungen verläuft, d. h., es wird kein Sauerstoff absorbiert, ist für den sich im freien Volumen über der Futterstockoberfläche einstellenden Wert der Sauerstoffkonzentration  $C_{O_2}$  das Verhältnis  $v/v_{CO_2}$  der Austauschrate zur Atmosphäre und der Kohlendioxidbildungsrate  $v_{CO_2}$  bestimmend (Tafel 1).

Gilt  $v/v_{CO_2} \gg 1$ , stellt sich im freien Volumen die Sauerstoffkonzentration der Atmosphäre ein und die Sauerstoffabsorption muß durch Zudecken der Futterstockoberfläche im Behälter verhindert werden. Gilt  $v/v_{CO_2} \ll 1$ , ist die Sauerstoffkonzentration im freien Volumen vernachlässigbar klein gegenüber der der Atmosphäre. Die Sauerstoffabsorption wird im wesentlichen durch die geringe Durchlässigkeit des Behälters verhindert; auf ein Zudecken der Futterstockoberfläche kann verzichtet werden. Im Gebiet  $v/v_{CO_2} \approx 1$

ist die Sauerstoffkonzentration im freien Volumen nicht vernachlässigbar klein gegenüber der der Atmosphäre, und es ist ein Zudecken der Futterstockoberfläche erforderlich.

Die Durchlässigkeit des Behälters und der Grad der Gasdichtheit der Zudeckung können sowohl jeweils allein als auch kombiniert die Sauerstoffabsorption auf ein Minimum herabsetzen.

Bei der Formulierung von Anforderungen an die Durchlässigkeit von Behältern und Zudeckungen ist das zu berücksichtigen.

Für Hochsilos wurde eine maximal zulässige Durchlässigkeit  $D'_{max}$  berechnet [6]:

$$D'_{max} = (v/v_{CO_2})_{max} v_{CO_2}^{lr} TM \rho \eta \frac{V}{F} \quad (1)$$

In diesem Ausdruck enthält der Faktor  $(v/v_{CO_2})_{max}$  die Forderung nach anaeroben Bedingungen (Tafel 1).

Die auf den Trockenmassegehalt des Gutes bezogene Kohlendioxidrate  $v_{CO_2}^{lr}$  charakterisiert den Einfluß der Dynamik des Gärverlaufes. Der Trockenmassegehalt  $TM$  und die mittlere Lagerungsdichte  $\rho$  repräsentieren Guteigenschaften; der Füllungsgrad  $\eta$  und das spezifische Volumen  $V/F$  — das Verhältnis von Volumen  $V$  und Fläche  $F$ , über die sich der Gasaustausch vollzieht — stellen Behältereigenschaften dar. Es ist prinzipiell möglich, für jeden Behältertyp auf der Grundlage der Gleichung (1) Zahlenwerte der maximal zulässigen Durchlässigkeit anzugeben.

Aus Annahmen über die Schwankungsbreiten der Einflußgrößen wurden für zylindrische Behälterformen obere und untere Grenzwerte der maximal zulässigen Durchlässigkeit berechnet (Tafel 2). Zum Vergleich wurden an Hochsilos gemessene Durchlässigkeiten und aus Literaturangaben abgeleitete Werte zusammengestellt (Tafel 3).

Die zwischen den Hochsilotypen HS 09, HS 25 sowie den Versuchsbehältern HS 30 und HS 40 bestehenden Unterschiede resultieren aus einer Vielzahl von bautechnischen Maßnahmen zur Einschränkung des Gasaustausches (Tafel 4). Die gegenüber dem Hochsilotyp HS 09 herabgesetzte Durchlässigkeit des Typs HS 25 resultiert im wesentlichen aus der Innenauskleidung des Baukörpers. Bei den Versuchsbehältern HS 30 und HS 40 wird sie weiter verringert durch Verbesserungen am Zentralschachtverschluß und an den Lukenverschlüssen. Die Schwankungsbreiten der Durchlässigkeit spiegeln an den Hochsilotypen HS 09, HS 25, HS 30 und HS 40 den Einfluß der mittleren Windgeschwindigkeit wider. An den Metallbehältern werden sie vorwiegend dem Einfluß von Temperatur- und Luftdruckschwankungen zugeschrieben [5].

Tafel 1. Einfluß von Kohlendioxidbildungsrate und Austauschrate auf die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen im freien Volumen von Hochsilos

$v/v_{CO_2}$	$C_{O_2}$ Vol. %	$C_{CO_2}$ Vol. %
—	—	—
0,05	1,0	95,0
0,1	1,9	91,0
0,2	3,5	83,5
0,5	7,0	66,8
1,0	10,5	50,0
2,0	14,0	33,3
5,0	17,4	16,7
10,0	19,2	9,1
20,0	20,0	4,8
50,0	20,5	1,9
100,0	20,8	1,0



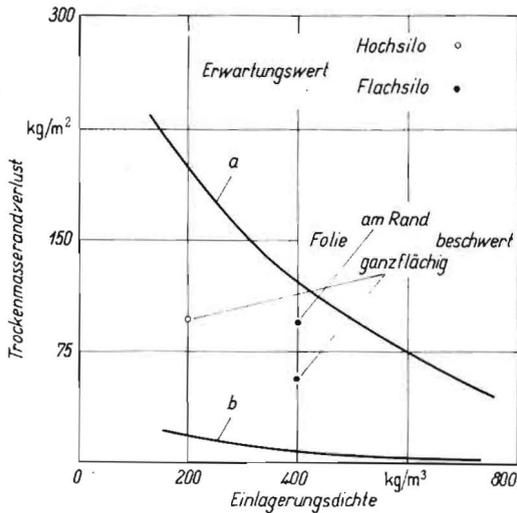


Bild 1. Trockenmasserandverlust während der Lagerung unter freier und zugedeckter Futterstockoberfläche bei Welkgut — Vergleich von Erwartungswerten mit Ergebnissen aus kleintechnischen Untersuchungen; die Variante zugedeckte Oberfläche entspricht einer Folienzudeckung mit ganzflächiger Beschwerung, a freie Oberfläche, b zugedeckte Oberfläche

Tafel 6. Mindestfüllhöhe je Tag in Gärfutterbehältern /9/

Lagerungsdichte in der Füllschicht kg/m <sup>3</sup>	Mindestfüllhöhe je Tag Welkgut m	Frischgut m
200	3,00	2,50
400	1,50	1,00
600	0,75	0,50

Die den genannten Angaben über Mindestfüllhöhen in Hochsilos und Horizontalsilos zugrunde liegenden Annahmen gehen weder von der Dynamik des Gärungsablaufs noch von der Geschwindigkeit des physikalischen Gasaustausches aus. Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen der Randverlustschicht und der Einlagerungsdichte sowie aus Modellvorstellungen über den Gasaustausch abgeleitete Aussagen über gefährdete Randschichten erlaubten eine Präzisierung der Mindestfüllhöhen je Tag in Gärfutterbehältern /9/ (Tafel 6). Zu orientieren ist darauf, daß diese Werte besonders am 1. Fülltag überschritten werden.

#### 4. Einfluß von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Randverluste

Untersuchungen an unterschiedlich verdichteten und zugedeckten Siliergütern ergaben, daß in dem Exponent  $\alpha$ , dem Maß des physikalischen Gasaustausches, ein Anteil enthalten ist, der aus der biologisch bedingten Gasbildung resultiert /9/. Dieser Anteil, der Exponent  $\alpha_{\text{bio}}$ , wird aus der mittleren Kohlendioxidbildungsrate  $\bar{v}_{\text{CO}_2}$  in dem entsprechenden Zeitabschnitt des Gärungsverlaufs unter anaeroben Bedingungen und aus dem Porenvolumen  $V_p$  berechnet.

$$\alpha_{\text{bio}} = \bar{v}_{\text{CO}_2} / V_p \quad (2)$$

Der Ausdruck  $\alpha_{\text{bio}} \cdot \alpha$  kann als Kenngröße Hermetisierungsgrad zur Bewertung der sowohl durch Lagerungsdichte als auch Zudeckung gegebenen Konservierungsbedingungen herangezogen werden.

In dieser Kenngröße wird das unter anaeroben Bedingungen je Zeit- und Volumeneinheit gebildete Gasvolumen ins Verhältnis gesetzt zu dem unter nicht anaeroben Bedingungen ausgetauschten Gasvolumen. Anaerobe Bedingungen werden mit  $\alpha_{\text{bio}}/\alpha = 1$  bewertet; nicht anaerobe Bedingungen mit  $\alpha_{\text{bio}}/\alpha < 1$ .

Der Exponent des Gasaustausches hängt von der Lagerungsdichte ab; er nimmt jeweils bei einem charakteristischen Wert  $\rho_{\text{min}}$  ein Minimum an. Im Dichtebereich  $\rho \geq \rho_{\text{min}}$  hat

der Hermetisierungsgrad den Wert  $\alpha_{\text{bio}} \cdot \alpha = 1$ , d. h., das mit der Atmosphäre je Zeiteinheit ausgetauschte Gasvolumen ist allein durch die biologische Gasbildung unter anaeroben Bedingungen bestimmt. Bei freier Futterstockoberfläche gilt  $\rho_{\text{min}} > 750 \text{ kg/m}^3$ ; bei einer der Folienzudeckung mit ganzflächiger Beschwerung entsprechenden Zudeckungsvariante gilt  $\rho_{\text{min}} = 400 \text{ kg/m}^3$ .

Es leitet sich die Feststellung ab, daß unter den in Hochsilos und in Horizontalsilos praktisch gegebenen Bedingungen der Gasaustausch zwischen dem Porenvolumen und der Atmosphäre nur durch Kombination der Bewirtschaftungsmaßnahmen Verdichten des Futterstocks während des Befüllens und Zudecken der Futterstockoberfläche wirksam eingeschränkt werden kann. Die gleiche Feststellung läßt sich auch aus den Trockenmasserandverlusten ableiten (Bild 1). Sowohl bei freier als auch bei zugedeckter Futterstockoberfläche besteht eine Dichteabhängigkeit des Trockenmasserandverlustes.

Die gegenwärtig für ökonomische Bewertungen von Konservierungsbehältern sowie für inner- und zwischenbetriebliche Abrechnungen benutzten Erfahrungswerte hängen ebenfalls von der Lagerungsdichte unmittelbar unter der Futterstockoberfläche ab. Die bei Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab gemessenen Randverluste sind etwas kleiner als die Erwartungswerte für mit ganzflächig beschwerter Folie zugedeckte Futterstockoberflächen. Der Unterschied erklärt sich im wesentlichen aus der Tatsache, daß bei diesen Untersuchungen die Futterstockoberflächen sofort nach dem Ende des Befüllens zugedeckt wurden (Zeitdifferenz  $< 2 \text{ h}$ ) und Randverluste nur unter der zugedeckten Oberfläche auftraten. In Hochsilos und in Horizontalsilos führt das Verdichten der Futterstöcke und ein sich dem Ende der Befüllung sofort anschließendes Zudecken der Futterstockoberfläche mit ganzflächig beschwerter Folie zur wirksamsten Senkung der Randverluste.

#### 5. Zusammenfassung

Ableitend aus Modellvorstellungen und experimentellen Untersuchungen zum Gasaustausch an Gärfutterbehältern wurde für Hochsilotypen ein bautechnisch zu realisierender Bereich der Gasdurchlässigkeit festgelegt.

Für die Beschickung von Hoch- und Horizontalsilos wurden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Einlagerungsdichten Mindestfüllhöhenbereiche angegeben. Es erfolgte eine Abschätzung des Einflusses der Bewirtschaftungsmaßnahmen Verdichten und Zudecken auf den Randverlust.

#### Literatur

- 1/ Wilcke, J.: Untersuchungen über die Druckausgleichssysteme von gasdichten Gärfutterbehältern. Diss. Chr.-Albr.-Univ. Kiel 1966.
- 2/ Lewallen, M. J., Brown, D. H.: Oxygen-permeability of concrete silo wall sections. Trans ASAE 10 (1967) Nr. 1, S. 114/115, S. 122.
- 3/ Schulz, H.: Folienverschlüsse in der Silowirtschaft. DLG-Mitt. H. 24 (1967), S. 835—838
- 4/ Rettig, H.; Suckow, G.: Bestimmung des Gasaustausches an Gärfutterbehältern. Dt. Agrartechnik 20 (1970) H. 10, S. 477—479.
- 5/ Meiering, A. G.; Wenner, H. L.: Der Einfluß der Witterung auf die Sauerstoffaufnahme von Silobehältern. Fortschrittsberichte VDI-Reihe 14 (1970), Nr. 12.
- 6/ Rettig, H.: Untersuchung des physikalischen Gasaustausches an Konservierungsbehältern. Diss. AdL Berlin (1973).
- 7/ Müller, M.: Beitrag zu technologischen Grundlagen der Verdichtung von Siliergut und der Lagerung von Silage. Institutsbericht Nr. 23. IfM Potsdam-Bornim (1970).
- 8/ Maskova, H.; Havelik, K. J.: Gärverlauf und Verluste in Hochsilos. Das wirtschaftseigene Futter 15 (1969) H. 3, S. 165—184.
- 9/ Rettig, H.; Suckow, G.; Weise, G.: Verdichten und Hermetisieren als Grundlage für die Weiterentwicklung von Silierverfahren. Forschungsabschlußbericht IfM Potsdam-Bornim, IfP Paulinenaue (1973).
- 10/ Weise, G.: Untersuchungen zur Dynamik des Gärverlaufes in Grünfuttersilagen. DAL Taggs.-Ber. Nr. 92 (1967), S. 49—57.
- 11/ Berckholtz, J.: Untersuchungsergebnisse (unveröffentlicht). DBA Inst. f. lw. Bauten (1971).
- 12/ Fuchs, H.; Beer, M.; Rettig, H.: Gasaustauschmessungen an Silobedeckungsmaterial (unveröffentlicht). IfM Potsdam-Bornim (1970).