

DK 631.243.24

Ursachen und Ausgleich des Unter- bzw. Überdrucks in gasdichten Gärfuttersilos

Von Adolf König und Jürgen Wilcke, Kiel

Gasdichte Behälter, wie sie für die Konservierung von feuchtem Getreide und Grünfutter verwendet werden, müssen mit Druckausgleichssystemen versehen sein, damit im Behälter entstehende Über- und Unterdrücke die zulässigen Werte nicht überschreiten. Bei dem Druckausgleich zwischen dem CO₂-haltigen Gärgas und der Außenluft muß verhindert werden, daß Luftsauerstoff in den Gärraum gelangt. In der vorliegenden Arbeit¹⁾ werden die Ursachen für den Unter- bzw. Überdruck in gasdichten Gärsilos sowie dessen Ausgleich durch verschiedene Systeme untersucht und kritisch durchleuchtet.

Druckdifferenzen zwischen dem Gasdruck im Behälter und dem atmosphärischen Druck entstehen durch Temperaturänderungen des Gärgases, wenn der Behälter Sonnenstrahlen absorbiert oder die Außenluft durch Konvektion Wärme an das Gas abgibt oder aufnimmt. Außerdem ändert sich der Über- bzw. Unterdruck des Gases, wenn der Luftdruck steigt oder fällt. Hohe Drücke bis zu 2 atü können kurz nach der Einlagerung des Gärgutes durch die sich bildenden Gärgase auftreten. Die Behälterwände dürfen aber aus statischen Gründen nur Druckdifferenzen zwischen Innen- und Außendruck von -40 bis +300 mm Wassersäule ausgesetzt werden. Durch verschiedene Druckausgleichssysteme können die Drücke im Gärbehälter begrenzt werden.

¹⁾ Wilcke, Jürgen: Untersuchungen über die Druckausgleichssysteme von gasdichten Gärfutterbehältern. Diss. Univers. Kiel 1966. Daraus dieser Auszug mit Ergänzungen.

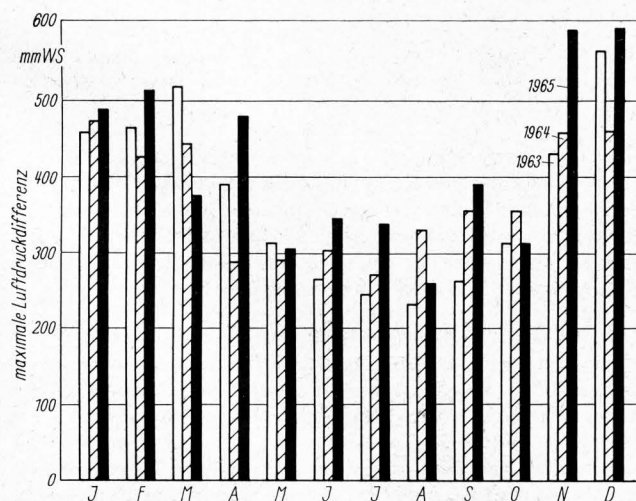


Bild 1. Maximale Luftdruckänderungen während eines Monats in den Jahren 1963 bis 1965.

Prof. Dr.-Ing. Adolf König ist Direktor des Instituts für Landwirtschaftliches Maschinenwesen der Universität Kiel; Dr. agr. Jürgen Wilcke ist Assistent am gleichen Institut.

Ursachen der Über- und Unterdrücke in gasdichten Silos

Einfluß der atmosphärischen Druckschwankungen

Unmittelbaren Einfluß auf den Gasdruck in abgeschlossenen Silos haben die atmosphärischen Druckschwankungen. Mit Mikrobarographen wurden der Luftdruck und der Gasdruck im Behälter gemessen. Aus den Aufzeichnungen des Schreibers geht hervor, daß sich der Wechsel zwischen Hoch- und Tiefdruck in einem Intervall von meistens 3 bis 5 Tagen vollzieht. Bild 1 zeigt für jeden Monat der Jahre 1963 bis 1965 die Differenz zwischen dem größten und kleinsten Luftdruck. Es ist vorteilhaft, daß die kleineren Luftdruckschwankungen in den Sommer fallen, in dem die Drücke im Silo durch die kräftigere Sonnenstrahlung mehr beeinflusst werden als im Winter. Bei einem einmaligen Anstieg ($p_1 \rightarrow p_2$) des Luftdruckes um 350 mm WS würde in einen Behälter mit einem Gasraum von $V_s = 100 \text{ m}^3$ eine Luftmenge von $\Delta V \text{ m}^3$ fließen, wenn die Luft durch eine Öffnung freien Zugang zum Gärraum hätte:

$$\Delta V = V_s \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right) = 100 \left(1 - \frac{10155}{10505} \right) = 3,3 \text{ m}^3 \quad (1).$$

Bei der Auslegung eines Ausgleichsystems sollte diese atmosphärisch bedingte Volumendifferenz von 3,3 m³ in einem solchen 100-m³-Silo berücksichtigt werden. Die Luftdruckschwankungen lassen sich zum Teil gegen die Sperrwirkung der Ventile aufrechnen.

Unter Berücksichtigung der signifikanten Druckänderungen von mehr als 0,5 Torr würden in einen Gasraum von 100 m³ im Jahr etwa 115 m³ Luft ein- und die gleichen Mengen Gas ausströmen.

Einfluß der Gärgase und der Futterentnahme

Einfluß auf die Gasmenge haben die Gärgase, die sich nach dem Einlagern bilden, sowie die Volumenvergrößerung des Gasraumes bei Futterentnahme. Nach der Einlagerung von Futter in einem gasdichten Silo wird der eingebrachte Sauerstoff in Kürze veratmet. Während des Gärprozesses entsteht CO₂-Gas, das in einem fest verschlossenen Behälter einen starken Überdruck von mehreren Atmosphären erzeugen kann. Das Gärgas kann durch das Überdruckventil entweichen. Dieser Vorgang hat keinen Einfluß auf die Auslegung der Druckausgleichssysteme. Anders ist es bei der Futterentnahme, wodurch ein Freiraum entsteht, der zu einem Unterdruck führen kann. Der Druckausgleich erfolgt aber augenblicklich durch Einströmen von Frischluft in die Auswurföffnung des Entnahmegesätes.

Einfluß der Temperaturschwankungen des Gärgases

Da der Quotient aus Gasvolumen und -temperatur bei gleichem Druck konstant ist, lassen sich aus der Temperaturentwicklung im Silo die Volumenänderungen des Gärgases berechnen.

Die Messung der Außentemperatur wurde von Trommelschreibern vorgenommen. Für die Aufzeichnung der Gasraum- und Gärstocktemperatur wurden jeweils 20 Thermolemente in einen Gärbehälter eingebaut. Die von der Temperatur abhängigen Thermospannungen wurden von einem Sechs-Farben-Kompensator registriert; es wurden immer verschiedene Kombinationen der Meßstellen durchgeführt, um ein Bild von den Isothermen zu bekommen. **Bild 2 und 3** zeigen Linien gleicher Temperatur in einem halb mit Gerste gefüllten Harvestore-Behälter, wie sie an einem heißen Augusttage und in einer darauf folgenden Nacht entstanden. Die Isothermen lassen auch die Luftströmungen im Gasraum erkennen: an der sonnenbeschienenen Wand steigt die erwärmte Luft auf, während sie sich an der gegenüberliegenden Schattenseite abkühlt und absinkt. Die Luftgeschwindigkeiten sind allerdings kleiner als 0,4 m/s. Sie ließen sich nicht mit einem Flügelradanemometer messen, das erst Gasströmungen ab 0,4 m/s aufzeigte.

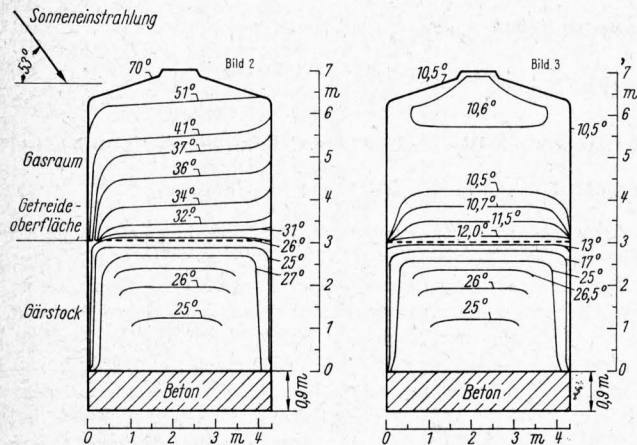


Bild 2 und 3. Isothermen in einem zur Hälfte mit Gerste gefüllten Harvestore-Behälter (Typ 1422) bei Sonnenbestrahlung (Bild 2) und in der darauf folgenden Nacht (Bild 3).

Wärmeübergang an der Silowandung

Zwischen der Temperatur des Silogases und der Außenluft bestehen Wechselwirkungen, die die Temperaturen auszugleichen suchen. Bei der Wärmeabgabe von einem Gas an eine feste Wand (Silowand) und umgekehrt, kann eine Gasbewegung auf zweierlei Art ausgelöst werden. Erwärmt sich das Gas an der wärmeren Wand, so dehnt es sich aus, d. h., es wird spezifisch leichter, und es entsteht eine freie Aufwärtsströmung. Umgekehrt stellt sich an der kühleren Silowand eine freie Abwärtsströmung ein, wenn sich warme Gase daran abkühlen.

Anders liegen die Verhältnisse außerhalb des Silos, wo die Außenluft meist einer aufgezungenen Strömung (Wind) unterliegt und es durch laufende Lufterneuerung an der Silowandung zu einem intensiven Wärmeaustausch kommt. Dadurch ist die Wärmeübergangszahl α außerhalb des Silos viel größer als auf der Innenseite. **Bild 4** zeigt den Temperaturverlauf beim Wärmeaustausch zwischen Silogas und Luft. Der Wärmedurchgang durch die Silowandung ist infolge geringer Wandstärke und hoher Leitfähigkeit kaum behindert. Die Wärmeübergangszahl α [kcal/m² h grd] gibt die Zahl der Wärmeeinheiten an, die in einer Stunde durch 1 m² der Trennfläche zwischen einem festen Körper einerseits und einem Gas andererseits übergehen, wenn der Temperaturunterschied zwischen beiden Medien 1°C beträgt.

Die stärkste Abkühlung des Gases in einem ungefüllten Harvestore vom Typ 2050 erfolgte bei einer durchschnittlichen

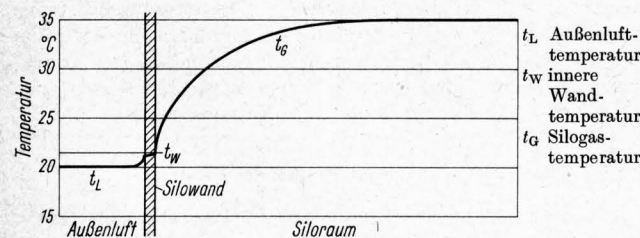


Bild 4. Wärmeübergang an einer Silowand (Prinzipiskizze).

Gasraumtemperatur von 36°C und einer Außenlufttemperatur von 20°C. Die Abkühlung des Gärgases betrug, wie sich aus der Auswertung der Meßstreifen des Sechs-Farben-Schreibers ergab, 0,7°C/min.

Die Temperaturmessungen am Körner-Harvestore haben weiter gezeigt, daß die Durchschnittstemperatur in dem leeren Behälter in einer halben Stunde um 14°C ansteigen kann, d. h., daß bei diesem Silo 4,3 m³ Gas durch das Druckausgleichsystem in 30 Minuten kompensiert werden müssen. Wenn schon vorher im Behälter Überdruck herrschte und die Atemsäcke leer gewesen wären, müßte der Überdruck allein durch Gasausfluß beim Ventil beseitigt werden. Deshalb sollte der Querschnitt des Zwei-Wege-Ventils aus Sicherheitsgründen so bemessen sein, daß stündlich 10 m³ Gas aus- bzw. in denselben hineinströmen können, ohne daß der Luftwiderstand im Ventil den Über- bzw. Unterdruck über die vorgesehene Grenze ansteigen läßt.

Erwärmung der Gärgase durch Sonnenstrahlung

Ein Teil der Sonnenwärme wird direkt durch Strahlung auf die Silowand übertragen. Bei der Strahlung handelt es sich um eine Wellenerscheinung elektromagnetischer Natur; sie ist also nicht an Stoff gebunden. Deshalb steigt die Temperatur des Gärgases im Metallsilo an dunstfreien Sonnentagen beträchtlich über die Außenluft an.

Temperaturverlauf in einem leeren Metallbehälter

Bild 5 zeigt den Temperaturverlauf im Gasraum eines leeren Körner-Harvestore (7 m hoch) an einem wolkenfreien Augusttag zwischen 6 und 10 Uhr. Die Thermolemente waren in verschiedenen Höhen in der senkrechten Achse des Behälters aufgehängt.

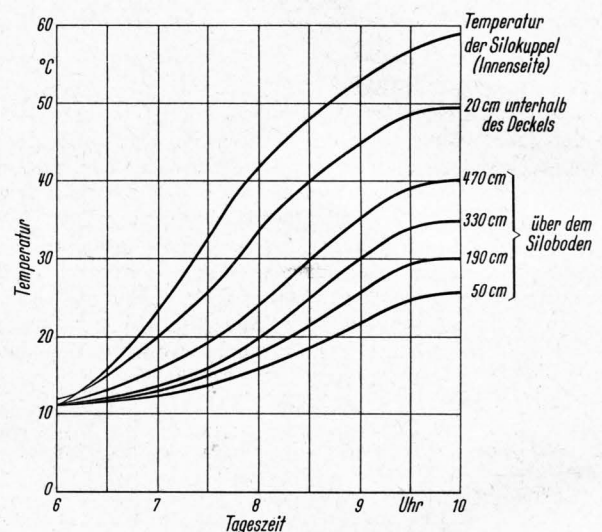


Bild 5. Temperaturverlauf des Gärgases in einem leeren Harvestore-Silo (88 m³) an einem wolkenfreien Augusttag während der Erwärmungsphase.

Nach mehr als vierstündiger Sonneneinstrahlung stieg die Temperatur in den einzelnen Höhen nur noch minimal an. Eine vor die Sonne tretende Wolke verursachte in allen Höhen des Gasraumes einen Temperaturrückgang, jedoch erfolgt der Umschlag in der unteren Zone (etwa 70 cm über dem Siloboden) um 3 bis 4 Minuten später als in der warmen Zone des Silodomes.

Temperaturverlauf in Abhängigkeit vom Füllungsgrad des Silos

Für vergleichende Messungen der Gastemperatur in leeren und gefüllten Behältern wurden zwei gleiche, nebeneinander stehende Grünfuttersilos (Harvestore 405 m³) ausgewählt; der eine wurde während der Messungen in Etappen gefüllt, der andere blieb leer. Die Temperaturmessungen im leeren Behälter dienten als relatives Maß für die Sonneneinstrahlungsintensität, während die Abweichung der durchschnittlichen Gasraumtemperatur des gefüllten Silos von dem leeren die Steigung der Kurven in **Bild 6** bestimmte. Die Erhöhung der durchschnittlichen Gasraumtemperatur bei zunehmendem Füllungsgrad ist dadurch erklärlich, daß gleichzeitig das Verhältnis von Oberfläche zu Gasraum größer wird.

Bedeutung der Siloform auf die Sonneneinstrahlung

Während die Außenluft die gesamte Wandfläche eines Silos, also gleichermaßen die Sonnen- und die Schattenseite, erwärmt oder abkühlt, wirken die Sonnenstrahlen nur auf die der Sonne zugewandte Siloseite ein. Zur Berechnung der Sonneneinstrahlung auf einen Großbehälter muß seine Projektionsfläche für die verschiedenen Sonnenhöhen ermittelt werden; das Produkt von Projektionsfläche und Strahlungsintensität (kcal/cm²) ergibt die auf die Silowand eingestrahelte Energie.

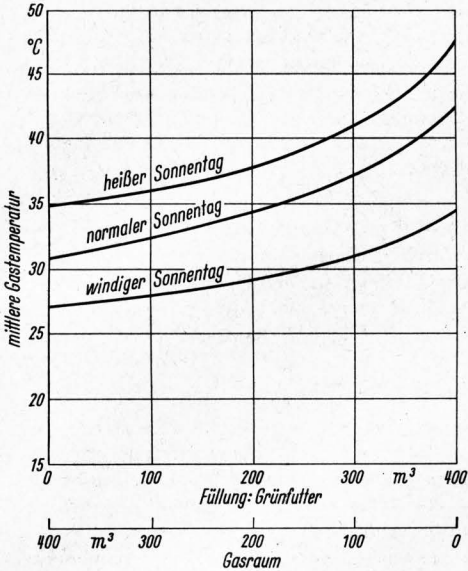


Bild 6. Mittlere Temperatur im Gasraum bei Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit vom Füllungsgrad eines Grünfuttersilos (Harvestore 405 m³).

Für die Gegenüberstellung der Erwärmungseigenschaften zweier Gärfutterbehälter von unterschiedlicher Form werden die bereits erwähnten Harvestore-Silos vom Typ 2050 (405 m³ Inhalt) und vom Typ 1422 (88 m³ Inhalt) herangezogen. Sowohl die Strahlungsintensität als auch die Projektionsfläche ändern sich mit der Sonnenhöhe. **Bild 7** zeigt, daß das Maximum der Projektionsfläche nicht mit dem der Sonneneinstrahlung zusammenfällt. Das liegt daran, daß mit höherem Sonnenstand die Strahlungsintensität zunimmt. Die von der Sonne auf die Wandfläche eingestrahelte Wärmemenge bezogen auf den Innenraum beträgt 2,407 kcal/min und m³ Inhalt beim großen Harvestore vom Typ 2050, während sie beim kleinen 3,807 kcal/min und m³ ergibt. Beim ungefüllten Harvestore 2050 betrug die maximale Erhöhung der Durchschnittstemperatur bei kräftiger Sonnenstrahlung und vorheriger Beschattung fast 1°C/min. Zur Erwärmung von 1 m³ Luft um 1°C sind ca 0,31 kcal erforderlich; das sind nur 13% der eingestrahelten Energie. Die verhält-

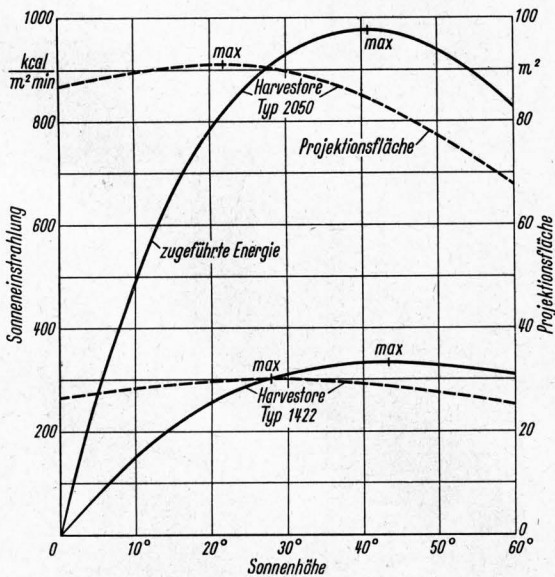


Bild 7. Projektionsfläche und Sonneneinstrahlung bei zwei verschiedenen großen Behältern (Harvestore Typ 1422, 88 m³ und Typ 2050, 405 m³).

nismäßig geringe Erwärmung der Behälterluft hat verschiedene Ursachen: Ein Teil der Sonnenstrahlen wird von der glatten, blauen Oberfläche der Wände reflektiert. Von der Silowand wird ein beträchtlicher Teil der absorbierten Wärmemenge an die relativ kühle Außenluft abgeführt. Wenn auch die Wärmeleitung durch die Silowand nur kleine Wärmeverluste bringt, so vermindert die niedrige Wärmeübergangszahl den Wärmeaustausch zwischen Silowand und -luft wesentlich.

Obwohl der leere Harvestore mit 88 m³ Inhalt eine größere Sonnenstrahlung als der leere Grünfutter-Harvestore mit 405 m³ Inhalt erfuhr, stiegen die Temperaturen im Gasraum nur wenig schneller und stärker an.

Bedeutung der Behälterfarbe

Für die Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Anstrichen auf die Gastemperatur in Metallbehältern wurden Kleinsilos (40 l) hergestellt. Die kontinuierlichen Temperaturmessungen waren durch den Einbau mehrerer Thermoelemente möglich. Die Behälter standen auf einem Wagen. Zuerst wurden sie in den Schatten gefahren und nahmen die Lufttemperatur an. Anschließend wurden sie den Sonnenstrahlen ausgesetzt. Als nach etwa 40 min kein Temperaturanstieg mehr zu verzeichnen war, kamen die Behälter wieder in den Schatten und kühlten ab. In **Bild 8** ist die Temperatur der Silowand in Abhängigkeit von der Zeit bei verschiedenen Anstrichen veranschaulicht; die Kleinsilos waren so gestellt, daß die Wände mit den Thermoelementen senkrecht zur Sonne gerichtet waren.

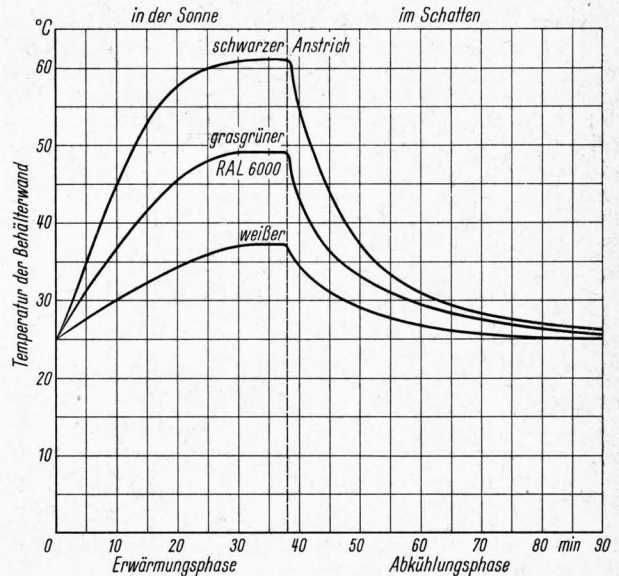


Bild 8. Einfluß des Farbanstriches auf die Temperaturen der Behälterwand.

Bei einem weiteren Versuch standen die Kleinsilos unbeschattet und wieder senkrecht. Die Temperaturen an den Wandflächen und in der Raummitte der verschiedenen Kleinbehälter lassen sich aus **Tafel 1** entnehmen.

Wenn man die Ergebnisse aus den Kleinsilos für die Verhältnisse in großen Gärfutterbehältern umrechnet, so würde die maximale mittlere Raumtemperatur beim weißen Behälter um 8°C niedriger als bei einem blauen liegen, d. h., der Atemsack kann bei einem weißen Silo 10% kleiner sein als bei einem blauen.

Tafel 1. Temperaturen in den Kleinbehältern.

Farbe des Anstrichs	Außen-temperatur	Temperatur		Temperatur Behältermitte	
	°C	Silowand Sonnen-seite °C	Silowand Schatten-seite °C		Deckel °C
weiß	25	34	29	35	31
grasgrün (RAL 6000)	25	45	35	44	38
schwarz	25	55	41	55	44
Alu-Kleinsilo	25	46	36	47	39
Klein-Harvestore	25	52	40	53	43

Druckausgleich bei gasdichten Gärfuttersilos

Druckausgleich bei konstantem Volumen des Gärraumes

Der Raum, den Gärstock und Gärgas einnehmen, wird bei volumkonstantem Absperrern durch Über- und Unterdrücke nicht verändert. Es sind lediglich im Silodom Unter- und Überdruckventile eingebaut, die in einem Druckdifferenzbereich von -40 bis $+100$ mm Wassersäule schließen, **Bild 9**. Übersteigt der Unterdruck den zulässigen Wert, dringt Luft von außen in den Behälter ein; bei einem Überdruck von mehr als $+100$ mm WS kann Gärgas entweichen.

Im Jahre 1965 wurde in England zur Verhinderung des Eintretens von Luftsauerstoff über das Unterdruckventil versuchsweise an die Eintrittsöffnung des Ventils eine Gasleitung angeschlossen, die mit CO_2 -Gasflaschen in Verbindung stand, **Bild 10**. Bei einem Unterdruck im Behälter von mehr als -40 mm WS wird ein Ventil betätigt, das CO_2 -Gas aus den Flaschen in den Silo einströmen läßt. Dadurch kann der Unterdruck im Behälter den Wert von -40 mm WS nicht überschreiten und es braucht zum Druckausgleich kein Luftsauerstoff einzutreten. Bei einem verhältnismäßig leeren Futtersilo kann an heißen Tagen ein beträchtlicher Gasverbrauch eintreten, der die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens in Frage stellt.

Druckausgleich durch Volumenänderung des Gärraumes

Druck, Volumen und Temperatur stehen nach der Zustandsgleichung für ideale Gase in linearer Beziehung zueinander:

$$p v = R T,$$

wobei p den Gasdruck im Behälter, v das spezifische (auf die Masse bezogene) Volumen des Gases, R die Gaskonstante und T die absolute Temperatur des Gases bedeuten. Man kann also bei Luftdruck- oder Temperaturschwankungen des Gärgases den Druck im Behälter dem Außendruck anpassen, wenn man das Volumen des Gärgases verändert.



Bild 9 bis 12. Verschiedene Druckausgleichssysteme

- Bild 9: Druckausgleich über Unter- bzw. Überdruckventil im Behälterdom.
 Bild 10: Gasaustausch über Überdruckventil und Unterdruckventil mit CO_2 -Gasanschluß.
 Bild 11: Druckausgleich durch Veränderung des Gärgasvolumens mittels Atemsack (und zusätzlichem Unter- bzw. Überdruckventil).
 Bild 12: Druckausgleich durch hintereinandergeschaltete Überlaufzellen.

Eine Möglichkeit eines solchen Druckausgleiches ist der sogenannte Atemsack. Er ist ein frei unter der Silokuppel aufgehängter Plastiksack, der mit der Außenluft in Verbindung steht, **Bild 11**. Entsteht im Behälter ein Überdruck, so wird die Luft, die sich im Atemsack befindet, hinausgepreßt. Bei Unterdruck strömt die Luft in den Atemsack, der sich bei ausreichender Größe so lange innerhalb des Gasraumes ausdehnt, bis dort der gleiche Druck wie außerhalb des Silos herrscht. Atemsäcke in Verbindung mit Sicherheitsventilen sind in Deutschland am stärksten verbreitet. Ventile sind notwendig, da bei geringem Füllungsgrad des Silos, d. h. bei großem Gasraum, das Volumen der Atemsäcke zuweilen nicht ausreicht, so daß dann über die Ventile zusätzlich ein Gasaustausch mit der Luft erfolgen muß.

Ein weiterer Druckausgleich durch Volumenänderung des Gasraumes beruht auf dem Unterschied der Dichte von CO_2 -Gas ($1,98 \text{ kg/m}^3$) und Luft ($1,29 \text{ kg/m}^3$). Dabei wird, wie **Bild 12** zeigt, das CO_2 -haltige Gärgas im Silodom über ein Leitungsrohr und eine Reihe hintereinandergeschalteter Zellen mit der Außenluft verbunden. Bei Überdruck im Behälter werden die Zellen nacheinander von unten her mit dem schwereren CO_2 -haltigen Gärgas gefüllt, wobei die darüber befindliche Luft durch den Überlauf hinausgedrängt wird. Bei Unterdruck im Behälter drückt die Außenluft das Gas aus den Zellen in den Behälter zurück. Das Gesamtvolumen der Zellen muß etwas größer als die maximale Ausdehnung des Gärgases im Behälter und in den Zellen sein. Vorteilhaft an diesem System ist das druckfreie Arbeiten, so daß im Behälter kaum nennenswerte Über- oder Unterdrücke entstehen; dadurch verlieren auch eventuelle Lecks im Behälter an Bedeutung.

An der Trennschicht zwischen Luft und Gärgas kommt es zu Vermischungen. Damit in Zeiten, in denen fast keine Druckschwankungen (wie z. B. im Winter oder bei vollen Behältern) auftreten, auch durch Diffusion kein Luftsauerstoff in die Behälter gelangt, müßte man auf den letzten Behälter statt des Überlaufrohres ein leicht ansprechendes Über- und Unterdruckventil setzen.

Die Gärbehälter und ihre Gasdichtigkeit

Die sogenannten gasdichten Gärfutterbehälter werden meistens aus Stahl, Aluminium oder Kunststoff hergestellt. Die einzelnen Wandelemente werden entweder verschraubt, verschraubt-geklebt oder verschweißt. Bei den verschraubten Behältern erfolgt die Abdichtung an den Verbindungsstellen durch eine Dichtungsmasse oder einen Zwei-Komponenten-Kleber. Ein zusätzlicher Kleber ist bei Aluminiumsilos erforderlich, da die Festigkeit der verwendeten Bleche (4 mm) nicht ausreicht, wenn in 60 mm Abstand 10 mm starke Schrauben die überlappenden Bleche zusammenhalten. Durch das zusätzliche Kleben wird die doppelte Zugfestigkeit erreicht. Nur wenige Firmen stellen Behälter aus verschweißten Wandelementen her. Das Verschweißen von Aluminiumplatten unter Schutzgas ist sehr langwierig und witterungsabhängig. Bei Stahlsilos müssen die Schweißnähte anschließend zusätzlich noch gegen Korrosion geschützt werden; bei verschraubten Wandelementen können durch „Permaglas“ oder Kunststoff geschützte Stahlplatten im Werk fertiggestellt und ohne Nachbehandlung am Aufstellungs-ort montiert werden.

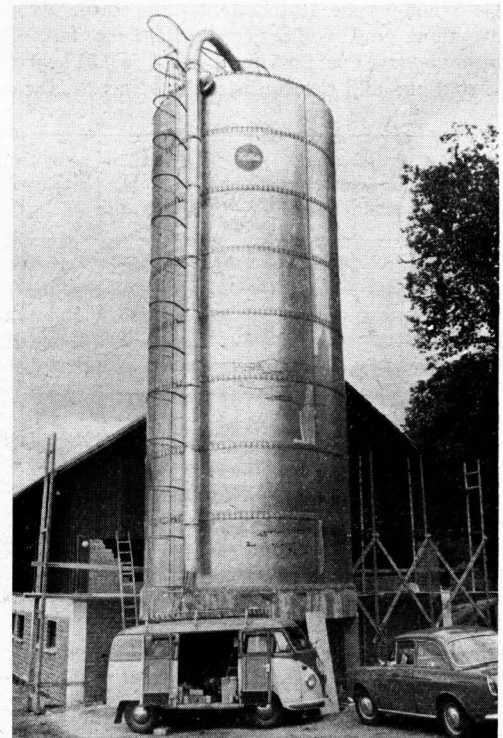


Bild 13. Gasdichter Futterturm aus Aluminium (Bauart Fella).

Die Größe der Behälter liegt in den meisten Fällen zwischen 100 und 400 m³, die Durchmesser betragen 5 oder 6 m. **Bild 13** zeigt einen gasdichten Aluminiumbehälter mit dem davor stehenden Meßwagen.

Stahl- und auch Aluminiumbehälter von verschiedener Größe wurden auf ihre Gasdichtigkeit hin untersucht. Dazu wurde das Behältergas jeweils auf einem Druck von 90 mm WS durch zeitweiliges Einblasen von Luft gehalten, wobei eine Gasuhr die stündlich eingeblasene Luftmenge als Maß für die Undichtigkeit anzeigte, **Tafel 2**.

Wenngleich die Messungen bei trübem Wetter durchgeführt wurden und die Temperatur in der Silokuppel mit einem geeichten Widerstandsthermometer überwacht wurde, können trotzdem kleine Temperaturabweichungen die Genauigkeiten der Messungen beeinflusst haben. Die eingeblasene Luft, die vom Handgebläse um 2°C erwärmt wurde, brachte keine nennenswerte Temperaturerhöhung der Siloluft. Der unerwünschte Gasaustausch durch Lecks zwischen Gärraum und Außenluft ist um so größer, je größer das Druckgefälle ist.

Tafel 2. Gasverlust verschiedener Behälter.

Silotyp	Rauminhalt m ³	Gasverlust bei 90 mm WS l/h	spez. Gasverlust bei 90 mm WS (je m ³ Silovolumen) l/h m ³
Stahlsilo	88	580	5,1
Stahlsilo	405	2200	5,4
Alu-Silo	240	1450	6,0

Der Druckausgleich durch Ventile

Die untersuchten Behälter waren sowohl mit einem Atemsack als auch mit einem Unter- und Überdruckventil ausgerüstet. Die Ventile sind im Behälterdom eingebaut, damit der durch das Unterdruckventil eintretende Sauerstoff nicht unmittelbar mit dem Gärstock in Berührung kommt. Die Ventile müssen so bemessen sein, daß auch bei starken Temperaturschwankungen des Gärgases der Gasdurchfluß ausreicht, die Über- und Unterdrücke zu beseitigen. Da bei vielen Behältern schon ein Unterdruck von - 100 mm WS ausreicht, um ein Einbeulen hervorzurufen, müssen die Ventile schon bei Drücken wenig ober- bzw. unterhalb der Sperrgrenzen den vollen Gasdurchfluß freigeben können. Dieser Forderung entsprechen diejenigen Ventile, bei denen genügend große Öffnungen durch aufliegende Platten verschlossen sind, **Bild 14**. Das Gewicht der Platten und die Größe der Öffnung entsprechen dem zulässigen Druck. Bei Überdruck hebt sich die obere Platte (5), bei Unterdruck die untere Platte (6). Gegen das Gehäuse (2, 3) sind die Sperrplatten durch mit Alkohol gefüllte flexible Dichtungen (4) abgedichtet.

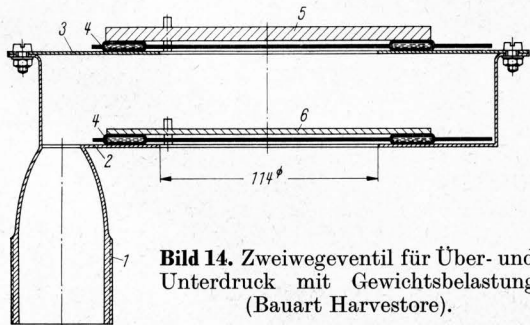


Bild 14. Zweiwegeventil für Über- und Unterdruck mit Gewichtsbelastung (Bauart Harvestore).

Eine weitere Bauart ist durch Verwendung einer Feder gegen den Gasdruck gekennzeichnet, **Bild 15**. Die Sperrwirkung eines solchen Ventils muß durch Verstellen der Federkraft auf einen bestimmten Grenzdruck des Gärgases einreguliert werden. Bei dem vorher beschriebenen Ventiltyp ist dies nicht erforderlich, da das Gewicht der Abdichtungsplatte und die Ventilöffnung und damit die Sperrwirkung vorausberechnet werden können.

Ein gewisser Nachteil bei einem Ventil mit Federkraft gegenüber einem Ventil mit Gewichtsbelastung besteht auch darin, daß sich mit zunehmender Öffnung die Federkraft erhöht. Bevor sich das Ventil ganz öffnet, muß der Überdruck beträchtlich

über der Sperrgrenze liegen. Bei dem Ventil mit Gewichtsbelastung steigt der Öffnungsdruck auch bei großem Gasdurchgang kaum über die Sperrgrenze. Die Unterdruckventile waren bei allen untersuchten Behältern auf - 40 mm WS eingestellt, die Überdruckventile meistens auf + 100 mm WS, bei einigen Fabrikaten sogar auf 300 mm WS.

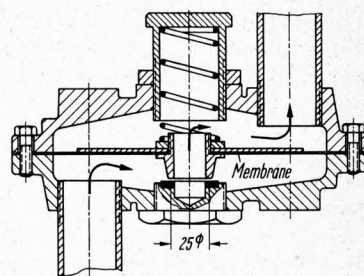


Bild 15. Überdruckventil mit Federbelastung.

Der Druckausgleich durch Atemsäcke

Die Atemsäcke wurden auf ihre Funktionsfähigkeit und die erforderliche Größe untersucht. Mit einem Handgebläse wurde ein Atemsack über eine Gasuhr mit Luft gefüllt; gleichzeitig wurde der statische Druck gemessen. Als der Druck 57 mm WS erreichte, der einem Unterdruck von - 57 mm WS entspricht, wurde die Luft aus dem Sack entlassen und der Rest mit dem Gebläse abgesogen. Die Beziehung zwischen Luftmenge und statischem Druck im Atemsack veranschaulicht **Bild 16**. Die beiden Kurven zeigen eine Hysterese, die durch die Verformungsarbeit des Atemsackes bedingt ist. Um den Atemsack bis zu 70% seiner maximalen Kapazität zu füllen, sind nur - 5 mm WS Unterdruck im Gärraum erforderlich. Die Entleerung des Atemsackes verlangte fast keinen Überdruck im Behälter, wenn der Vorgang sehr langsam vor sich ging. Bei schneller Temperaturerniedrigung kann ein Unterdruck von - 5 mm WS im Behälter entstehen, ohne daß sich Luft im Atemsack befindet.

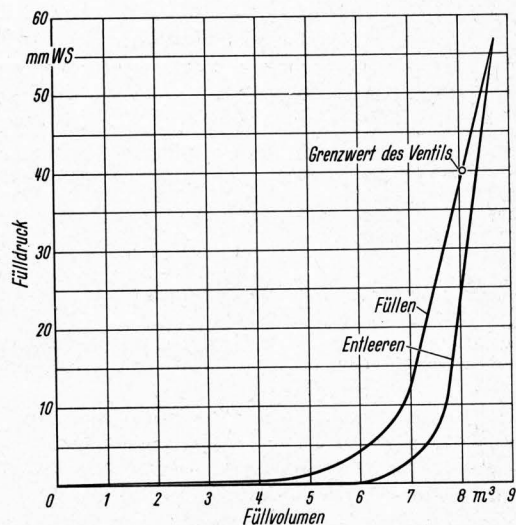


Bild 16. Volumenänderung eines Atemsackes in Abhängigkeit vom statischen Unterdruck im Silobehälter.

Ermittlung der Atemsackkapazität

Die Ermittlung der Atemsackkapazität erfolgte auf drei verschiedenen Wegen:

1. Bei einem Metallsilo wurden im Juli alle Öffnungen, auch die des Atemsackes und der Ventile, möglichst luftdicht verschlossen; der einzige Luftaustausch war über zwei Gasuhren möglich, die die ein- und die austretende Luft feststellten. Vor und nach einer Erwärmungs- bzw. Abkühlungsphase wurden die Uhren abgelesen. Für die Ermittlung der erforderlichen Atemsackkapazität eignet sich dieses Meßverfahren nur bedingt, da die Sonneneinstrahlungsintensität, die Lufttemperatur, der Luftdruck und die Windgeschwindigkeit sich häufig an einem Tag ändern, so daß allein die durch die Gasuhr eintretenden Luftmengen bis zu 14 m³ je 100 m³ Gasraum pro Tag betragen können. Die Auslegung des Atemsackes richtet sich hingegen nur nach der einmaligen maximalen Volumenänderung des Gärgases.

2. Bei dem zweiten Verfahren wurde ein 88 m³ großer leerer Körner-Harvestore mit Atemsack (8,7 m³) und Ventilen (Sperrgrenzen - 40 und + 100 mm WS) so hergerichtet, daß die über den Atemsack und über die Ventile ausgetauschten Luftmengen von Gasuhren gemessen werden konnten. Diese Messungen wurden über ein ganzes Jahr durchgeführt, **Tafel 3**.

Im August wurde der Behälter bis zur Hälfte mit Gerste (Feuchtegehalt $U = 21\%$) gefüllt. Die bei der täglichen Entnahme mit dem Futter ausfließenden Gasmengen und sonstige Leckverluste konnten bei den Messungen nicht mitberücksichtigt werden. Der Gasaustausch durch die Entnahmeöffnungen des Futters ist wesentlich und genügt u. U., um einen im Behälter herrschenden Über- oder Unterdruck durch ausströmendes Gärgas oder einströmende Luft während der Dauer der Entnahme auszugleichen. Tafel 3 zeigt, daß der Atemsack, der etwa 10% des Siloraumes einnehmen kann, fast ausreicht; es sind nur unbedeutende Luftmengen über das Unterdruckventil in den Behälter gelangt. Mikrobarographen zeigen aber, daß der Druck im Behälter häufig bis an die Sperrgrenze des Ventils heranrückte; wieviel Gas dadurch über die immer vorhandenen Lecks ausgetauscht wurde, ist nur ungenau zu erfassen.

3. Eine rechnerische Ermittlung der erforderlichen Atemsackkapazität ist über die maximalen Schwankungen der Gärgastemperatur und des Luftdruckes möglich. Dabei ist es unwesentlich, ob sich die Maximalwerte während eines Tages oder mehrerer Tage ergeben. Im Sommer können die Luftdruckschwankungen

Tafel 3. Arbeit des Atemsackes und der Ventile eines Körner-Harvestore (Typ 1422).

Gasinhalt des Behälters (leer) $V_S = 88 \text{ m}^3$; Atemsack $V_{A \max} = 8,7 \text{ m}^3$

Zeitraum 1965	Gasraum m ³	täglich in den Atemsack ein- und ausströmende Luftmenge				monatlich über die Ventile ein- und ausströmende „Gasmenge“	
		im Mittel		maximal		ein m ³ /Monat	aus m ³ /Monat
		ein m ³ /Tag	aus m ³ /Tag	ein m ³ /Tag	aus m ³ /Tag		
Januar	64	0,750	0,747	1,553	1,671	—	—
Februar	68	0,843	0,834	1,987	1,932	—	—
März	72	3,803	3,888	5,834	5,768	5,563	8,393
April	76	4,063	4,245	9,307	10,067	6,382	9,648
Mai	80	3,320	3,349	9,201	8,755	6,531	13,932
Juni	84	3,543	3,811	9,334	10,213	7,341	14,864
Juli	88	4,062	4,052	7,988	9,944	10,481	12,418
August*)	46	4,150	4,156	6,468	6,606	—	30,795
September	46	3,076	3,110	6,173	7,468	—	14,683
Oktober	47	2,873	3,013	6,033	6,274	1,376	3,894
November	49	1,955	1,984	5,813	5,855	—	0,543
Dezember	50	0,532	0,531	1,465	1,500	—	—

*) Anfang August wurde der Harvestore mit Gerste bis zur Hälfte gefüllt.

kungen 350 mm innerhalb mehrerer Tage betragen. Diese Änderungen müssen von dem Druckausgleichsystem ausgeglichen werden können. Gegen die atmosphärischen Schwankungen kann der Sperrbereich der Ventile, der 140 mm WS beträgt, zum Teil aufgerechnet werden. Die verbleibenden 210 mm WS wirken außerhalb des Sperrbereiches der Ventile und müssen durch Volumenänderung des Gärgases ausgeglichen werden. Die durch die Druckschwankungen bedingte Volumenänderung ist

$$\Delta V = V_S \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right) = 100 \left(1 - \frac{10225}{10435} \right) = 2,0 \text{ m}^3 \quad (2);$$

darin bedeuten ΔV die Volumenänderung des Gases in m³, V_S das Gasvolumen des Silos in m³, p_1 den unteren Luftdruck in mm WS und p_2 den oberen Luftdruck in mm WS. Bei einem Silo müssen auf je 100 m³ Gasraum 2,0 m³ Volumenänderung infolge der atmosphärischen Luftdruckschwankungen ausgeglichen werden.

Die höchsten Werte der mittleren Gastemperatur im Silo können an Sonntagen im Sommer 37,8°C betragen, während die nächtlichen Tiefstwerte häufig bei 9°C liegen. Daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 28,8°C. Für diese Temperaturdifferenz ist für einen 100-m³-Silo die Volumenänderung

$$\Delta V = V_S \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) = 100 \left(1 - \frac{282}{310,8} \right) = 9,3 \text{ m}^3 \quad (3);$$

darin bedeuten T_1 die minimale und T_2 die maximale absolute Temperatur des Gases in °K.

Unterstellt man einen gasdichten Behälter mit einem Gasvolumen von 100 m³, so würden 11,3 m³ Gas über das Überdruckventil ausfließen, wenn kein Atemsack vorhanden wäre. Die Atemsackkapazität braucht aber nur 10,2 m³ je 100 m³ Siloraum zu betragen, da die Wärmeausdehnung der Luft im gefüllten Atemsack unberücksichtigt bleiben kann.

Aus dieser Berechnung geht hervor, daß bei voller Ausnutzung der Sperrwirkung der Ventile das Atemsackvolumen ca. 11% des Gasraumes betragen sollte, **Bild 17**. Es wäre aber empfehlens-

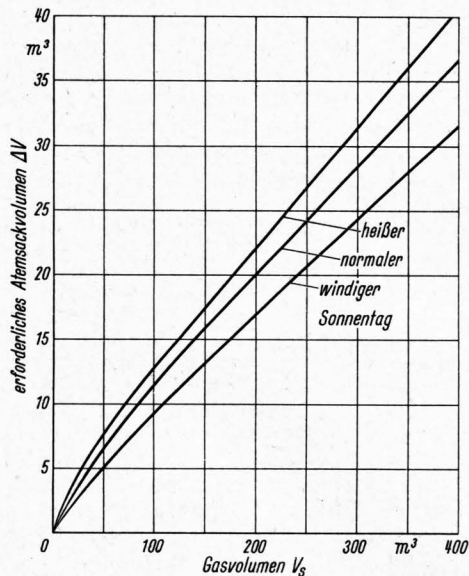


Bild 17. Erforderliches Atemsackvolumen in Abhängigkeit vom Gärgasvolumen.

wert, wegen der Leckverluste die Über- und Unterdrücke möglichst klein zu halten. Bei einem Atemsackvolumen von 18 m³ je 100 m³ Siloraum würde die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenluft nie mehr als ± 5 mm WS betragen. Der Atemsack würde dann aber nur zu $\frac{2}{3}$ seiner Kapazität ausgenutzt werden.

Mischbarkeit von Gasen mit verschiedenen Dichten

Das vorher erwähnte Druckausgleichssystem der „hintereinandergeschalteten Zellen“ beruht auf der Annahme, daß die spezifisch leichtere Luft (Dichte $\rho \approx 1,3 \text{ kg/m}^3$) auf dem Kohlendioxydgas (Dichte $\rho \approx 2 \text{ kg/m}^3$) „schwimmt“ und sich eine wohl ausgebildete Trennschicht zwischen den Gasen erhält.

Mehrere englische Firmen rüsten Gärfuttersilos nur mit im Silodom befindlichen Über- und Unterdruckventilen zum Ausgleich der Druckschwankungen aus, da ihrer Ansicht nach eine über dem Gärstock befindliche CO₂-Gasschicht das Futter vor der spezifisch leichteren Luft schützt. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, wurde in einen leeren Metallsilo CO₂-Gas vom Boden her eingeleitet. Außerdem wurde eine Plastikdecke, **Bild 18**, in der unteren Hälfte des Behälters aufgehängt. Sie sollte zeigen, wie weit man den Gärstock durch eine Plastikplane gegen Luftsauerstoff schützen kann. Der Rand der Plane war als Schlauch ausgebildet, so daß er aufgeblasen werden konnte, um sich recht gut an die Wände anzulegen. Nach dem Einbau zeigte sich, daß nur ein Spalt von 1 cm zwischen Silowand und Plastikdecke blieb.

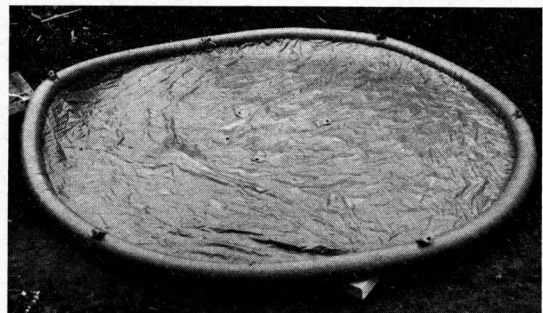


Bild 18. Plastikplane mit angeschweißtem Schlauch zum Aufblasen.

Das eingeleitete CO₂-Gas bildete mit der im Silo befindlichen Luft ein homogenes Gasgemisch, das zu 29% CO₂ enthielt. Es wurde über eine Gasuhr Luft durch die obere Luke in den Behälter langsam eingeblasen. Dann wurden anschließend an das Einblasen alle zwei Stunden Gasproben aus verschiedenen Höhen im Behälter gezogen; die Entnahmestellen sind aus Bild 19 zu ersehen. Die Zusammensetzung der Gase wurde mit einem Orsatgerät analysiert. Kurz nach dem Eintritt von Frischluft war nur bis 1 m unter der Silokuppel die CO₂-Gaskonzentration von 29 Vol.-% auf 1 Vol.-% gesunken, **Tafel 4**.

Schon nach zwei Stunden sank selbst in den unteren Schichten die CO₂-Konzentration um 0,6%, während dort der Sauerstoffgehalt anstieg. Nach weiteren 10 Stunden war die Kohlendioxidkonzentration unter der Kuppel nur noch 2,3 Vol.-% niedriger als im unteren Teil. Sogar unterhalb der Zwischendecke konnte kein höherer Kohlendioxidgehalt mehr festgestellt werden. Es genügte also der kleine Spalt zwischen der Plastikdecke und Silowand, um die CO₂-Gehalte in der Luft ober- und unterhalb der Ebene innerhalb von 24 Stunden auszugleichen.

Die Versuche haben gezeigt, daß es nicht genügt, die Behälter nur mit Ventilen zu versehen, da der bei Unterdruck eintretende Luftsauerstoff schon nach wenigen Stunden an den Gärstock gelangen kann.

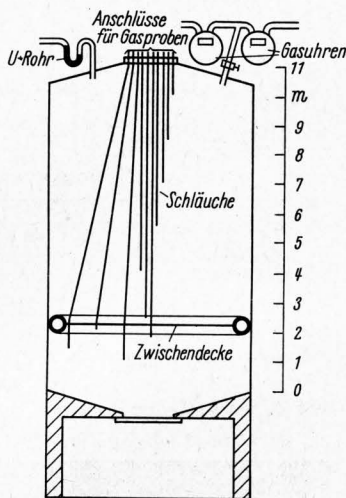


Bild 19. Versuchsanordnung zur Entnahme der Gasproben.

Zusammenfassung

Druckausgleichssysteme von gasdichten Gärfuttersilos haben die Aufgabe, Über- und Unterdrücke des Gärgases zu kompensieren. Die Differenz zwischen Außen- und Innendruck wird bei luftdichten Behältern von den atmosphärischen Druckschwankungen, den Änderungen der Gastemperatur, der Druckerhöhung

Tafel 4. Vermischung von CO₂-haltigem Gas mit vom Deckel aus zugeführter Luft in einem Großbehälter (5 m × 10,5 m).

Stunden nach Luft-eintritt	CO ₂ -Gehalt in Vol.-% Silohöhe							
	1,0 m %	2,0 m %	2,5 m %	4,0 m %	5,5 m %	7,0 m %	8,5 m %	10,0 m %
0	29,0	29,0	29,0	29,0	28,8	27,0	3,0	1,0
2	28,4	28,4	28,2	28,0	27,2	25,0	7,0	5,6
12	23,3	23,3	23,3	23,1	22,7	22,3	21,7	21,0

bei Gärgasentwicklung und der Druckänderung und Gasraumvergrößerung durch Futterentnahme beeinflusst.

Die Gasdichtigkeit ist bei den Gärfutterbehältern ein großes Problem; selbst bei sorgfältig montierten Behältern tritt bei Überdruck Gas durch Lecks aus. Um dem Gasaustausch durch Lecks zu begegnen, müssen durch Druckausgleichssysteme die Über- und Unterdrücke im Silo so klein gehalten werden, daß der Gasaustausch durch Lecks unbedeutend wird. Dadurch wird auch ein Gasaustausch während der Gärgutentnahme weitgehend verhindert.

Als wirksamstes und dabei preisgünstigstes Druckausgleichssystem hat sich die Kombination von Ventilen und Atemsäcken eingeführt. Gewichtsbelastete Ventile halten die Sperrgrenzen besser ein als federbelastete. Der Durchlaß der Ventile sollte für je 100 m³ Siloraum so bemessen sein, daß stündlich 10 m³ Gas bei einem statischen Druck von 40 mm WS durchfließen können. Atemsäcke sollten mindestens 10% des Gasraumes einnehmen können.

Bei der alleinigen Verwendung von Ventilen für den Druckausgleich gelangen große Luftmengen in den Gärbehälter, besonders dann, wenn ein größerer Gasraum (> 10%) vorhanden ist. Selbst wenn sich über dem Gärstock ein mit CO₂ angereichertes Gas befindet, gelangt der leichtere Luftsauerstoff schon wenige Stunden nach seinem Eintritt an das Gärgut.

Versuche über den Einfluß der Anstrichfarbe der Behälter haben gezeigt, daß bei starker Sonneneinstrahlung die Gastemperaturen in einem weißen Behälter wesentlich niedriger liegen als beispielsweise in einem blauen. Bei einem weißen Behälter ist nur ein Atemsackvolumen von 8% des jeweiligen Gasraumes erforderlich.

DK 621.867.8:644.8.047

Vergleichende Untersuchungen an Radial- und Axialgebläsen für die Heubelüftungstrocknung

Von **Theophil Finkbeiner**, Stuttgart-Hohenheim

Neuerdings werden wieder häufiger Radialgebläse anstelle von Axialgebläsen für die Unterdachtrocknung von Heu vorgeschlagen. Infolge der größeren Abmessungen ist die räumliche Unterbringung im Vergleich zu den für Wandeinbau besser geeigneten Axialgebläsen nicht immer möglich. Es wird über Luftdruck- und Schallmessungen an einem Radialgebläse berichtet und das Ergebnis mit dem der üblichen Axialgebläse verglichen.

Bei Heubelüftungsanlagen werden in Europa fast ausschließlich Axialgebläse mit Leitapparat eingesetzt. Dagegen wurden in den USA, als in den 40er Jahren die Heubelüftungstrocknung aufkam, häufig auch Radialgebläse benutzt [1]; im Verlauf der Jahre ging die Entwicklung auch dort verstärkt zum Axialgebläse. In Deutschland wurden bei der Einführung der Heubelüftungstrocknung u. a. auch Versuche mit Radialgebläsen angestellt, zuerst mit Heufördergebläsen [2], später auch mit speziell entwickelten Bauformen [3]. Da sich Heufördergebläse von der Konstruktion her nicht eignen und speziell entwickelte Radialgebläse zur Erzielung guter Wirkungsgrade zu hohen

Baufwand erforderten, wurden diese Versuche wieder eingestellt. Neuerdings kommen wieder einige Firmen mit Radialgebläsen auf den Markt. Der folgende Beitrag soll daher helfen, die heute wieder aktuelle Frage zu klären, welche Lüfterbauart — axial oder radial — für die Heubelüftungstrocknung besser geeignet ist.

Die bisher meist gebräuchlichen Axiallüfter erreichen eine Luftleistung, die bei den überwiegend in Betrieb befindlichen Anlagen bei etwa 6 bis 14 m³/s Förderstrom und 30 bis 50 mm statische Druckdifferenz liegt. Die bei der Einlagerung möglichen Feuchtegehalte *U* betragen bis zu 35 bis 45%. Will man jedoch Welkheu mit Feuchtegehalten über 45% bis etwa 60% unter Dach trocknen, sind — bedingt durch die höheren spezifischen Luftmengen und das größere Stapelraumgewicht — Lüfter erforderlich, die Druckhöhen von etwa 60 bis 80 mm WS erzeugen.

Für diesen Leistungsbereich bietet sich dem Konstrukteur die Möglichkeit, ein Gebläse nach dem Axialprinzip mit großem Nabeverhältnis und Leitapparat zu verwenden, oder aber mit etwa halb so großer spezifischer Drehzahl (wegen des relativ hohen Förderstromes) zum Radialtyp in zweiflutiger Ausführung mit stark rückwärtsgekrümmten oder zum Trommelläufer mit kurzen

Dipl.-Ing. Theophil Finkbeiner ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. G. Segler) der Landwirtschaftlichen Hochschule Stuttgart-Hohenheim.