

V

5 7 1 9

14, 12

FORTSCHRITT- BERICHTE DER VDI ZEITSCHRIFTEN

Reihe 14 Nr. 12 Dez. 1970

DK 631.563:661.937.1

Der Einfluß der Witterung auf die Sauerstoffaufnahme von Silohochbehältern

Von Dr. agr. Anton G. Meiering, Morgantown W. Va., USA,
und Prof. Dr. agr. Heinz Lothar Wenner, Gießen

Aus dem Institut für Landtechnik der Universität Gießen

Hochsilos stehen durch ihre Lecks auf Grund der auf sie einwirkenden Witterungseinflüsse, wie Sonneneinstrahlung, Niederschläge, Wind und Luftdruck, in einem dauernden Gasaustausch mit der Atmosphäre. Besonders die witterungsbedingten Temperaturschwankungen der im Leerraum der Behälter eingeschlossenen Gase bestimmen das Ausmaß dieses Austausches. Ihre Größe und Häufigkeit hängt von den wärmetechnischen Eigenschaften des Silobaumaterials ab. Metallbehälter reagieren weit stärker auf Witterungseinflüsse

als Betonbehälter und tendieren daher zu einem vergleichsweise intensiverem Gasaustausch. Die Leckgröße verschiedener Behältertypen konnte aus Versuchsergebnissen bestimmt werden. Ihr Einfluß auf die Wirksamkeit der Siloverschlüsse und der Druckausgleichssysteme wurde untersucht. In einem Simulationsmodell ließen sich an Hand von Meßergebnissen die aus dem Gasaustausch resultierenden Sauerstoffaufnahmen verschiedener Silobehälter berechnen.



VDI-VERLAG GM
BH DÜSSELDORF
VERLAG DES VEREINS DEUTSCHER INGENIEURE

Inhaltsangabe	Seite
1 Einführung	4
2 Die Bestimmungsfaktoren des Gasaustausches	5
2.1 Sauerstoffeintritt und Gasproduktion	6
2.2 Das Volumen der Silogase	6
2.3 Der Verlauf der Gastemperaturen und des atmosphärischen Luftdruckes	7
2.4 Siloverschlüsse und Druckausgleichsysteme . .	13
2.5 Die Siloundichtigkeiten	14
3 Die Berechnung des Gasaustausches während der Lagerzeit	31
4 Schrifttum	42

Einführung

Die Bedeutung der Silagebereitung für die Rindviehfütterung hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Der Grund für diese Tendenz ist darin zu sehen, daß die spezifischen Nährstoffkosten der Silage in der Regel niedriger liegen als diejenigen der anderen Futtermittel. Die Gesamtkosten der Silagebereitung lassen sich aber nur dann minimal gestalten, wenn keine aufwendigen und unzweckmäßigen technischen Lösungen verwandt werden, und wenn das Futter mit niedrigen Verlusten geborgen und gelagert wird [6;12].

Als Hauptursache der Lagerverluste ist der Gasaustausch der Silobehälter mit der atmosphärischen Luft anzusehen, aus dem je nach Silagequalität und aufgenommener Sauerstoffmenge unterschiedlich große Nährstoffeinbußen entstehen. Die bisherigen Untersuchungen über den Gasaustausch beschränken sich fast ausschließlich auf den relativ kurzen Zeitraum der Vergärung und lassen die Lagerperiode zwischen Vergärung und Verfütterung unbeachtet [3;5;11;15;18;19]. Weitere Teiluntersuchungen befassen sich mit den Druckausgleichssystemen der metallischen Hochbehälter, ohne aber die Undichtigkeit der Behälter und den daraus resultierenden Gasaustausch mit der umgebenden Luft zu berücksichtigen [11;13;17]. Eine Untersuchung ausschließlich über die Gasdichtigkeit von Silobehältern in der Praxis wurde vom Landtechnischen Verein Weihenstephan durchgeführt. Meßdaten über den Temperaturverlauf der Gärgase, sowie den Temperatur- und Druckverlauf der atmosphärischen Luft in der Umgebung der Silobehälter wurden von der Landtechnischen Abteilung der Landwirtschaftskammer Oldenburg ermittelt. Sie wurden wie die Weihenstephaner Meßwerte für die in dieser Abhandlung vorgenommenen Berechnungen des Gasaustausches zur Verfügung gestellt.

Der physikalisch bedingte Gasaustausch nicht hermetisch abgedichteter Silobehälter mit der atmosphärischen Luft wird durch Diffusion, Windeinwirkung, Niederschläge, sowie Schwankungen des atmosphärischen Luftdruckes, der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung verursacht. Durch Windeinwirkung

entstehender Überdruck an der Luvseite und gleichzeitiger Unterdruck an der Leeseite, die sich wie etwa 0,7 : 0,4 verhalten [1], haben ein Durchströmen undichter Behälter mit Luft zur Folge. Da keine Meßdaten über die Windeinwirkung vorliegen, kann sie im Rahmen dieser Abhandlung nicht näher berücksichtigt werden. Wie die Windeinwirkung verursacht auch die Schwankungen des atmosphärischen Luftdrucks periodische Druckänderungen in der unmittelbaren Umgebung des Silobehälters. Die Schwankungen der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung, sowie die durch Niederschlagsverdunstung hervorgerufene Abkühlung bewirken Temperaturschwankungen der im Behälter eingeschlossenen Gase und damit periodische Druckänderungen innerhalb des Behälters. Die Klimaeinflüsse erzeugen also zwischen Behälterinnenraum und Außenatmosphäre ein dauernd wechselndes Druckgefälle. Richtung und Größe dieses Gefälles zusammen mit der Häufigkeit der Wechsel bestimmen den gesamten physikalisch bedingten Gasaustausch undichter Gärbehälter. Der Einfluß der Gasdiffusion dürfte im Vergleich zu den witterungsbedingten Faktoren nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Bestimmungsfaktoren des Gasaustausches

=====

Aus meßtechnischen Gründen läßt sich der physikalisch bedingte Gasaustausch der in der Praxis verwendeten Silobehälter kaum mit vertretbarem Aufwand direkt bestimmen. Die Gasmengen lassen sich aber mit Hilfe der Gasgesetze rechnerisch ermitteln, wenn folgende Größen bekannt sind:

- 1.) Höhe der durch den Sauerstoffeintritt verursachten Gasproduktion,
- 2.) Volumen der im Silobehälter eingeschlossenen Gase,
- 3.) Temperaturverlauf der Silogase und Druckverlauf der atmosphärischen Luft in unmittelbarer Umgebung der Silobehälter,
- 4.) Art und Wirkungsweise der Siloverschlüsse und Druckausgleichssysteme,

5.) Größe der Siloundichtigkeiten.

Sauerstoffeintritt und Gasproduktion

Nach Abschluß der Vergärungsperiode wird der in einen Silobehälter eintretende Sauerstoff zunächst aerob zu Kohlendioxyd veratmet [5]. Damit ist die durch den Sauerstoffeintritt verursachte Gasproduktion qualitativ bestimmt: das moläquivalent erzeugte Kohlendioxyd hat das gleiche Volumen wie der eingetretene Sauerstoff und übt daher den gleichen Einfluß auf den Behälterdruck aus. Die Frage, zu welchem Zeitpunkt infolge des anhaltenden Sauerstoffeintritts auch andere Umsetzungen mit unterschiedlicher Gasproduktion ausgelöst werden, steht in diesem Beitrag nicht zur Debatte. Ihre Beantwortung ist Sache der Gärungsbiologie. Hier sollen lediglich die bei stabil bleibender Silage eintretenden Sauerstoffmengen rechnerisch bestimmt werden.

Das Volumen der Silogase

Das Volumen der in einem Silobehälter eingeschlossenen Gase setzt sich aus dem Porenvolumen innerhalb der Silage und dem vom Füllungsgrad abhängigen Leerraum oberhalb der Silage zusammen. Das Porenvolumen P beträgt

$$P = 100 - 10 \text{ RG} \left[\frac{1 - \text{WG}}{\text{SGT}} + \text{WG} \right] \text{ Vol.}\% \quad (1)$$

wobei

RG = Raumgewicht der Silage in dz/m^3

WG = Wassergehalt der Silage in % Feuchtbasis

SGT = Spez. Gew. der Trockenmasse in g/cm^3

Das spezifische Gewicht der Trockenmasse läßt sich nur schwer einheitlich bestimmen und unterliegt wegen der bei den einzelnen Futterpflanzen unterschiedlichen Zusammensetzung stärkeren Schwankungen. Ein Näherungswert kann gefunden werden, wenn den chemischen Bestandteilen der Trockenmasse Gewichtswerte zugeordnet werden, aus denen dann ein Durchschnittswert gebildet wird. Als gewogenes Mittel von

Mähweidegras bekannter Zusammensetzung [19] ergibt sich zum Beispiel eine Dichte der Trockensubstanz von $1,29 \text{ kg/dm}^3$. Kloepfel [9] gibt als Durchschnittswert für Grünfutter $1,01 \text{ kg/dm}^3$ an. Werden weiterhin die vom gleichen Verfasser angegebenen Silageraumgewichte benutzt, so ergeben sich nach Gl. (1) für verschiedene Silagen folgende Porenvolumina:

Pflanzenart	Raumgewicht	Wassergehalt	Porenvolumen
	dz/m^3	% F.B.	Vol. %
ZR-Blätter, frisch	9,5	80,0	5,2
Silomais, frisch	7,1	80,2	29,1
Gras, frisch	6,9	80,4	31,1
Gras, vorgewelkt	5,6	67,1	44,2

Das Porenvolumen wird mit zunehmendem TS-Gehalt schnell größer, weil dann weniger Poren mit Wasser gefüllt sind. Da es zum Teil aus Mikroporen und gasdicht abgeschlossenen Hohlräumen besteht, dürften Druckänderungen in der Umgebung auf diese Räume nur in einem nicht näher bestimmten Ausmaß übertragen werden. Die Vollständigkeit des Druckausgleichs über den gesamten Siloinhalt wird also mehr oder weniger je nach Beschaffenheit der Silage beeinträchtigt. Da keine Versuchsergebnisse zu diesem Problem vorliegen, wurde das Gesamtporenvolumen in die Rechnung einbezogen.

Der Verlauf der Gastemperaturen und des atmosphärischen Luftdruckes

Der Temperaturverlauf der Gärgase und der Silage in Hochbehältern aus unterschiedlichem Baumaterial und mit unterschiedlichem Fassungsvermögen wurde von der Landtechnischen Abteilung der Landwirtschaftskammer Oldenburg untersucht. Die Behälter stehen auf Betrieben im Gebiet der Wesermarsch. Ihre charakteristischen Daten sind in folgender Übersicht angegeben:

Silo-Baumaterial	Silofarbe	Fassungsvermögen m ³	Untersuchungs- zeitraum
Stahlplatten	dunkelblau	325	Juli, Oktober, Dez. 1966
Al-Platten	metallisch	400	Juli 1966
Formsteine	grau	100	Juli 1967
monolith. Beton	grau	250	Juli 1967

Die Temperatur der Gärgase oberhalb der Silage wurde mit drei Thermometern in der Silomitte in Abständen von 0,25, 1,50 und 3,00 Meter von der Unterseite der Silokuppel gemessen. Die Verteilung der Thermometer erlaubte es, die Durchschnittstemperatur der Gärgase im Leerraum des Silos für Behälterfüllungen von mindestens 60% und darüber mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Gleichzeitig mit der Temperatur wurde auch der atmosphärische Luftdruck registriert.

Während die Temperatur der Gase oberhalb der Silage täglich je nach Silotyp stärkeren Schwankungen unterlag (s. Bild 4), blieb die Silagetemperatur und mit ihr die Gastemperatur im Kern des Futterstockes nahezu konstant (s. Bild 1). In der Nähe der Wand des Al-Behälters konnten jedoch ebenfalls starke tägliche Schwankungen der Silagetemperatur gemessen werden (s. Bild 2). Da aber ausreichende und aussagekräftige Meßwerte über den Einfluß des Abstands von Silowand und -boden fehlen, muß ihr Einfluß vorläufig unberücksichtigt bleiben und Gegenstand späterer Untersuchungen sein.

Die Wärmeübertragung an der Silowand ist wegen der irregulären Witterungseinflüsse rechnerisch nicht faßbar. Die auf die Silogase übertragene oder von ihnen abgegebene Wärmemenge wird weitgehend durch das Emissionsverhältnis und die Wärmeleitfähigkeit des Wandmaterials bestimmt. Während des Tages wird die von der Silooberfläche absorbierte Strahlungswärme zum überwiegenden Teil von der Luft konvektiv oder durch Verdunstung von Niederschlägen abtransportiert. Ein geringer Teil gelangt in den witterungsbedingten Intervallen durch Konduktion an die innere Oberfläche des Silos [17] und geht dort durch Konvektion und Strahlung auf die Gase bzw. konduktiv auf die Randschichten

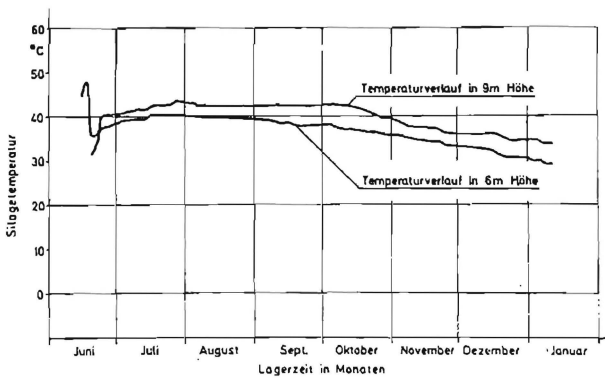


Bild 1: Temperaturverlauf im Kern eines Hochsilos während der Lagerzeit von Frühjahr bis Winter

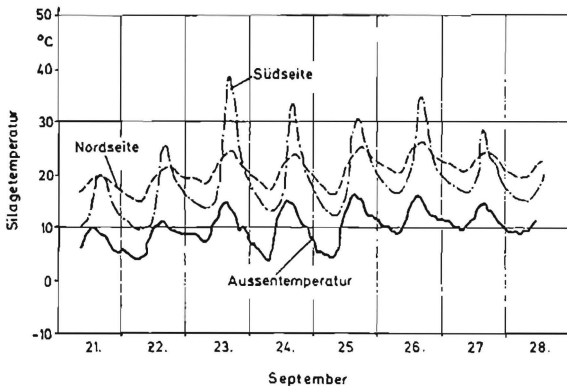


Bild 2: Temperaturverlauf in den Randschichten der Silage Abstand von der Silowand: 0,200 m; Al-Behälter

der Silage über. Bewölkung, Niederschlag und Wind sorgen für eine häufige Änderung des Temperaturgefälles, das nachts ohne nennenswerte Schwankungen vom Siloinnern zur atmosphärischen Luft hin abfällt (s. Bild 4). Die Tatsache, daß die Gärgastemperaturen während der Tageszeit die Temperaturen der atmosphärischen Luft deutlich überschreiten und während der Nacht auf das Niveau der Lufttemperatur absinken bzw. es gelegentlich unterschreiten, weist auf den starken Einfluß der Wärmestrahlung von der Sonne hin. Wilcke [17] stellte in einem Modellversuch mit Kleinbehältern aus Metall fest, daß die Wärmeabsorption in erster Linie von der Anstrichfarbe abhängt.

Ein Einblick in das Wärmeverhalten der untersuchten Behälter läßt sich durch eine Analyse der Temperaturschwankungen im Leerraum oberhalb der Silage gewinnen. Wie aus Tafel 1 hervorgeht, lagen die Summen der Temperaturänderungen, die

Tafel 1: Schwankungen der Gastemperaturen im Leerraum von Silobehältern aus unterschiedlichem Baumaterial

Behälter	$\Delta T : \Delta T_L$	Gesamtzahl der Schwankungen
Stahlplatten	2,93	455
Al-Platten	2,53	372
monolith.Beton	-	60
Formsteine	-	62

sich jeweils aus der Differenz zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Extremwerten eines Intervalles ergeben, beim Stahl- bzw. Al-Behälter mit 455 bzw. 372 wesentlich höher als beim Behälter aus monolithischem Beton bzw. Formsteinen mit 60 bzw. 62 pro Monat. Werden die Temperaturänderungen der Silogase ΔT zu den korrespondierenden Temperaturänderungen der Außenluft ΔT_L in Beziehung gesetzt, zeigt der dunkle Stahlbehälter im Vergleich zum helleren Aluminiumbehälter den größeren Quotienten. Im Durchschnitt liegt die Temperaturänderung

der Gase in den beiden Metallbehältern, ca. 2,5 bis 2,9 mal so hoch wie die zeitgleichen Änderungen der Lufttemperatur. Dabei sind die nicht korrespondierenden Intervalle mit etwa 5 - 10% Anteil an der Gesamtsumme nicht berücksichtigt. Beim dunklen Stahlbehälter nimmt mit abnehmender Schwankungsbreite außerdem die Häufigkeit der Temperaturschwankungen stärker zu (s. Bild 3). Es läßt sich deutlich die Tendenz erkennen, auf Veränderungen der Lufttemperatur stärker und häufiger zu reagieren als der hellere Aluminiumbehälter und vor allem der Beton- bzw. Formsteinsilo.

Die Behälter aus monolithischem Beton und Formsteinen besitzen eine erheblich bessere Wärmeisolation und folgen den einzelnen täglichen Schwankungen der Lufttemperatur nicht mehr. Die Temperatur der Gärgase steigt während der Tageszeit langsam auf einen Maximalwert an und sinkt in der Nacht wieder auf einen Minimalwert ab (s. Bild 4).

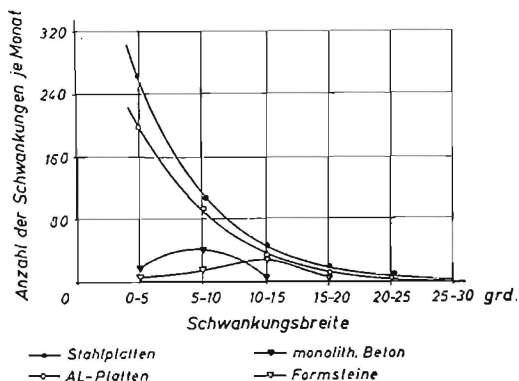


Bild 3: Häufigkeit der Temperaturschwankungen in Silobehältern aus unterschiedlichem Baumaterial

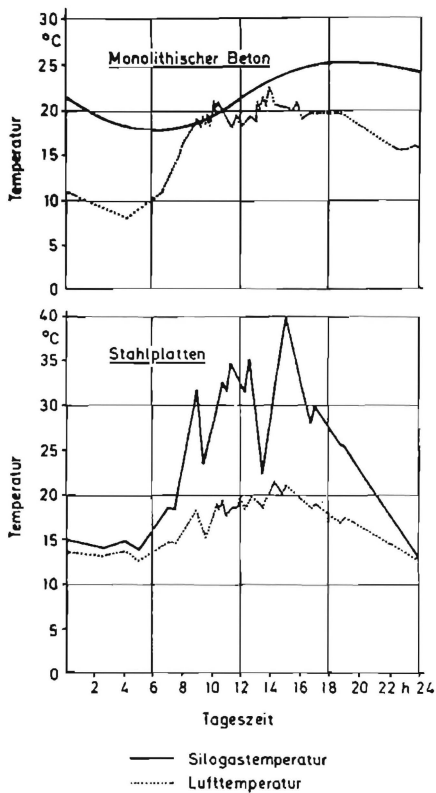


Bild 4: Einfluß unterschiedlichen Baumaterials auf den Temperaturgang der Silogase

Insgesamt läßt sich im Vergleich zu den Metallbehältern eine weit geringere Häufigkeit in den Größenklassen von 0 - 5°C und 5 - 10°C feststellen. Außerdem kommen keine Intervalle mit Temperaturänderungen über 20°C mehr vor (s. Bild 3). Es darf also gefolgert werden, daß Behälter aus Beton und Formsteinen wegen der besseren Wärmedämmung durch ihre Wände eine wesentlich geringere Bereitschaft zum Gasaustausch aufweisen als Metallbehälter. Eine ähnliche Tendenz dürfte sich auch für Holz- und Kunststoffsilos nachweisen lassen.

Die klimatisch bedingten Temperaturschwankungen sind am stärksten in der wärmeren Jahreszeit. So verringerte sich die Gesamtzahl der Schwankungen im dunkel eingefärbten Stahlbehälter von 455 im Monat Juli auf 292 im Monat Oktober und 178 im Monat Dezember. Sie nahm also von Juli bis Dezember um mehr als die Hälfte ab.

Siloverschlüsse und Druckausgleichssysteme

Um den witterungsbedingten Gasaustausch während der Lagerzeit der Silage zu vermindern, werden die Silobehälter mit unterschiedlichen Verschlüssen ausgerüstet. Siloverschlüsse mit begrenzter Sperrwirkung dienen außerdem als Sicherheitsventile gegen eventuell auftretende extreme Überdrücke, die insbesondere in der Vergärungsperiode infolge der starken Gärgasproduktion oder in der wärmeren Jahreszeit als Folge extrem hoher Temperaturschwankungen entstehen können. Nach ihrer Funktion lassen sich die in folgender Übersicht angegebenen drei Gruppen von Verschlüssen unterscheiden:

Verschlußart	Anwendungsbereich	S p e r r d r ü c k e in mm WS	
		Unterdruck	Überdruck
Über- und Unterdruckventil	Hochsilos (Metall)	100 - 300	40 - 500
große und kleine Tauchdeckel	Hochsilos	30 - 50	30 - 50
Folienverschlüsse	Hochsilos u. Flachsilos	?	0 - 100

Mit einem Über- und Unterdruckventil werden praktisch nur Hochbehälter ausgerüstet. Sie besitzen die höchste Sperrwirkung.

Die Sperrdrücke der Tauchdeckel, mit denen in erster Linie Hochsilos aus Beton und Formsteinen ausgestattet werden, sind wesentlich niedriger. Folienverschlüsse, die sowohl bei Hochsilos als auch bei Flachsilos Verwendung finden, schließen nicht wie Ventile oder Staurinne bis zum Erreichen bestimmter Sperrdrücke hermetisch ab, sondern erlauben je nach Verschußart dauernden Gasdurchfluß. Die Abdichtung ist bei Innenring-, Seeger- und Gürtelverschuß am besten [16] . Mit einigem Abstand folgt der WP-Verschuß. Auflegen einer Folie und Beschweren mit einem Wassersack oder Sandsäcken bringt den geringsten Erfolg. Die wesentlich nachteiligere Bildung von atmungsfähigem Leerraum wird durch diese Abschlußart aber vollständig verhindert, so daß trotz der Undichtigkeit nur ein sehr geringer Gasaustausch stattfinden dürfte. Die Folienverschlüsse vermögen weiterhin auch durch ihre Flexibilität den Gasaustausch einzudämmen, indem sie Änderungen im Druckgefälle zwischen Behälter und Außenatmosphäre durch Nachgeben in gewissen Grenzen ausgleichen. Werden die Silos überdacht, oder in vorhandene Gebäude eingebaut, dürfte infolge der wesentlich verminderten Witterungseinflüsse als Antrieb der "Siloatmung" der Gasaustausch fast vollständig unterbunden sein.

In Metallbehältern mit starrer Kuppel wird in den meisten Fällen durch den Einbau eines Atemsackes ein Teil der Silowandung zum Zweck des Druckausgleichs ebenfalls flexibel gehalten. Untersuchungen [10;13;17] zeigen, daß Dehnung und Schrumpfung eines Atemsackes nur über ca. zwei Drittel seines Volumens mit sehr geringen Drücken erfolgt. Bei weiterer Ausdehnung steigt der Dehnungsdruck bis zum Erreichen des Sperrdruckes des Einlaßventils steil an. Die Schrumpfung erfordert nur geringe Druckunterschiede.

Die Siloundichtigkeiten

Die bis jetzt beschriebenen Einflußfaktoren würden ausreichen, um den Gasaustausch theoretisch dichter Hochbehälter mit unterschiedlichem Ventilverschuß und darüberhinaus mit zusätzlichem Ausgleichsvolumen aus den aufgezeichneten Temperatur-

und Druckdaten theoretisch zu ermitteln. Es muß jedoch zusätzlich berücksichtigt werden, daß Silobehälter nach Untersuchungen des Landtechnischen Vereins Weißenstephan in der Praxis mehr oder weniger große Undichtigkeiten besitzen, die einen überragenden Einfluß auf den Gasaustausch ausüben. Es ist daher zunächst notwendig mit Hilfe dieser Untersuchungsergebnisse, die auf verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben an insgesamt 78 Silobehältern gewonnen wurden, den Begriff der Behälterundichtigkeit näher zu bestimmen.

Das Untersuchungsverfahren bestand darin, die Silos nach ihrem Verschließen mit Luft auf einen anfänglichen Überdruck von $\Delta P = 10$ mm WS aufgepumpt und dann durch Nachpumpen eine bestimmte Zeit auf diesen Druck gehalten wurden. Die nachgepumpten Luftmengen wurden registriert und sind in Tafel 2 für die verschiedenen Siloarten zusammengestellt. Es gilt der Ansatz

$$dw = v F \gamma dt \quad (2)$$

in dem dw die in der Zeiteinheit dt durch die Behälterlecks von der Gesamtgröße F mit der durchschnittlichen Geschwindigkeit v ausströmende Luftmenge mit dem spezifischen Gewicht γ darstellen. Der Undichtigkeitswert F und das spezifische Gewicht der Luft sind druck- und temperaturabhängig. Unter den gegebenen Bedingungen können sie jedoch ohne größere Fehler zu verursachen wie Konstanten behandelt werden. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der ausströmenden Luft beträgt unter Einbeziehung des Profilmfaktors in den F -Wert

$$v = \sqrt{\frac{P_d \cdot 2g}{\gamma}} \quad (3)$$

Der dynamische Druck P_d ergibt sich aus dem Druckunterschied zwischen dem Behälterdruck P_B und dem atmosphärischen Druck P_L . Unter der Bedingung, daß sich der statische Druck restlos in dynamischen Druck umsetzen kann, gilt

$$P_d = P_B - P_L = \Delta P \quad (4)$$

**Tafel 2: Undichtigkeit von Silobehältern unterschiedlichen Baumaterials
und verschiedener Bauart**

Bauart	Baumaterial	Mittlere nachge- pumpte Luftmenge Liter/std. u. m ³	Mittlere Abweichung Siloraum	Behälter- zahl Stück	Leckgröße mm ² /m ³ Siloraum
Hoch- silos	Holz	96,0	26,0	3	2,090
	Betondauben	74,6	32,1	4	1,625
	Schalungssteine	33,5	11,0	4	0,729
	Formsteine	31,6	29,3	23	0,688
	Monolith. Beton	17,1	13,6	5	0,373
	Metall	9,5	9,0	5	0,207
	Durchschnitt	43,7	27,7	44	0,952
Flach- silos	Formsteine	125,1	9,9	2	2,725
	Monolith. Beton	38,6	19,8	25	0,840
	Schalungssteine	17,0	7,4	5	0,370
	Fertigteile	5,8	3,0	2	0,126
	Durchschnitt	46,6	39,2	34	1,015

Da sowohl $P_B = \text{konstant}$ als auch $P_L = \text{konstant}$, beträgt der jeweilige Undichtigkeitswert unter Berücksichtigung der Gln. (2), (3) und (4)

$$F = \frac{\Delta w}{\Delta t} (2 g \gamma P)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Alle Undichtigkeitswerte wurden für eine Lufttemperatur von 20°C berechnet und sind ebenfalls in Tafel 2 angegeben.

Im Durchschnitt wiesen bei den Hochsilos Behälter aus Holz und Betondauben die größten Undichtigkeiten auf. Am dichtesten sind Metallsilos. Dazwischen liegen Behälter aus Formsteinen, Schalungssteinen und monolithischem Beton. Bei einem Vergleich mit den Werten der Flachsilos ergeben sich keine großen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die beste Abdichtung wurde sogar bei einem Flachsilo aus Beton-Fertigteilen gemessen. Dieser Wert lag um 40% niedriger als beim dichtesten Hochbehälter, dessen Wandung aus vernieteten Stahlplatten bestand. Moderne Flachbehälter sind also entgegen einer weit verbreiteten Ansicht nicht undichter als Hochbehälter aus Metall.

In einigen Versuchen wurden die nachgepumpten Luftmengen auch bei unterschiedlichen Druckdifferenzen von $\Delta P = 5$ bis 20 mm WS gemessen. Die aus diesen Ergebnissen berechneten F-Werte sind in Tafel 3 zusammengestellt. Mit zunehmendem Überdruck ist in allen Versuchen bei $\Delta P = 5 - 10$ mm WS eine leicht steigende Tendenz des Undichtigkeitswertes festzustellen (s. Bild 5). Zwischen $\Delta P = 10 - 20$ mm WS flacht der Kurvenverlauf ab und nähert sich etwa konstanten Werten. Der maximale Druckunterschied war bei allen Messungen nie höher als $\Delta P = 20$ mm WS. Es kann folglich angenommen werden, daß die Sperrdrücke der Siloverschlüsse nicht überschritten wurden und die Leckverluste allein den Behälterundichtigkeiten zugeschrieben werden müssen. Im Durchschnitt aller Untersuchungsergebnisse muß unter den Bedingungen der Praxis mit Leckgrößen von $F = 1,0 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum gerechnet werden. Weitere Messungen der Behälterundichtigkeit erscheinen notwendig, um breiter fundierte Durchschnittswerte zu erhalten und den Einfluß des Siloalters auf die Leckgröße festzustellen.

Tafel 3: Einfluß des Druckunterschiedes zwischen Behälter und Atmosphäre auf die Gasdichtigkeit von Hochsilos

Behälter- druck mm WS	F-Werte von Silobehältern unterschiedlichen Baumaterials in							
	$\text{mm}^2/\text{m}^3 \text{ Siloraum}$							
	Formsteine + Verputz					monolith. Beton	Beton- dauben	Vernietete Stahlplatten
Silo- weiß I	Silo- weiß II	Inertol	Verisil	ohne				
5	0,4198	-	-	0,1390	0,0524	0,3640	2,5500	0,3530
10	0,6910	-	0,8500	0,2014	0,1764	0,4865	2,8580	0,3955
15	-	0,2940	0,8780	0,2815	0,1585	-	-	-
20	-	0,1097	-	0,3060	-	-	-	-

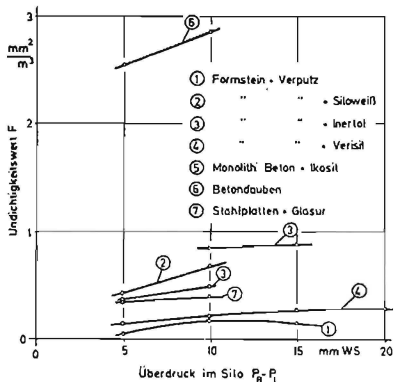


Bild 5: Einfluß des Behälterdrucks auf die Undichtigkeitswerte von Hochsilos aus unterschiedlichem Baumaterial

Die Wirksamkeit der Siloverschlüsse undichter Behälter soll jetzt am Beispiel eines 88 m^3 großen Behälters, dessen Kennlinie des Ausgleichsvolumens gegeben ist [1], theoretisch untersucht werden. Er sei vollständig mit Luft gefüllt und sein Atemsack sei infolge ansteigenden Überdrucks vollständig zusammengedrückt und in seiner Ausgleichskapazität bereits erschöpft. Der angenommene Fall repräsentiert wegen der Nichtbeachtung des Ausgleichsvolumens zunächst auch Behälter, die nur mit einer Staurinne oder Ventilen ausgerüstet sind. Bei ansteigendem Behälterdruck infolge Erwärmung der eingeschlossenen Luft gilt für die ausfließende Luftmenge nach Gln. (2) und (3) unter Einführung der Zustandsgleichung für P_B

$$\frac{dw}{dt} = - \sqrt{2g} F \sqrt{\gamma \left[\frac{w R_L T(t)}{V} - P_L(t) \right]} \quad (6)$$

wo

$$\begin{aligned}
 R_L &= \text{Gaskonstante der Luft} \\
 T(t) &= \text{Lufttemperatur im Behälter zur Zeit } t \text{ in } ^\circ\text{K} \\
 V &= \text{Behältervolumen in m}^3 \\
 P_L(t) &= \text{atmosphärischer Luftdruck zur Zeit } t \text{ in kp/m}^2
 \end{aligned}$$

Um die Bedingungen der Praxis zu erfüllen, müssen jetzt die witterungsabhängigen Größen der Gastemperatur im Behälter $T(t)$ und des atmosphärischen Luftdrucks $P_L(t)$ als Zeitfunktionen beschrieben werden. Es wird daher die Unterstellung notwendig, daß Temperatur- und Druckänderungen in den einzelnen Intervallen linear erfolgen. Die Lufttemperatur im Behälter und der atmosphärische Luftdruck betragen demnach

$$T(t) = T_1 \pm \frac{\Delta T}{t_1} t \quad (7)$$

und

$$P_L(t) = P_{L1} \pm \frac{\Delta P}{t_1} t ; \quad (8)$$

In den Gleichungen (7) und (8) sind

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \text{Lufttemperatur im Behälter zu Beginn des Intervalles in } ^\circ\text{K} \\
 P_{L1} &= \text{atmosphärischer Luftdruck zu Beginn des Intervalles in kp/m}^2 \\
 \Delta T &= \text{Temperaturänderung im Behälter während des Intervalles} \\
 \Delta P &= \text{Luftdruckänderung während des Intervalles} \\
 t_1 &= \text{Intervalldauer in h}
 \end{aligned}$$

Für $P_B(t=0) \geq P_{L1}$, steigendes $T(t)$, fallendes $P_L(t)$ und stündliche Intervalleinheiten gilt nach Einsetzen von

$$\gamma = \frac{P_B}{R_L T(t)}$$

die Beziehung

$$\frac{dw}{dt} = - \sqrt{2 \cdot g \cdot F} \sqrt{\frac{R_L}{V^2} w^2 \left[T_1 + \frac{\Delta T}{t_1} t \right] - \frac{w}{V} \left[P_{L1} - \frac{\Delta P}{t_1} t \right]} \quad (9)$$

Durch entsprechende Vorzeichenänderung in Gl. (8) lassen sich auch die Bedingungen des steigenden Luftdrucks in Gl. (9) beschreiben.

Eine sinnvolle analytische Lösung der Differentialgleichung (9) ist nicht möglich, Aus diesem Grunde wurden die ausströmenden Luftmengen numerisch auf einer elektronischen Rechenanlage ermittelt. Temperaturanstieg ΔT , Luftdruckänderung ΔP und Intervalldauer t_1 wurden den vorliegenden Meßergebnissen des Monats Juli entnommen und repräsentieren charakteristische Extremwerte. Insgesamt wurden 4 Variationen gewählt, die in folgender Übersicht zusammengestellt sind:

Intervall	Temperaturanstieg ΔT (grad)	Luftdruckänderung ΔP (kp/m ²)	Intervalldauer t_1 (h)
I	4	60	17
II	20	15	7
III	10	5	2
IV	20	5	2

Als Anfangswerte der Behältertemperatur bzw. des atmosphärischen Luftdrucks und des Behälterdrucks P_B wurden $T_1 = 24^\circ\text{C}$ bzw. $P_{L1} = P_B(t=0) = 10330 \text{ kp/m}^2$ und als Parameter der Behälterundichtigkeit Leckgrößen von $F = 0,2, 0,4$ und $0,8 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum bestimmt. Die errechneten Leckverluste in Abhängigkeit von der Zeit sind in Bild 6 dargestellt. Daneben sind auch die Leckverluste bei unbehindertem Druckausgleich zwischen Behälter und Außenatmosphäre sowie bei theoretisch dichtem Behälter eingezeichnet. Im letzteren Fall wurde eine Sperrwirkung von 100 mm WS angenommen.

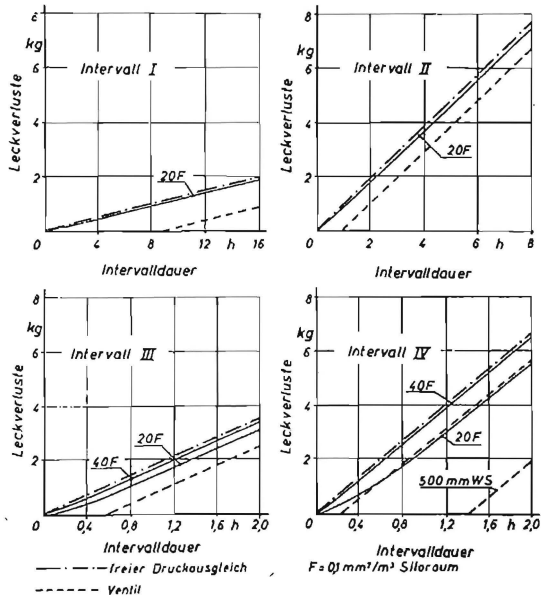


Bild 6: Einfluß der Undichtigkeit auf die Leckverluste von Silos mit Ventilverschluß oder Staurinne

Die errechneten Verluste haben bei einer Leckgröße von $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum in allen Fällen praktisch die Höhe der Verluste bei unbehindertem Druckausgleich erreicht. Selbst Undichtigkeiten von $F = 0,2 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum lassen mit Ausnahme des weniger häufigen Intervalls IV ($\Delta T = 20 \text{ grd}$, $t_1 = 2 \text{ Stunden}$) soviel Luft ausfließen, daß eine weitgehende Annäherung an die Werte des freien Druckausgleichs erfolgt.

Der Einfluß der Undichtigkeiten auf das Einströmen von Luft bei umgekehrten Druckgefälle bedarf ebenfalls der Untersuchung. In diesem Falle wird unterstellt, daß der Behälter keinen Atemsack besitzt und mit einem Ventil oder einer Staurinne mit 40 mm WS Sperrdruck ausgerüstet ist. Anfangsbedingungen und Intervalldauer sind die gleichen wie beim Ausströmen. Die Temperatur- und Druckänderungen sind größenmäßig gleich, nur daß sie sich jetzt in umgekehrter Richtung ändern. Im Gegensatz zum Fall des Ausströmens wird jetzt das Spezifische Gewicht der Luft als konstant angenommen. Ungenauigkeiten infolge dieser Unterstellung können in ihrer Bedeutung vernachlässigt werden. Gleichung (9) vereinfacht sich dann zu

$$\frac{dw}{dt} = \sqrt{2\gamma g} F \sqrt{P_{L1} + \frac{\Delta P}{t_1} t - \frac{R_L}{V} \left[T_1 - \frac{\Delta T}{t_1} t \right]} w \quad (10)$$

die ebenfalls numerisch gelöst wurde.

Wegen des geringen Sperrdruckes von 40 mmWS liegen die Aufnahmegrenzen des unbehinderten Druckausgleichs und des Unterdruckventils näher zusammen (s. Bild 7). Für die gleichen Parameter von F ergeben sich in den Intervallen I bis III mit einem Temperaturabfall bis zu 10 grd in zwei Stunden vergleichsweise unbedeutende Änderungen. Bei einer Abkühlung von 20 grd in zwei Stunden (Intervall IV) wird die Annäherung an die Werte des freien Druckausgleichs jedoch soweit verzögert, daß nur bei Leckgrößen von mindestens $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum die Einlaßwerte des Ventils überschritten werden. Bei Undichtigkeiten von $0,2 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum tritt in diesem Falle das Ventil in Tätigkeit.

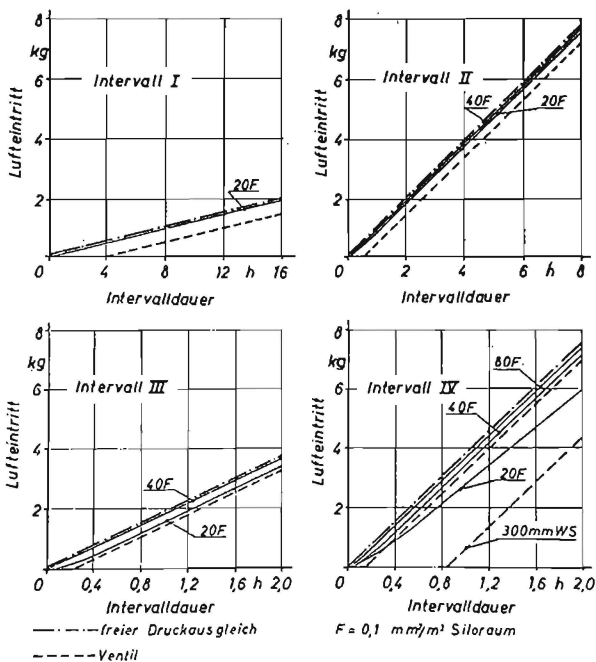


Bild 7: Einfluß der Undichtigkeiten auf den Lufteintritt in Silos mit Ventilverschluß oder Staurinne

um durch die Behälterlecks zu entweichen und Druckausgleich herbeizuführen. Um den Gasaustausch in Metall-Hochbehältern während der Lagerungsperiode der Silage wirksam herabzusetzen, bedarf es also anderer Mittel als Ventile. Mit einer besseren Wärmeisolierung würden die Temperaturschwankungen innerhalb der Silobehälter und damit der Antrieb der "Siloatmung" wesentlich vermindert. Noch verbleibende Druckänderungen könnten dann von einem Ausgleichsvolumen leichter kompensiert werden.

In den bisher behandelten Beispielen der Behälterdichtigkeit wurde die Arbeit eines Ausgleichsvolumens, wie es ein Folienverschluß oder ein Atemsack darstellt, nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse und Aussagen gelten daher auch nur für Behälter, die mit einem Tauchdeckel, Über- und Unterdruckventil oder auch einem Verschluß ohne Sperrwirkung ausgerüstet sind. Wie sich ein zusätzliches Ausgleichsvolumen auf den Gasaustausch auswirkt, soll wiederum am Beispiel des 88 m^3 großen Behälters, der jetzt zusätzlich zu den Ventilen mit einem Atemsack von 9 m^3 Größe ausgerüstet ist, gezeigt werden.

Die von Riemann [13] angegebene Kennlinie des Atemsackes läßt sich durch die empirisch gefundene Beziehung

$$V_A = \left[\frac{P_L - P_B - 2}{14} \right]^{0,6215} + 5 \quad (\text{in } \text{m}^3) \quad (11)$$

mit sehr guter Annäherung beschreiben (s. Bild 8). Danach stünden praktisch $6,85 \text{ m}^3$ als Ausgleichsvolumen V_A zur Verfügung, weil das Unterdruckventil des Silos bereits bei einem Unterdruck im Behälter von $P_B - P_L = 40 \text{ mm WS}$ anspricht. Von $0 \leq V_A \leq 5,0 \text{ m}^3$ sind nur geringe Drücke bis ca. 2 mm WS zur Verformung des Atemsackes erforderlich.

Dieser Teil steht also zum Ausgleich von Über- oder Unterdruck ohne nennenswertes gleichzeitiges Ein- oder Ausströmen von Gasen zu Verfügung. Im Bereich von $5,0 \leq V_A \leq 6,85$ sind höhere Dehnungsdrücke, bei denen die Undichtigkeiten wieder größere Bedeutung erlangen, aufzuwenden. Die Analysis soll sich daher auf diesen zweiten Teil beschränken.

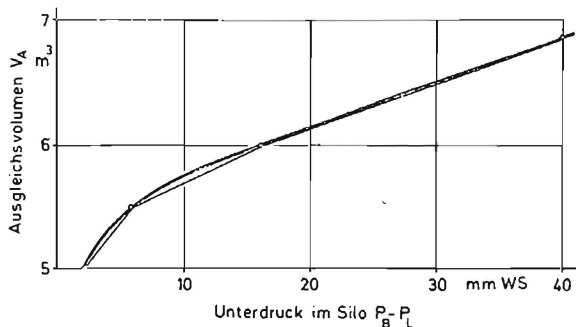


Bild 8: Die Kapazität des Atemsackes in Abhängigkeit vom Druckunterschied zwischen Außenatmosphäre und Silobehälter

Die in Bild 8 dargestellte Kennlinie mußte aus rechnerischen Gründen linear in drei Abschnitten mit Hilfe von Sekanten durch die Punkte (5;2) , (5,5;6) , (6;16) und (6,85;40) angenähert werden. In den einzelnen Abschnitten gilt dann

$$V_A = V_i + a_i (P_L - P_B - P_i) \quad (12)$$

Das Volumen des Silobehälters V_B , das sich aus seinem Gesamtvolumen $V_g = 88 \text{ m}^3$ abzüglich des jeweiligen Atemsackvolumens V_A ergibt, beträgt

$$V_B = V_g - \left[V_i + a_i (P_L - P_B - P_i) \right] \quad (13)$$

Die Größen V_i , a_i und P_i sind für die einzelnen Abschnitte (Sekanten) aus Tafel 4 zu entnehmen.

Tafel 4: Konstanten der Gleichung (12)

Abschnitt i	Geltungsbereich		V _i m ³	P _i mm WS	a _i m ³ /mm WS
	mm WS	m ³			
i = 1	2 ≤ P _L - P _B ≤ 6	5 ≤ V _A ≤ 5,5	5,0	2,0	0,125
i = 2	6 ≤ P _L - P _B ≤ 16	5,5 ≤ V _A ≤ 6,0	5,5	6,0	0,050
i = 3	16 ≤ P _L - P _B ≤ 40	6,0 ≤ V _A ≤ 6,85	6,0	16,0	0,0354

Der Lufteintritt wird wiederum für die Druck- und Temperaturwerte der für die obigen Berechnungen benutzten Intervalle berechnet. Aus den Gln. (2), (3) und (4) folgt zunächst

$$\frac{dw}{dt} = \sqrt{2 g (P_L - P_B)} \quad (14)$$

In obiger Gleichung beträgt der Behälterdruck

$$P_B = \frac{w R_L T(t)}{V_B} \quad (15)$$

Vereinfachung von Gl. (13) führt zu

$$V_B = V_G - a_i (P_L - P_B) \quad (16)$$

indem

$$V_G = V_g - V_i + a_i P_i \quad (17)$$

gesetzt wird. Einsetzen von Gl. (16) in Gl.(15) führt zu der quadratischen Gleichung

$$a_i (P_B)^2 + (V_G - a_i P_L) P_B - w R_L T(t) = 0 \quad (18)$$

mit der physikalisch sinnvollen Lösung

$$P_B = \frac{-(v_G - a_i P_L) + \sqrt{(v_G - a_i P_L)^2 + 4 a_i w R_L T(t)}}{2 a_i} \quad (19)$$

Einsetzen von Gl. (19), sowie der Gln. (7) und (8) für den Fall abnehmender Behältertemperatur und ansteigenden atmosphärischen Druckes in die Gl. (14) ergibt die Beziehung

$$\frac{dw}{dt} = \sqrt{2 \gamma g} F \left[P_{L1} + \frac{\Delta P}{t_1} t - \frac{a_i (P_{L1} + \frac{\Delta P}{t_1} t) - v_G}{2 a_i} + \frac{\sqrt{\left[v_G - a_i \left(P_{L1} + \frac{P}{t_1} t \right) \right]^2 + 4 a_i w R_L \left(T_1 + \frac{T}{t_1} t \right)}}{2 a_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

nach der sich jetzt der Lufteintritt numerisch berechnen läßt.

In Bild 9 sind die während der Intervalle I bis IV eintretenden Luftmengen für die Parameter der Leckgröße F dargestellt. Im Vergleich zum Behälter ohne Atemsack ist insgesamt wegen der Elastizität des Atemsackes eine Verzögerung des Lufteintritts festzustellen. Der Druckunterschied zwischen Atmosphäre und Behälter gleicht sich aber auch jetzt bei geringerem Temperaturabfall im Silo unter den Bedingungen der Praxis vollständig aus (s. Bild 9, Intervall I). Nimmt die Silogastemperatur $T(t)$ um ca. 3 bis 5°C pro Stunde ab, so gleichen sich die errechneten Luftmengen erst bei Leckgrößen über 0,8 mm²/m³ Siloraum den Werten des unbehinderten Druckausgleichs an (s. Bild 9, Intervall II und Intervall III). Beträgt die Abkühlung 10°C pro Stunde, so tritt auch bei einer Leckgröße von 1,0 mm²/m³ Siloraum kein vollständiger Druckausgleich mehr ein (s. Bild 9, Intervall IV). Bis zu einer Abkühlung von 10°C in zwei Stunden liegen die Gewichte der aufgenommenen Luftmengen bei Leckgrößen bis zu 0,4 mm²/m³ Siloraum näher an den Aufnahmewerten des unbehinderten Druckausgleichs als an den Werten des Unterdruckventils. Ist die Abkühlung stärker, geschieht das erst bei doppelter Leckgröße.

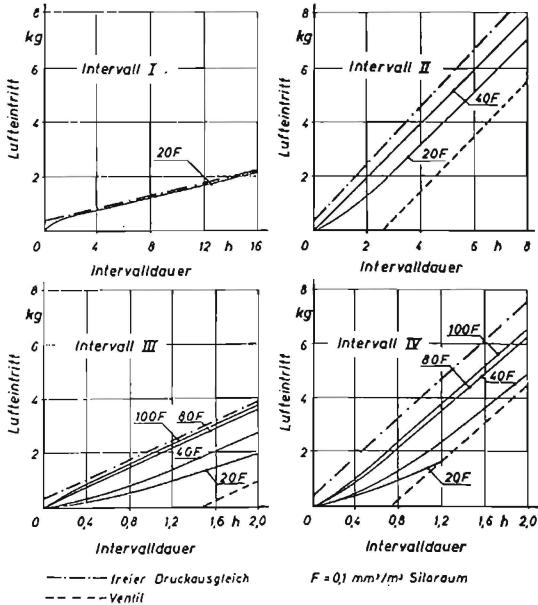


Bild 9: Einfluß der Undichtigkeit auf den Lufttritt in Silos mit Ventilverschluß und Atemsack

Die Berechnungen zeigen insgesamt, daß der Atemsack Druckänderungen im Behälter nur bei sehr geringen Verformungsdrücken bis zu ca. 2 mm WS erfolgreich ausgleichen kann. In der Phase ansteigenden Unterdrucks, nach vollständiger Ausnutzung des annähernd druckfrei arbeitenden Teiles des Ausgleichsvolumens, strömt durch die Undichtigkeiten mit einer Größe über $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum soviel Luft ein, daß die Werte des unbehinderten Druckausgleichs nahezu erreicht bzw. bei stärkerem Temperaturrückgang die Werte der Ventile noch klar überschritten werden. Aus diesen Gründen darf nicht das gesamte Ausgleichsvolumen, sondern nur das annähernd druckfrei arbeitende Teilvolumen zum Ausgleich der witterungsbedingten Druckschwankungen in Rechnung gestellt werden.

Die Berechnung des Gasaustausches während der Lagerzeit

=====

Der Gesamtgasaustausch während einer längeren Lagerperiode der Silage läßt sich berechnen, wenn dieser Zeitraum sich anhand von Meßwerten in Intervalle mit bekanntem Temperatur- und Druckverlauf einteilen läßt. Zur Bildung solcher Intervalle standen mehrere Temperatur- und Druckschriebe zur Verfügung, aus denen jeweils die Maxima und Minima sowohl der Silogastemperatur T als auch des atmosphärischen Druckes P_L fortlaufend tabelliert wurden. Jedem Extremwert von T wurde ein zeitlich korrespondierender Wert von P_L und jedem Extremwert von P_L ein zeitgleicher Gegenwert von T zugeordnet. Durch diese Maßnahme und lineare Annäherung der Temperatur- und Druckkurven sind die Intervalle, die je nach Witterungsverlauf einmal oder mehrmals an jedem Tage auftreten, rechnerisch ausreichend beschrieben.

Bevor der Einfluß der Undichtigkeit auf den Gasaustausch während längerer Lagerperioden berücksichtigt wird, sollen aus Vergleichsgründen zunächst die Austauschmengen theoretisch dichter Silobehälter ermittelt werden. Ändert sich unter diesen Bedingungen in einem gasdichten Silo die Temperatur des über der

Silage liegenden Gasgemisches nach Abschluß der Gärtätigkeit von T_1 nach T_2 , so ändert sich der Druck dieses Gemisches bei konstant bleibendem Volumen von P_{I1} bzw. P_{II1} nach

$$P_{I2} = P_{I1} \frac{T_2}{T_1} = P_{II1} \frac{T_2}{T_1} = P_1 \frac{T_2}{T_1} \quad (21)$$

wobei

- V_1 = Leerraum oberhalb der Silage
- V_2 = Porenvolumen der Silage
- P_{I1} = Druck im Leerraum über der Silage (V_1) zu Beginn des Intervalls
- P_{II2} = Druck im Porenvolumen (V_S) der Silage zu Beginn des Intervalls
- P_1 = Druck im Silobehälter zu Beginn des Intervalls

Der Druckausgleich im Behälter zwischen dem Leerraum V_1 und dem Porenvolumen V_S erfolge isotherm. Dabei ändern sich je nach Druckgefälle die beiden Teilvolumina V_1 und V_S um den Betrag $\pm \Delta V$. Es fließen also jedesmal geringe Gasmengen zwischen den beiden Teilvolumina hin und her und erfahren eine Abkühlung oder Erwärmung. Da die Berechnung des Gasaus-tausches mit Durchschnittstemperaturen erfolgt, in die auch die Temperaturen der unteren Gasschichten in unmittelbarer Nähe der Silageoberfläche eingehen, ist dieser Wärmetransport zum größten Teil durch Messung erfaßt und soll daher in der Theorie nicht gesondert berücksichtigt werden. Für den internen Druckausgleich zwischen V_1 und V_S in dichten Behältern gilt dann zunächst

$$P_{I2} = P_{I2}' \frac{V_1}{V_1 \pm \Delta V} \quad (22)$$

und

$$P_{II2} = P_{II1} \frac{V_S}{V_S \pm \Delta V} \quad (23)$$

Nach erfolgtem Druckausgleich zwischen den beiden Teilvolumina beträgt der Enddruck

$$P_{I2} = P_{II2} = P_2 \quad (24)$$

Aus den obigen Beziehungen folgt

$$\Delta V = \frac{\pm P_{I2}' V_1 V_S \pm P_{III1} V_1 V_S}{P_{I2}' V_1 + P_{III1} V_S} \quad (25)$$

Einsetzen von Gl. (25) in Gl. (22) oder (23) ergibt unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Gl. (21) und (24)

$$P_2 = \frac{P_1 \left[\frac{T_2}{T_1} V_1 + V_S \right]}{V_1 + V_S} \quad (26)$$

Der Gasaustausch von Behältern mit Ventilen und Atemsack läßt sich jetzt nach dem Flußdiagramm in Bild 10 auf einer elektronischen Rechenanlage simulieren. Die einzelnen Rechenoperationen, welche die Arbeit des Ausgleichsvolumens und der Ventile repräsentieren, sowie zur Ermittlung der Gasmengen führen, sind aus dem Simulationsmodell in Bild 10 ersichtlich und sollen nicht näher betrachtet werden. Zu erwähnen wäre lediglich, daß der Sauerstoffanteil der Luft mit 23,2% angenommen wurde und daß auf die Berechnung der ausströmenden Gasmengen verzichtet werden kann, da für den Sauerstoffeintritt nur der Behälterdruck und der Zustand des Ausgleichsvolumens am Ende des jeweils vorhergehenden Intervalles von Bedeutung sind. Alle Berechnungen gelten für Grassilage.

Der Einfluß der Undichtigkeiten auf den Gasaustausch von Behältern mit Ventilen und Ausgleichsvolumens, deren Leckgrößen $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum nicht überschreiten, könnte durch Einbeziehen der Gln. (9) und (20) in das Simulationsmodell erfaßt werden. Aus Zeitgründen mußte diese Maßnahme bisher unterbleiben, soll aber in späteren Untersuchungen nachgeholt werden. Bei Leckgrößen von $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum und darüber läßt sich der Gasaustausch mit sehr guter Annäherung nach dem Simulationsmodell in Bild 10 bestimmen, wenn gemäß den nach Gln. (9) und (20) gefundenen Ergebnissen nur der mit Verformungsdrücken bis zu 2 mm WS arbeitende Teil des Atemsackes als voll wirksam in Rechnung gestellt wird und darüberhinaus die Sperrwirkung der Ventile ohne Berücksichtigung bleibt. Der Gasaustausch von

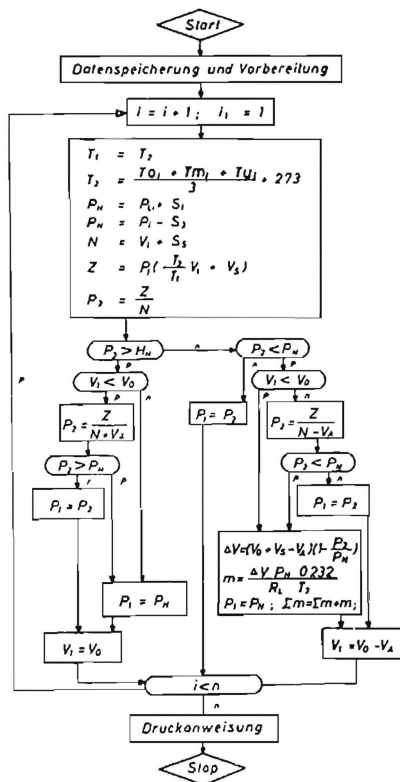


Bild 10: Flußdiagramm zur Berechnung des Sauerstoffeintritts in Silobehälter mit Ventilen und Atemsack

Behältern, die nur mit einem Ventilverschluß, einem Tauchdeckel oder einem Verschluß ohne Stauwirkung ausgerüstet sind, läßt sich berechnen, wenn unter Berücksichtigung der in der Praxis gefundenen Leckgrößen nach Gln. (9) und (10) die Bedingung völligen Druckausgleichs in das Simulationsmodell eingeführt wird.

Die Behälter, an denen Temperatur- und Druckmessungen zur Ermittlung des aus dem Gasaustausch resultierenden Sauerstoffeintritts vorgenommen wurden, waren mit den in folgender Übersicht angegebenen Verschluß- und Druckausgleichssystemen ausgerüstet:

Behälter	Größe m ³	Ausgl.-vol. m ³	Verschluß	Sperrdrücke Überdruck (mmWS)	der Verschlüsse Unterdruck (mm WS)
Stahlbehälter	325	18	Ventil	100	40
Al-Platten	400	5	Ventil	70	70
monolith. Beton	250	-	Staurinne	40	40
Formsteine	100	-	Staurinne	40	40

Die Sauerstoffaufnahmen des Stahlbehälters, wie sie sich bei unterschiedlicher Abdichtung und Ausrüstung nach den Meßwerten des Monats Juli 1966 ergeben würden, sind in Tafel 5 zusammengestellt. Dieser Behälter würde je nach Füllungsgrad zwischen 2,01 und 0,201 kg Sauerstoff je Kubikmeter Silage aufnehmen, wenn er lediglich mit Ventilen ausgerüstet wäre (s. Bild 11), und seine Undichtigkeiten ein Maß von 0,4 mm²/m³ Siloraum übertreffen würden. Ausrüstung mit einem Atemsack und vollständige Gasdichtigkeit würden den Sauerstoffeintritt um 99% bei 35% Füllung herabsetzen bzw. bei 85% Füllung restlos unterbinden. Werden allerdings die gemessenen Undichtigkeiten in Rechnung gestellt, so ergibt sich je nach Füllungsgrad im Vergleich zum unbehinderten Druckausgleich eine Verminderung auf 22,9 bis 1,6%. Der Aluminiumbehälter nimmt wegen des kleineren Atemsackes wesentlich größere Sauerstoffmengen auf (s. Bild 12). Eine zügige Füllung beider Behälter auf mindestens 85% des Gesamtvolumens bewirkt jedoch, daß nur noch unbedeutende Sauerstoffmengen aufgenommen werden.

Tafel 5: Sauerstoffaufnahme der verschiedenen Silobehälter

Behälter und Ausrüstung	Leckgröße +)	Zeitraum	Sauerstoffaufnahme in kg O ₂ /m ³ Silage					
			v.H.der Werte des unbehindert.Druckausgl.			bei einem Füllungsgrad des Behälters von		
			35 %	60 %	85 %	35 %	60 %	85 %
Stahlbeh.	1o F ⁺⁺)	Juli 1966	2,0100	0,7310	0,2010	-	-	-
Vent. +	4 F	Juli 1966	0,3439	0,0264	0,0013	22,9	7,0	1,6
Ausgl.-vol.	o F	Juli 1966	0,0202	0,0018	0,0000	1,0	0,25	-
Al-Beh.	4 F	Juli 1966	0,4330	0,0745	0,0007	-	-	-
Formstein	1o F	Juli 1967	0,5700	0,2200	0,1000	-	-	-
mon.Beton	1o F	Juli 1967	0,3200	0,1220	0,0500	-	-	-

+) F = 0,1 mm²/m³ Siloraum; ++) 1o F = unbehinderter Druckausgleich;

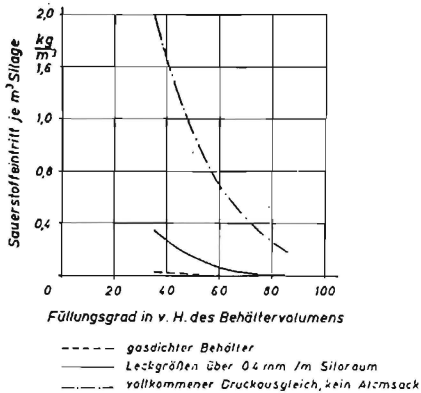


Bild 11: Vergleich der Sauerstoffaufnahmen des dunklen Stahlbehälters bei unterschiedlicher Abdichtung

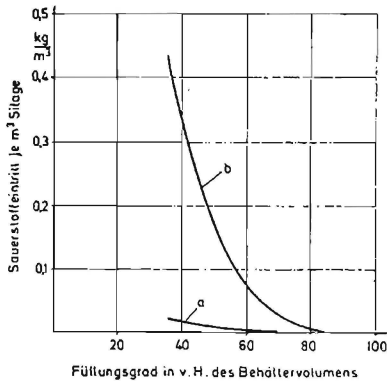


Bild 12: Sauerstoffeintritt in Metallbehälter mit unterschiedlichem Ausgleichsvolumen
a = Stahlbehälter; b = Al-Behälter;

Die Sauerstoffaufnahme des Beton- und Formsteinbehälters ist trotz fehlender Ausgleichsvolumen wegen der besseren Wärmeisolation im gleichen Monat des folgenden Jahres bei 35 % Füllungsgrad etwa ebenso groß wie beim Stahlbehälter mit Leckgrößen über $0,4 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ Siloraum. Mit abnehmender Behälterfüllung geht allerdings die Sauerstoffaufnahme des Stahlbehälters wegen der Tätigkeit des Ausgleichsvolumens vergleichsweise stärker zurück (s. Bild 13).

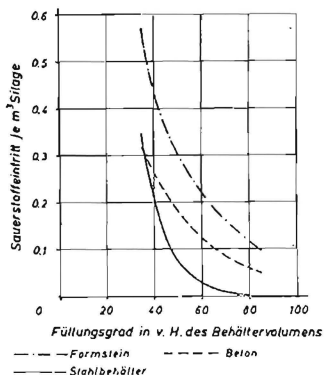


Bild 13: Vergleich der Sauerstoffaufnahmen unterschiedlicher Silotypen bei Berücksichtigung der Undichtigkeiten

Bisher konnte der Gang der Gastemperaturen im Silo nicht kontinuierlich über eine gesamte Lagerperiode erfaßt werden. Lediglich beim dunklen Stahlbehälter stehen neben den Daten des Monats Juli auch Aufzeichnungen der Monate Oktober und Dezember zur Verfügung. Die daraus berechneten Sauerstoffmengen zeigen bei vergleichbarer Silofüllung eine von Juli bis Dezember etwa sinusförmig abfallende Tendenz (s. Bild 14).

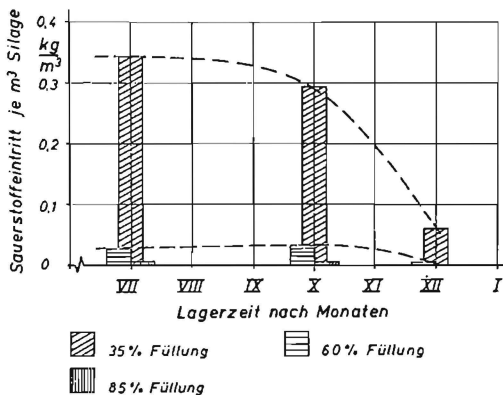


Bild 14: Einfluß der Jahreszeit auf den Sauerstoffeintritt

Unter der Voraussetzung, daß die monatlichen Messungen der angenommenen Sinuslinie folgen, lassen sich die Gesamtsauerstoffmengen längerer Zeiträume kalkulatorisch ermitteln. Eine Menge von 1 m³ Frühjahrssilage würde demnach während einer halbjährigen Lagerzeit von Anfang Juni bis Ende November bei 35% Füllung einer Gesamtsauerstoffmenge von ca. 1,6 kg ausgesetzt sein (s. Bild 15). Dabei muß berücksichtigt werden, daß sich diese Durchschnittsmenge wegen der unregelmäßigen Verteilung an den primären Berührungsstellen mit der Silage vervielfacht und im Kern des Futterstockes entsprechend verringert. Es ist also zu erwarten, daß je nach Stabilität der Silage Schäden auftreten können, die von mehr oder weniger starken und örtlich begrenzten Atmungsverlusten bis zum völligen Verderb reichen. Auch bei einer Füllung von 60% (ca. 0,1725 kg O₂/m³ Silage) dürfte diese Gefahr nicht völlig ausgeschlossen sein. Herbstsilagen sind vergleichsweise wegen des um 55 bis 80% geringeren Sauerstoffeintritts weniger gefährdet. Metallbehälter ohne Ausgleichsvolumen würden etwa die

sechsfache Sauerstoffmenge aufnehmen. Untersuchungen seitens der Gärungsbiologie müssen zeigen, welche Schäden dadurch unter den verschiedenen Bedingungen entstehen können. Im übrigen werden zur Absicherung der gefundenen Ergebnisse mehr langfristige Versuche benötigt.

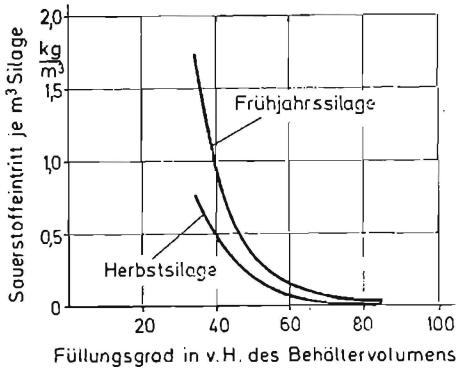


Bild 15: Gesamtsauerstoffeintritt bei unterschiedlicher Lagerungsdauer

Abschließend kann festgestellt werden, daß nur zügig und maximal gefüllte Silos die Gewähr bieten, daß ihre Sauerstoffaufnahme in vertretbaren Grenzen bleibt. Ein zuverlässiges, praktisches und relativ billiges Mittel zur Verminderung des Gasaustausches stellen die verschiedenen Folienverschlüsse wie Seegerverschluß, Gürtelverschluß, Innenverschluß und der WP-Verschluß dar. Sie verhindern zum Teil die Bildung atmungsfähigen Leerraumes, ermöglichen einen verhältnismäßig dichten Behälterabschluß und können Druckunterschiede zwischen Behälter und Atmosphäre durch Nachgeben ausgleichen. Auch eine Abdichtung mit billigen "Einwegfolien" dürfte einen ähnlichen Erfolg erzielen.

Ein drucklos arbeitendes Speichersystem für die Silogase (8) oder auch Einleiten von Kohlendioxyd bei Unterdruck im Silo stellen andere Möglichkeiten dar, um dem Sauerstoffeintritt zu begegnen. Vor allem aber bedarf die Wärmeisolation der im Freien aufgestellten Behälter einer stärkeren Beachtung.

Schrifttum

- [1] Barre, H.J., und S.L. Sammet: Farm structures. New York: John Wiley & Sons 1959.
- [2] Blohm, G., und H. Jungehülsing: Futterbau und Rindviehhaltung. 2. Aufl. Hamburg, Berlin: Verlag P. Parey 1964.
- [3] Eichholtz, F.: Silage und ähnliche Gärerzeugnisse. Braunschweig: Vieweg 1960. Die Wissenschaft, Bd. 96 .
- [4] • Grimm, A.: Die Kosten der Grasanwelksilage bei verschiedenen Ernte-, Konservierungs- und Fütterungsverfahren. Landw. Diss. TH München 1966. KTL-Ber.üb.Landtechn. H.106: Wolfratshausen 1967 .
- [5] Harland, Burmeister, Hartung, Saul: Microbiology of ensiled high moisture corn. Applied Microbiology Jan. 1966, S. 31.
- [6] Hell, K.W.: Optimale Investitionen in der Silowirtschaft bei Grassilagen als Futtergrundlage in der Rindviehhaltung. Frankfurt/Main: Arb.gem.Landw.Bauwes. 1966. ALB-Schriftenreihe 28 .
- [7] Holmann, J.P.: Heat Transfer. New York, London: McGraw-Hill 1963.
- [8] Isaacs, G.W., I.J. Ross und I.F. Tuite: A zero pressure venting system of airtight storages. ASAE Paper 59.- 810. Americ.Soc.of Agric.Engrs, St. Joseph, Mich. 1959.
- [9] Kloeppe, R.: a) Gärfutterbereitung, b) Gewichte. RKTL-Kartei . Schloß Bredeneck über Preetz: Rationalisierungskuratorium f.Landwirtsch. 1960.
- [10] König, A., und J. Wilcke: Ursachen und Ausgleich des Unter- bzw. Überdrucks in gasdichten Gärfuttersilos. Grundl. Landtechn. 17 (1967) Nr. 5, S. 165/71.
- [11] König, A., und J. Wilcke: Druckausgleichssysteme an gasdichten Silos. Landtechn. 21 (1966) H.19, S.658/62
- [12] Lüdemann, H. und K.Riebe: Rationelle Futterwirtschaft, der Weg zum Erfolg. Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1967

- [13] Riemann, U.: Das Arbeitsverfahren Feuchtgetreidesilage. Ber.üb.Landtechn. Bd. 90. Wolfratshausen 1965.
- [14] • Rietschel, H., und W.Raiß: Lehrbuch der Heiz- und Lüftungstechnik. 14.Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1963.
- [15] Rojahn, J., J.Wagner und W.Harnisch: Untersuchungen des Gärverlaufes der Luzerne-Silage unter verschiedenen Silierungsbedingungen. Zentralbl. Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene 2. Abtlg. 118(1964) S. 148/70.
- [16] Schulz, H.: Folien und Folienverschlüsse in der Silowirtschaft. Mitt.DLG 82(1967) H.23, S.813 u. H.24, S.835/38.
- [17] Wilcke, J.: Untersuchungen über die Druckausgleichssysteme von gasdichten Gärfutterbehältern. Diss.Univers.Kiel 1966.
- [18] Zimmer, E.: Gärfutterbereitung im Futterbaubetrieb. Landbauforsch.Völkenrode 12(1962) H.4, S.80/82.
- [19] Zimmer, E.: Beiträge zur Grundlagenforschung in der Gärfutterbereitung. Landbauforsch.Völkenrode 13(1963) H.2, S. 105/10.
- [20] Zimmer, E.: Einfluß verschiedener Silierbedingungen auf den Gärverlauf, die Bildung organischer Säuren und die Verluste bei Luzerne. Landbauforsch.Völkenrode 14(1964) H.1, S.23/28.
- [21] Zimmer, E.: Der Einfluß der mechanischen Aufbereitung auf die Silierfähigkeit von Halmfutter. Grundl.Landtechn. 17(1967) Nr. 6, S. 197/202.