

Ein Beitrag zur Klärung der Druckverhältnisse in lagernden Haufwerken

Von Alfred Stroppe, Göppingen¹⁾

Eine festigkeitsgerechte Dimensionierung der Lagerbehälter für landwirtschaftliche Haufwerke setzt voraus, daß man die Druckverhältnisse in den Lagergütern kennt. Es werden einige experimentelle Versuchsergebnisse über die Wand- und Bodendrucke, die in körnigen Haufwerken in der Nähe einer einzelnen ebenen Wand bestimmt wurden, diskutiert. Die ermittelten Gesetzmäßigkeiten stellen die Grundlage dar, an denen die Untersuchungsergebnisse komplizierterer Lagerungsfälle orientiert werden können. Auf diese Weise soll allmählich eine umfassende Silotheorie erarbeitet werden, die möglichst für jede Siloform und für jedes Lagergut gültig ist.

Landwirtschaftliche Erntegüter werden in den meisten Fällen, insbesondere wenn es sich um Futterstoffe für die Tierhaltung handelt, bis zu ihrer Weiterverarbeitung oder Verfütterung auf dem bäuerlichen Betrieb zwischengelagert. Alle diese landwirtschaftlichen Lagergüter stellen keine kompakten Stoffe dar wie Stahl und Holz oder Medien wie Wasser und Gas, sondern sind Materien, die man in der Verfahrenstechnik pauschal mit Haufwerk bezeichnet. Dabei ist unter einem Haufwerk ein Stoff zu verstehen, der aus einer großen Anzahl von Einzelmassen besteht, die im Vergleich zur räumlichen Ausdehnung dieses Stoffes sehr klein sind und die untereinander verschiebbar sind. Zur Lagerung dieser Haufwerke sind spezielle Lagerbehälter notwendig.

Bei der festigkeitsgerechten Dimensionierung dieser Lager-silos muß man von praxisnahen Lastannahmen ausgehen, was die Kenntnis der Druckverhältnisse in den lagernden Haufwerken voraussetzt, insbesondere die Kenntnis der Drücke auf die Silowand und auf den Siloboden. Die Vielzahl der Behälterformen und die großen Unterschiede in den technologischen Eigenschaften der gelagerten Stoffe, angefangen beim körnigen und kohäsionslosen Getreide bis zur faserigen und klebrigen Silage, machten es bisher unmöglich, die Grundlagen der Silobelastung auch nur annähernd in vollständiger und einheitlicher Form anzugeben. In vielen Fällen kennt man nicht einmal die Größenordnung und die tendenzmäßigen Abhängigkeiten der Drücke, was in erster Linie für halmartige Güter wie Heu und Silage zutrifft. Für körnige Stoffe wie Getreidekörner und Schrote liegen eine ganze Reihe von Untersuchungsergebnissen vor — es sei hier nur auf die interessanten Arbeiten von Wenzel [1] verwiesen —, aber auch hier ist noch viel Unbekanntes zu erforschen. Ziel aller Untersuchungen auf diesem Gebiet sollte es sein, eine für möglichst jedes Haufwerk geltende umfassende Silotheorie zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, ist jedoch noch eine umfangreiche systematische Forschungsarbeit notwendig.

Lastannahmen nach DIN 1055

Da der Konstrukteur von Siloanlagen nicht warten kann, bis diese Forschungsarbeit in vollem Umfang geleistet worden ist, wurde in den letzten Jahren ein Normblatt [2] geschaffen, in dem entsprechend dem derzeitigen Wissensstand auf diesem Gebiet Angaben über die Lastannahmen gemacht wurden. Bei der Zusammenstellung dieses Normblattes waren sich die Bearbeiter jedoch darüber im klaren, daß durch zahlreiche weitere Experimente die angegebenen Gleichungen und Zahlenwerte kontrolliert werden müssen. Ein kurzer Blick in dieses Norm-

¹⁾ Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Braunschweig am 13. Oktober 1967.

Dr.-Ing. Alfred Stroppe war wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H. J. Matthies) der Technischen Hochschule Braunschweig und ist jetzt in der Landmaschinenfabrik W. Speiser, Göppingen, tätig.

blatt, Bild 1, soll zeigen, daß das Druckverhalten zweier verschiedener landwirtschaftlicher Haufwerke sehr unterschiedlich sein kann und daß noch viel zu tun ist, bis man diese Unterschiede in einer einheitlichen Silotheorie erfassen kann. Links im Bild ist ein Silo schematisch dargestellt, der bis zu einem bestimmten Niveau mit Naßsilage bzw. Getreidekörnern gefüllt ist.

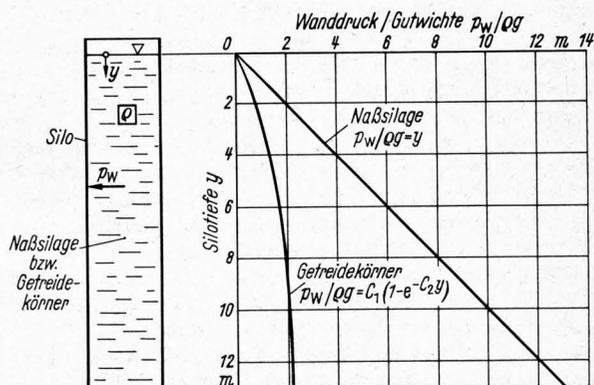


Bild 1. Lastannahmen für den Wanddruck in Lagersilos in Abhängigkeit von der Silotiefe bei zwei verschiedenen landwirtschaftlichen Haufwerken.

Der Druck auf die Silowand wird mit p_w bezeichnet, die laufende Koordinate für die Silotiefe mit y und die Dichte des Lagergutes mit ρ . Im Diagramm auf der rechten Seite ist im wesentlichen der tendenzmäßige Verlauf des Wanddruckes in Abhängigkeit von der Silotiefe dargestellt, einmal für Naßsilage und dann für Getreidekörner. Da die Drücke linear von der Gutwichte ρg abhängen, wurden in dem Diagramm die auf die Wichte bezogenen Wanddrücke $p_w / \rho g$ dargestellt, wodurch man die Druckverläufe besser vergleichen kann. Obwohl diese beiden Kurven nicht unbedingt den exakten Druckverlauf wiedergeben, sondern nur Lastannahmen für die Dimensionierung darstellen, spiegeln sie doch trotzdem recht gut das Druckverhalten zweier extremer landwirtschaftlicher Haufwerke wieder. Das eine Haufwerk, nämlich Silage, verhält sich infolge des geradlinigen Druckverlaufes ähnlich wie Wasser. Dagegen kann man bei Getreidekörnern von weit geringeren Druckwerten ausgehen, die zudem noch eine e-Funktion darstellen [3]. Welche technologischen Eigenschaften der Haufwerke nun dieses unterschiedliche Druckverhalten bewirken, ob es mehr die Gutfeuchte ist oder die Häcksellänge oder irgendein anderer Gutparameter, darüber kann man heute vorerst nur Vermutungen anstellen. Da es jedoch dringend notwendig ist, endlich einmal mehr Klarheit in die sicher nicht einfachen Zusammenhänge zu bringen, wurde vom Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig ein Forschungsvorhaben angesetzt, mit dem auf breiter Basis dieser Problembereich erforscht werden soll. In den folgenden Ausführungen werden erste Ergebnisse aus dieser Forschungsarbeit gebracht.

Voraussetzungen für eine Silotheorie

Zuerst war zu prüfen, ob man die Druckverhältnisse in den Lagergütern mit den Grundlagen der Mechanik theoretisch ermitteln kann. Es soll hier auf die entsprechenden mathematischen Ansätze nicht näher eingegangen werden; es sei nur darauf hingewiesen, daß man als Ausgangsbasis für eine theoretische Bestimmung der Spannungen ein Gleichungssystem aus 15 Gleichungen mit 15 Unbekannten bekommt [4]. Eine Lösung ist also prinzipiell möglich, stößt aber praktisch, wenigstens im Augenblick, noch auf unüberwindliche Schwierigkeiten.

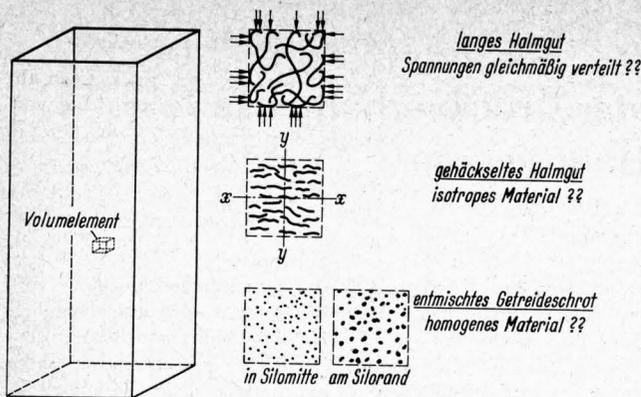


Bild 2. Zur theoretischen Bestimmung der Druckverhältnisse in landwirtschaftlichen Haufwerken.

Das liegt einmal daran, daß landwirtschaftliche Haufwerke unter Druck kein lineares Verhalten zeigen, d. h. daß das Kompressionsverhalten nicht wie bei dem Hookeschen Gesetz linear von den Druckspannungen abhängig ist. Man müßte also erst einmal die Gesetzmäßigkeiten einer nichtlinearen Haufwerksmechanik entwickeln, ein Unterfangen, vor dem selbst die theoretischen Mechaniker etwas zurückschrecken. Weiterhin muß geklärt werden, ob die Anwendung des eben angedeuteten theoretischen Weges nicht durch das Lagergut selbst in Frage gestellt wird. Bekanntlich geht man bei der Bestimmung der Spannungszustände von den Kräftegleichgewichtsbedingungen an sehr kleinen, meist quadratischen Volumenelementen aus, die man sich aus dem Haufwerk herausgeschnitten denken muß. Diesen Weg kann man aber nur einschlagen, wenn vom Gut her gewisse Bedingungen erfüllt sind:

1. die Spannungsverteilung in den Seitenflächen dieses Volumenelementes muß gleichmäßig sein,
2. die Materialkonstanten des Haufwerkes dürfen nicht ortsabhängig sein, d. h. das Gut muß homogen sein und
3. die Materialkonstanten des Haufwerkes dürfen nicht richtungsabhängig sein, d. h. das Gut muß isotrop sein.

Inwieweit diese Forderungen bei landwirtschaftlichen Haufwerken zu erfüllen sind, kann man sich anhand von **Bild 2** einen Überblick verschaffen. Links im Bild ist ein Lagersilo angedeutet, der einmal mit langem Halmgut, einmal mit kurzem Halmgut und einmal mit Getreideschrot gefüllt ist. Aus den Lagergütern wird jeweils aus der Silomitte ein quadratisches Volumelement herausgeschnitten, bei Getreideschrot noch zusätzlich eines vom Silorand. Von den herausgeschnittenen Volumelementen wurde nur eine Seite dargestellt. Beim langen Halmgut sind die Einzelmassen im Vergleich zum Volumelement relativ groß, so daß man nicht so ohne weiteres annehmen kann, daß die Flächen des herausgeschnittenen Quaders gleichmäßig von Gut begrenzt sind. Infolgedessen ist bei langem Halmgut die Annahme, daß in den Flächen des Volumelementes die Spannungen gleichmäßig verteilt sind, sehr problematisch. Beim Befüllen des Silos mit gehäckseltem Halmgut wird sich das Gut, da es nicht wie langes Halmgut in sich verfilzt ist und nicht körnig wie Getreideschrot ist, in der dargestellten Weise orientieren. Die Folge ist, daß die mechanischen Eigenschaften dieses Gutes, z. B. die Kompressibilität in x -Richtung andere Werte haben als in y -Richtung. Das Gut verhält sich nicht isotrop, die mechanischen Eigenschaften sind richtungsabhängig. Beim Getreideschrot endlich tritt beim Einfüllen in den Silo gern eine Entmischung auf, wonach sich in der Regel die feineren Gutteilchen in der Silomitte und die gröberen am Silorand befinden. Damit sind die mechanischen und technologischen Eigenschaften des Gutes ortsabhängig geworden, d. h., das Gut verhält sich nicht homogen.

Man erkennt, daß bei einer theoretischen Bestimmung der Druckverhältnisse in verschiedenener Hinsicht große Schwierigkeiten zu überwinden sind. Um diese Schwierigkeiten beseitigen zu können, bedarf es vor allem der tätigen Mithilfe der Mechaniker und Mathematiker. Für den gegenwärtigen Zeitpunkt mußte erst einmal ein Weg gesucht werden, der weniger kompliziert ist und mit einiger Sicherheit ein Ergebnis bringt. Und dieser Weg führt über das Experiment.

Experimentelle Ermittlung der Druckverteilung

Will man mit experimentellen Mitteln zu allgemeingültigen Druckgleichungen kommen, so darf man bei der Versuchsanstellung wegen der großen Zahl von Parametern nicht sporadisch vorgehen. Die Versuche müssen nach einem System durchgeführt werden, wobei man sowohl beim Gut als auch beim Behälter allmählich von einfachen zu komplizierteren Fällen gehen sollte. Bei unseren Untersuchungen sind wir von einer einfachen ebenen Wand und einem körnigen Haufwerk ausgegangen. Sowohl der rechteckige als auch der sechseckige Silo haben die ebene Wand als Bauelement. Auch sind die diesbezüglichen Untersuchungsergebnisse für zylindrische Silos interessant, da die ebene Wand einen runden Silo mit unendlich großem Durchmesser darstellt. Die gewonnenen Untersuchungsergebnisse sollen die Grundlage darstellen, an der die Ergebnisse für diese komplizierteren Fälle orientiert werden sollen. Anhand von **Bild 3** sollen der Versuchsaufbau, die gemessenen Drücke und die Versuchsparameter erläutert werden. Man erkennt ein körniges Haufwerk (Gerste) mit horizontaler Oberfläche. Es ist nach einer Seite durch eine Wand und nach unten durch einen Boden begrenzt. Nach den übrigen Seiten kann es sich praktisch unbegrenzt ausdehnen.

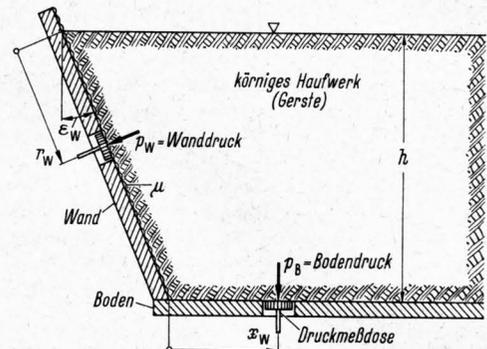


Bild 3. Versuchsaufbau und -parameter bei der Bestimmung des Wand- bzw. Bodendrucks von körnigen Haufwerken (schematisch).

Es wurden mit speziellen Druckmeßdosen, die in die Wand bzw. in den Boden eingelassen waren, die Bodendrücke p_B und die Wanddrücke p_W gemessen. Dabei wurden folgende Parameter benutzt: Abstand r_W an der Wand, Abstand x_W zur Wand, Einfüllhöhe h , Wandneigungswinkel ϵ_W und Wandreibbeiwert μ .

Meßmethode

Bevor nun auf die Untersuchungsergebnisse eingegangen wird, muß noch etwas zur Meßeinrichtung gesagt werden. Bei der Ausbildung der Druckmeßdose wäre es falsch, wenn eine Meßmethode gewählt würde, wie sie im Prinzip in **Bild 4** rechts oben zu sehen ist. Das Haufwerk, der Boden und die Druckmeßplatte, die mit einer Meßfeder verbunden ist, sind schematisch dargestellt. Da die zu messende Druckkraft mit der Federkraft ins Gleichgewicht gesetzt werden muß, ist auf jeden Fall bei dieser Meßmethode ein Meßweg s notwendig. Bewegungen der Druckmeßplatte, und seien sie noch so klein, können aber die Druckverhältnisse im Haufwerk in der Nähe der Druckmeßstelle ganz erheblich verfälschen, weil das Gut infolge der ausweichenden Druckmeßplatte im Innern sogenannte Brücken bildet, so daß sich ein Teil der ehemals auf die Druckmeßplatte wirkenden Kraft jetzt an der übrigen Siloberandung abstützt. Aber auch der umgekehrte Fall kann auftreten, nämlich daß

Verwendete Formelzeichen

| | |
|-------------------|--|
| p_B | Bodendruck |
| p_W | Wanddruck |
| g | Erdbeschleunigung |
| h | Einfüllhöhe |
| r_W | Abstand der Wanddruckmeßstelle von der Gutoberfläche |
| x_W | Abstand der Bodendruckmeßstelle von der Silowand |
| y | Silotiefe, von der Gutoberfläche an gerechnet |
| ρ | Gutdichte |
| $\gamma = \rho g$ | Gutwichte |
| ϵ_W | Neigungswinkel der Silowand |
| μ | Wandreibbeiwert |

mit dieser Meßmethode zu hohe Drücke gemessen werden. So können beispielsweise beim Befüllen des Silos an der Meßstelle momentan höhere Kräfte — dynamische Einfüllkräfte — auftreten, als sie dem Ruhezustand entsprechen. Ist der Einfüllvorgang beendet, so wird sich die Druckmeßplatte zurückbewegen wollen, was sie nur unvollkommen kann, da das auf ihr lastende Gut diese Bewegung teilweise verhindert. Die Folge ist, daß die angezeigten Kräfte zu hoch ausfallen. An der Meßfeder wird also niemals mit Sicherheit die gesuchte Kraft P abgelesen werden können. Anders liegen die Verhältnisse bei der rechts unten dargestellten Kompensationsmeßmethode. Hier bleibt die Druckmeßplatte während der Messung auf jeden Fall in Ruhe.

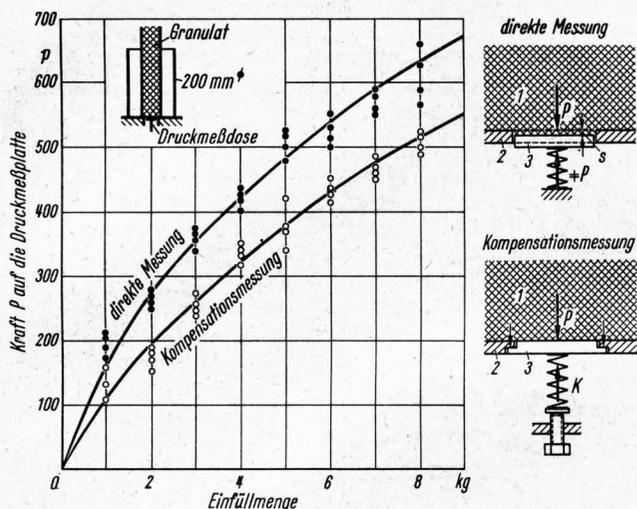


Bild 4. Die direkte Meßmethode und die Kompensationsmeßmethode und die unterschiedlichen Meßergebnisse.

- 1 Haufwerk
- 2 Boden
- 3 Druckmeßplatte

Die Wirkungsweise dieses Meßverfahrens ist folgende: Bevor das Haufwerk eingefüllt wird, d. h. bevor die Kraft P wirkt, wird beispielsweise durch Schraube und Druckfeder eine Kompensationskraft K , die größer ist als die zu erwartende Kraft P auf die Druckmeßplatte, an den starren Boden abgestützt. Nach dem Einfüllen des Haufwerkes ändert sich an der Lage der Druckmeßplatte überhaupt nichts, da dieselbe mit einer Kraft ($K - P$) von unten gegen den Boden gedrückt wird. Nun beginnt der eigentliche Meßvorgang. Durch Drehen der Schraube wird die Kraft K allmählich verkleinert. Ist K gleich der Kraft P , so wird sich die Druckmeßplatte abheben wollen. Dieser Zeitpunkt wird durch ein Signal bekanntgegeben, so daß man auf diese Weise die genaue Kraft P ermittelt hat. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Druckmeßdose entwickelt, die nach der Kompensationsmethode arbeitet. Es kann an dieser Stelle auf die Konstruktion der Meßdose nicht näher eingegangen werden.

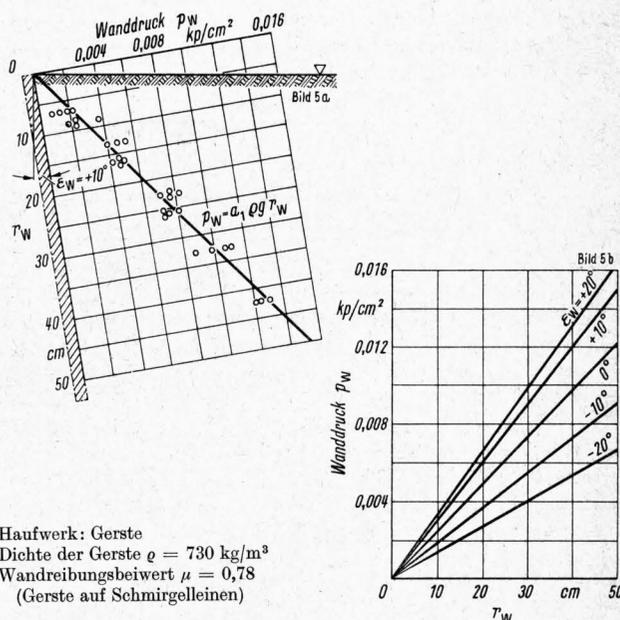
Das Diagramm in Bild 4 soll zeigen, daß entsprechend den obigen Ausführungen die direkte Druckmethode falsche, d. h. zu hohe Werte liefert, wenn beispielsweise beim Einfüllen momentan höhere Kräfte an der Meßstelle auftreten als sie dem Ruhezustand entsprechen. Links oben im Diagramm ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. In der Mitte des Bodens eines zylindrischen Behälters von 200 mm Durchmesser wurde eine Druckmeßdose angebracht, einmal als Kompensationsmeßeinrichtung und einmal als Einrichtung zur direkten Druckmessung. Das Haufwerk, in diesem Fall Kunststoffgranulat, wurde vor dem Versuch in ein Rohr gefüllt, das über der Druckdose angeordnet war. Wird das Rohr gehoben und herausgezogen, so treten durch das ausfließende Haufwerk momentan hohe Einfüllkräfte an der Druckmeßplatte auf. Die Versuche wurden bei verschiedenen Einfüllmengen durchgeführt. In dem Diagramm ist die gemessene Kraft über der Einfüllmenge aufgetragen. Wie die Kurvenverläufe zeigen, liegen die falschen Meßergebnisse der direkten Druckmeßmethode um 20 bis 30% höher als die mit der Kompensationsmeßmethode ermittelten.

Messung des Wanddruckes

Da — wie vorhin ausgeführt wurde — keine theoretisch abgeleiteten Gleichungen für die Wand- und Bodendrucke vorliegen, an denen man die Meßergebnisse orientieren könnte, muß man entsprechend dem tendenzmäßigen Verlauf der Meßpunkte eine sinnvolle mathematische Annahme treffen. Mit Hilfe der Ausgleichsrechnung wird dann die angenommene Gesetzmäßigkeit so zwischen die Meßpunkte gelegt, daß sie für diese eine mittlere Kurve darstellt. Mit der Ausgleichsrechnung werden also die Konstanten der angenommenen mathematischen Gleichungen bestimmt. Die ermittelten Konstanten werden dann zum Schluß in Arbeitsblättern zusammengefaßt. Im folgenden wird zuerst auf die Wanddrücke eingegangen und im Anschluß daran auf die Bodendrucke.

In Bild 5 sind einige Ergebnisse der Wanddruckmessungen wiedergegeben. Als Haufwerk wurde Gerste mit einer Dichte $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ verwendet und als Wandmaterial Schmirgelleinen mit einem Haftreibwert $\mu = 0,78$ gegenüber Gerste. In Bild 5a ist eine Wand dargestellt, die gegen die Vertikale um einen Wandneigungswinkel $\varepsilon_W = 10^\circ$ vom Haufwerk weg geneigt ist. Ist die Wand in dieser Weise geneigt, so ist der Wandneigungswinkel positiv, ist die Wand zum Haufwerk hin geneigt, so ist der Wandneigungswinkel negativ. Der an verschiedenen Stellen r_W gemessene Wanddruck p_W wurde senkrecht über der entsprechenden Meßstelle aufgetragen. Wie man anhand der Meßpunkte sieht, muß die mathematische Deutung der Abhängigkeit $p_W = f(r_W)$ eine Gerade sein. Dieser lineare Verlauf der Wanddrücke ist repräsentativ für andere Wandneigungswinkel. Der formelmäßige Zusammenhang lautet dann: $p_W = C r_W$. Zieht man die Wichte ρg aus der Konstanten heraus, so lautet die Gleichung:

$$p_W = a_1 \rho g r_W \quad (1)$$



Haufwerk: Gerste
Dichte der Gerste $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$
Wandreibbeiwert $\mu = 0,78$
(Gerste auf Schmirgelleinen)

Bild 5. Wanddruck p_W in Abhängigkeit vom Abstand r_W der Meßstelle von der Gutoberfläche (Bild 5a) und des Wandneigungswinkels ε_W als Parameter (Bild 5b).

Die Konstante a_1 wurde mittels der Ausgleichsrechnung bestimmt und danach die Gerade eingezeichnet. In Bild 5b sind die Ausgleichsgeraden für verschiedene Wandneigungswinkel zusammengestellt. Das Diagramm ist das gleiche wie das in Bild 5a, nur daß es in der üblichen Darstellungsweise gezeichnet wurde. Man sieht, daß sich die Neigung der Geraden mit dem Wandneigungswinkel erheblich ändert. Geht man von der vertikalen Lage der Wand aus, d. h. von einem Wandneigungswinkel von 0° , so erhöhen sich die Wanddrücke, wenn man die Wand vom Haufwerk weg neigt, d. h. zu positiven Wandneigungswinkeln kommt. Dagegen erniedrigen sich die Wanddrücke, wenn man die Wand zum Haufwerk hin neigt, d. h. wenn man zu negativen Wandneigungswinkeln kommt.

Ein interessanter Zusammenhang ergibt sich, wenn man die Konstanten a_1 , die die Neigung der Geraden bestimmen, über dem Wandneigungswinkel aufträgt. **Bild 6** zeigt das Ergebnis. Links oben im Bild ist nochmals der Versuchsaufbau zu sehen. Eingetragen ist das wesentliche Ergebnis der Untersuchungen, nämlich daß sich die Wanddrücke durch eine Geradengleichung wiedergeben lassen. Im Diagramm ist der dimensionslose Proportionalitätsfaktor a_1 über dem Wandneigungswinkel ε_W aufgetragen. Die unteren vollen Meßpunkte geben die a_1 -Werte von Bild 5b wieder. Sie gelten also für eine Wand, die mit Schmirgelleinen beklebt war. Die darüberliegenden leeren Meßpunkte gelten für das gleiche Haufwerk, nur daß in diesem Fall die Wand mit einem relativ glatten Material (Zeichenkarton) beklebt war, das gegenüber Gerste einen Haftreibungswert von 0,38 hatte. Da alle a_1 -Werte bei Zeichenkarton eindeutig über denen bei Schmirgelleinen liegen, kann man folgern, daß die Wanddrücke desto höher sind, je glatter die Wand ist. Weiterhin kann man dem Bild entnehmen, daß sowohl die a_1 -Werte für Zeichenkarton als auch die für Schmirgelleinen sehr gut auf den eingezeichneten Kurven liegen. Wenn man die Grenzwerte dieser Kurven ermitteln möchte, so braucht man die Wand nur um den Punkt 0 in der Schemaskizze zu drehen. Bewegt man die Wand im Uhrzeigersinn, d. h. nach negativen Wandneigungswinkeln hin, so müssen die Wanddrücke dann Null werden, wenn das Haufwerk unter dem Böschungswinkel abfällt. Da der gemessene Böschungswinkel bei der verwendeten Gerste etwa 30° betrug, müssen beide a_1 -Kurven bei $\varepsilon_W = -60^\circ$ Null werden. Ebenfalls kann man sich leicht klarmachen, daß bei Drehung der Wand entgegen dem Uhrzeigersinn die Wanddrücke bei einem Wandneigungswinkel von $+90^\circ$ Null werden müssen, und damit auch die a_1 -Werte. Das bedeutet, daß die a_1 -Kurven irgendwo zwischen $\varepsilon_W = 0^\circ$ und $+90^\circ$ ein Maximum durchlaufen. Der Kurvenverlauf für Wandneigungswinkel kleiner -20° und größer $+20^\circ$ wurde zwar experimentell nicht bestimmt, stimmt aber tendenzmäßig mit den eben gemachten Überlegungen überein, wenn man die beiden Kurven entsprechend den gestrichelten Linien nach beiden Seiten extrapoliert.

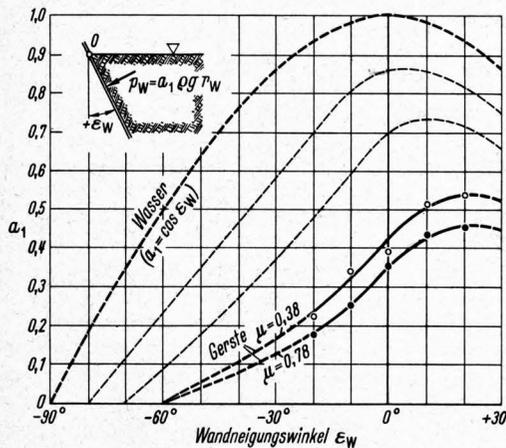


Bild 6. Die Konstante a_1 in Gl. (1) in Abhängigkeit vom Wandneigungswinkel ε_W bei verschiedener Wandrauigkeit (bzw. Fließfähigkeit des Gutes).

Wandreibungsbeiwert für Gerste auf Zeichenkarton $\mu = 0,38$
Wandreibungsbeiwert für Gerste auf Schmirgelleinen $\mu = 0,78$

Die in dem Diagramm dick gestrichelte Kurve gilt für Wasser und stellt — wie man sich leicht klarmachen kann — eine Kosinusfunktion dar. Man erkennt, daß eine derartige Flüssigkeit wegen der fehlenden inneren und äußeren Reibungskräfte weit höhere Wanddrücke erzeugen kann als ein körniges Haufwerk wie Gerste. Auch ist die Kurve, wenn man sie nach links verlängert, bei einem Wandneigungswinkel von -90° Null, da der Böschungswinkel von Flüssigkeiten Null ist. Man sollte in diesem Zusammenhang einmal untersuchen, ob dieses Diagramm nicht ein Mittel sein kann, um die Haufwerke hinsichtlich ihres Fließverhaltens zu kennzeichnen. Je mehr sich die a_1 -Kurve für irgendein Haufwerk der von Wasser nähert, desto fließfähiger ist das Gut. Natürlich müßte man diese Überlegung durch weitere Versuche bestätigen. In das Diagramm wurden neben den er-

läuterten Kurven noch zwei dünn gestrichelte Kurven eingetragen. Diese Kurven gehören zu Haufwerken, die fließfähiger als Gerste sein müßten.

Messung des Bodendruckes

Die Wand nimmt nicht nur Normaldrücke, d. h. senkrecht auf sie wirkende Wanddrücke, auf, sondern auch Schubspannungen infolge der Reibung zwischen dem Gut und der Wand. In Wandnähe wird also ein Teil des Gutgewichtes tangential in die Wand eingeleitet, was zweifellos von Einfluß auf den Verlauf der Bodendrucke ist. In **Bild 7** werden einige Versuchsergebnisse für die Bodendrucke wiedergegeben.

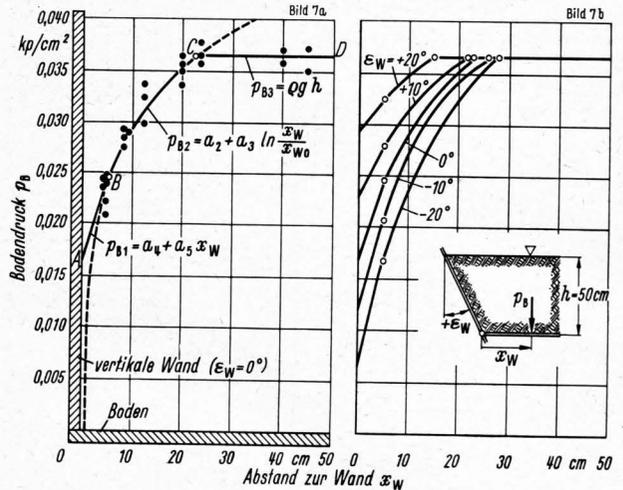


Bild 7. Bodendruck p_B in Abhängigkeit vom Abstand x_W von der Wand bei verschiedenen Wandneigungswinkeln ε_W .

Versuchsbedingungen wie bei Bild 5.
Einfüllhöhe $h = 50$ cm.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 7b schematisiert dargestellt. Ermittelt wurde der Bodendruck p_B in Abhängigkeit vom Abstand x_W zur Wand und vom Wandneigungswinkel ε_W . Die Einfüllhöhe betrug 50 cm, das Haufwerk war Gerste und die Wand war mit Schmirgelleinen beklebt. In Bild 7a sind die Meßergebnisse für die Bodendrucke bei vertikaler Wand, d. h. $\varepsilon_W = 0^\circ$, wiedergegeben. Man erkennt, daß die Meßpunkte des Bodendruckes zur Wand hin ganz erheblich abfallen, im Gegensatz zu einer Flüssigkeit wie Wasser, bei der auch direkt an der Wand der Bodendruck gleich dem hydrostatischen Druck $\rho g h$, Wichte multipliziert mit Einfüllhöhe, ist. Die mathematische Deutung der Meßergebnisse ist hier nicht so einfach wie bei den Wanddrücken. Dies liegt einmal daran, daß die Funktion $p_B = f(x_W)$ aus zwei Teilen besteht: in dem einen Teil ist der Einfluß der Wand spürbar, es ist der Abschnitt A C, und in dem anderen Teil (C D) ist der Einfluß der Wand nicht spürbar. Hier ist der Druck gleich dem hydrostatischen. Ferner ist der Druckverlauf A C nicht geradlinig wie bei den Wanddrücken. Es galt nun eine mathematische Gesetzmäßigkeit zu finden, die diesen Druckabfall möglichst gut wiedergibt. Wie in so vielen Fällen ergab sich auch hier, daß eine logarithmische Funktion sich am besten den Meßpunkten anpaßt, und zwar der Form

$$p_{B2} = a_2 + a_3 \ln(x_W/x_{W0}) \quad (2)$$

Hierin bedeuten a_2 und a_3 Konstanten, die mittels der Ausgleichsrechnung ermittelt werden müssen. Über x_{W0} wird der Numerus des Logarithmus naturalis dimensionslos gemacht. Da x_W in cm eingesetzt wird, ist $x_{W0} = 1$ cm. Die logarithmische Funktion wurde in das Diagramm eingetragen. Sie besteht aus den beiden gestrichelten Teilen und dem ausgezogenen Kurvenzug B C. Man erkennt, daß im Bereich zwischen B und C die Meßpunkte sehr gut durch eine Funktion der angegebenen Gesetzmäßigkeit ausgeglichen werden können. Dagegen geben die gestrichelten Kurvenzüge den Druckverlauf nicht wieder. Bei Druckwerten direkt an der Wand, d. h. zwischen A und B, und Werten in größerer Entfernung zur Wand, d. h. zwischen C und D, gibt die logarithmische Gleichung deswegen nicht den

Druckverlauf wieder, weil in den Grenzfällen bei $x_w = 0$ und $x_w = \infty$ nach dieser Gleichung der Bodendruck negativ bzw. positiv unendlich wäre. Unmittelbar an der Wand hat aber der Druck einen endlichen positiven Wert und in großer Entfernung von der Wand ist der Bodendruck eine Konstante von der Größe

$$p_{B3} = \rho g h \quad (3).$$

Es hat sich deshalb als zweckmäßig erwiesen, die Bodendruckkurve in drei Abschnitte zu unterteilen: AB, BC und CD. Während die p_B -Funktionen für den 2. und 3. Abschnitt schon festliegen, mußten für $p_{B1} = f(x_w)$ zwei sinnvolle Annahmen getroffen werden. Diese lauten: Der Druck p_{B1} ist linear von x_w abhängig, und die p_{B1} -Kurve geht an der Stelle B tangential in die p_{B2} -Kurve über. Diese beiden Annahmen wurden zwar nicht durch Meßpunkte bestätigt. Man kann sich aber anhand des Diagrammes überzeugen, daß der sich ergebende Druckverlauf sinnvoll ist. Die entsprechende Gesetzmäßigkeit lautet dann:

$$p_{B1} = a_4 + a_5 x_w \quad (4).$$

Wie man sich leicht klarmachen kann, sind die Konstanten a_4 und a_5 direkt über a_2 und a_3 bestimmbar. In Bild 7b sind nun für verschiedene Wandneigungen diese Bodendruckkurven dargestellt. Sie ergeben sich, wenn man die Wand in der untenstehenden Schemaskizze um den eingezeichneten Drehpunkt schwenkt. Man erkennt, daß relativ hohe Bodendrucke direkt an der Wand entstehen, wenn man dieselbe nach außen neigt, was durchaus verständlich ist, da der Einfluß der Wand dann weniger wirksam ist. So steigt der Bodendruck unmittelbar an der Wand nahezu auf das Doppelte, wenn man die Wand von 0° auf $+20^\circ$ neigt.

Ebenso wie die Konstanten a_1 bei den Wanddrücken für verschiedene Parameter in einem Arbeitsdiagramm zusammengefaßt wurden, kann man auch die Konstanten a_2 und a_3 für die Bodendrucke in je einem Diagramm darstellen. In Bild 8 ist dies wiederum für Gerste als Versuchsgut und für Schmirgelleinen als Wandmaterial geschehen. Dabei sind die Konstanten a_2 bzw. a_3 über der Einfüllhöhe h aufgetragen. Man erkennt, daß sich die einzelnen Punkte, die alle vollkommen getrennt über die Ausgleichsrechnung ermittelt wurden, für eine bestimmte Wandneigung recht gut entlang einer Kurve gruppieren. Natürlich müssen diese Diagramme noch in verschiedener Hinsicht ergänzt werden, da das vorliegende Versuchsmaterial nur für ein bestimmtes Gut und bestimmte Bereiche der verwendeten Parameter gilt.

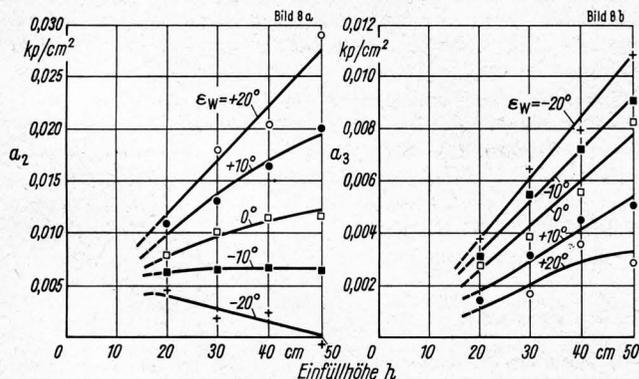


Bild 8. Konstanten a_2 und a_3 in Gl. (2) in Abhängigkeit von der Einfüllhöhe h bei verschiedenen Wandneigungswinkeln ϵ_w . Versuchsbedingungen wie bei Bild 5.

In Bild 4 bis 8 wurden einige Versuchsergebnisse für die Wand- und Bodendrucke erläutert, wobei der wesentliche Teil des Versuchsstandes aus einer ebenen Wand bestand, die mit einem körnigen Haufwerk hinterfüllt war. Davor wurde erklärt, daß bei den Untersuchungen deswegen von diesem einfachen Lagerungsfall ausgegangen worden ist, um Zahlenwerte und Gleichungen zu haben, an denen man die Ergebnisse für die Drücke bei komplizierteren Silos und Haufwerken orientieren kann. Auf diese Weise kann man den Einfluß irgendeines Silo- oder Gutparameters besser erkennen und zahlenmäßig festlegen. Es soll deshalb zum Schluß anhand von Bild 9 gezeigt werden, in

welcher Weise wir die weiteren Untersuchungen vornehmen und insbesondere, wie wir die bisher gewonnenen Untersuchungsergebnisse als Orientierungsmaßstab heranziehen werden.

Bild 9 zeigt die Ergebnisse zweier Versuchsreihen, die an zylindrischen Silos unterschiedlichen Durchmessers gewonnen wurden. Gemessen wurde wie bei der ebenen Wand der Bodendruck p_B in Abhängigkeit vom Abstand x_w zur Silowand. Bis auf die Wölbung der Wand wurden alle Parameter so gewählt wie bei einer Versuchsreihe für die ebene Wand, d. h., das Haufwerk war Gerste, die Wandfläche war mit Schmirgelleinen bezogen und die Einfüllhöhe betrug 50 cm. Auf diese Weise konnte man feststellen, wie sich der Druckverlauf beim Übergang von einem Silo mit unendlich großem Durchmesser (ebene Wand) auf Silos mit endlichen Durchmessern ändert.

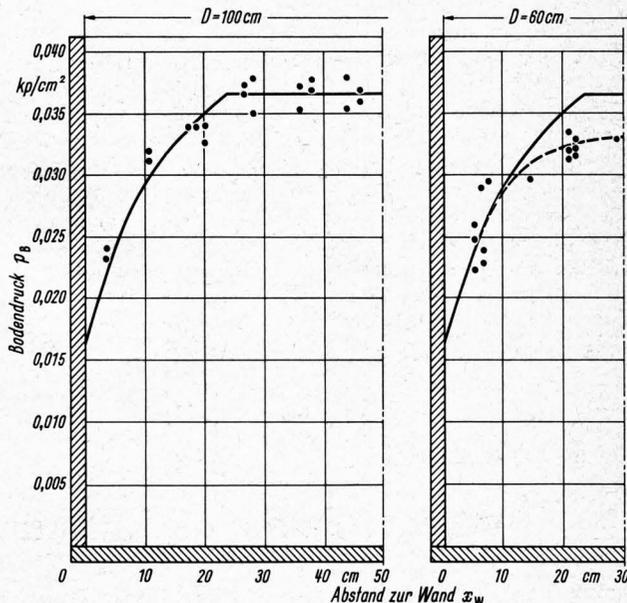


Bild 9. Bodendruck p_B in zylindrischen Silos verschiedenen Durchmessers in Abhängigkeit vom Abstand x_w von der Silowand (volle Meßpunkte) im Vergleich zum Bodendruck in der Nähe einer ebenen Wand (ausgezogene Kurven).

Versuchsbedingungen wie in Bild 7.

Die eingezeichneten Punkte stellen die gemessenen Bodendrucke für die beiden Silos dar. Die dick ausgezogenen Kurven, die in den beiden Diagrammen eingezeichnet sind, sind einander gleich und stellen das bereits gezeigte Ergebnis für die ebene Wand dar. Es zeigt sich, daß dieser Kurvenverlauf im linken Bild recht gut den Verlauf der Meßpunkte wiedergibt, so daß man sagen kann, daß bei Silos, die einen Durchmesser von 100 cm und mehr haben, bei den gewählten Versuchsbedingungen der Druckverlauf identisch ist mit dem bei einer ebenen Wand. Irgendwo zwischen $D = 100$ cm und $D = 60$ cm muß aber diese Identität aufhören, denn im rechten Diagramm deckt sich der Kurvenverlauf nur noch in Wandnähe mit den Meßpunkten. In der Silomitte liegen die Meßpunkte eindeutig unter der Kurve für die ebene Wand. Hier macht sich also schon der bekannte Siloeffekt bemerkbar, nämlich daß ein Wandelement auf der rechten Siloseite auch den Druckverlauf auf der linken Seite beeinflusst. Es kann an dieser Stelle nicht weiter auf diese Dinge eingegangen werden, es sei nur noch darauf hingewiesen, daß man jetzt versuchen müßte, die Bodendruckkurve für die ebene Wand so zu erweitern, daß der Einfluß des Silodurchmessers in der dargestellten Weise berücksichtigt wird. Sicher sind noch eine ganze Reihe von Versuchen notwendig, bis man diese Korrektur in endgültiger Form vornehmen kann.

Zusammenfassung

Eine richtige Dimensionierung der Lagerbehälter für landwirtschaftliche Haufwerke setzt voraus, daß man die Druckverhältnisse in den Lagergütern kennt. Der Wissensstand auf diesem Gebiet ist jedoch noch sehr bruchstückhaft. Einer theoretischen Lösung stellen sich im Augenblick nahezu unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen, was insbesondere daher

rührt, daß die meisten landwirtschaftlichen Haufwerke unter Druck ein nichtlineares Kompressionsverhalten zeigen, wodurch die mathematischen Gleichungen äußerst kompliziert werden.

Eine Ermittlung der Druckverhältnisse ist deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur über praktische Versuche möglich. Um aber auf diesem Weg zu Gesetzmäßigkeiten zu kommen, die möglichst umfassend sind und die nicht nur für spezielle Silos und Lagergüter gelten, muß man bei den Untersuchungen zuerst die einfachen Lagerungsfälle behandeln, um dann zu komplizierteren überzugehen. Deswegen wurde von einer einzelnen ebenen Wand und einem körnigen Haufwerk ausgegangen. Zur experimentellen Bestimmung der Drücke wurde eine besondere Druckmeßdose, die nach der Kompensationsmeßmethode arbeitet, entwickelt. Auf die meßtechnischen Probleme wurde etwas näher eingegangen.

Weiterhin wurden einige ausgewählte Ergebnisse der Wanddruck- und der Bodendruckmessungen erläutert. Die Wanddrücke steigen linear mit der Tiefe an und lassen sich durch eine Geradengleichung ausdrücken. Trägt man die entsprechenden Proportionalitätskonstanten über dem Neigungswinkel der Wand auf, so kommt man zu einem charakteristischen Diagramm, über das man unter Umständen Aussagen über das Fließverhalten des untersuchten Gutes machen kann. Die gemessenen Bodendrucke waren in Wandnähe infolge der durch die Wandreibung aufgenommenen Gutkräfte geringer als der hydrostatische Druck. Dieser Druckabfall konnte durch eine logarithmische Funktion wiedergegeben werden. Es wurde gezeigt, daß

man die diesbezüglichen Konstanten in Arbeitsblättern darstellen kann, mit deren Hilfe die Bodendrucke für verschiedene Einfüllhöhen, Wandreibbeiwerte und Wandneigungswinkel bestimmt werden können.

Schließlich wurden die Untersuchungsergebnisse für den untersuchten einfachen Lagerungsfall auf einen komplizierteren, nämlich auf einen mit körnigem Haufwerk gefüllten zylindrischen Silo, übertragen.

Die gezeigten Forschungsergebnisse sind nur eine Auswahl aus dem vorliegenden Versuchsmaterial, das demnächst in einem VDI-Forschungsheft [5] veröffentlicht wird, in dem auch die theoretischen Grundlagen ausführlich behandelt sind.

Schrifttum

- [1] *Wenzel, F.*: Untersuchungen über die Druckverhältnisse in Silozellen. Diss. TH Braunschweig 1963. Ref. in: *Grundl. Landtechn.* **15** (1965) S. 29.
- [2] DIN 1055, Blatt 6: Lastannahmen für Bauten, Druckverhältnisse in Silozellen. Entwurf: September 1962. Berlin: Beuth-Vertrieb 1962.
- [3] *Janssen, H. A.*: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Z. VDI* **39** (1895) S. 1045/49.
- [4] *Kauderer, H.*: Nichtlineare Mechanik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1958.
- [5] *Stroppel, A.*: Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI-Forschungsheft 525 Düsseldorf: VDI-Verlag (Erscheint Anfang 1968).

DK 631.243.24:631.363

Versuche über die Luftkühlung gedämpfter Kartoffeln

Von **Rudolf Thaer**, Braunschweig-Völkenrode

Gedämpfte Kartoffeln sollen gekühlt einsiliert werden. In Versuchen, bei denen gedämpfte Kartoffeln mit Luft im Gegenstrom gekühlt wurden, ließ sich die Abhängigkeit des Kühleffektes von verschiedenen Einflußgrößen feststellen. Aus den Versuchen ging weiter hervor, daß bei der gewählten Anordnung die Kühlung der Kartoffeln im wesentlichen als Verdunstungskühlung anzusehen ist und daher ein früher beschriebenes Verfahren zur Berechnung der Verdunstungskühlung benutzt werden kann. Aus der Anwendung dieses Berechnungsverfahrens ergeben sich Hinweise für den Bau von Kühlanlagen für gedämpfte Kartoffeln.

Inhalt

1. Einleitung
2. Die Versuche
 - 2.1. Wahl des Kühlprinzips
 - 2.2. Aufbau der Versuchskühlanlage
 - 2.3. Versuchsdurchführung
 - 2.4. Versuchsergebnisse
 - 2.4.1. Außenversuche
 - 2.4.2. Laborversuche
3. Charakter der Kühlung, Folgerungen
 - 3.1. Anteil des Stoffüberganges an der Kühlung
 - 3.1.1. Wärmebilanzen
 - 3.1.2. Vergleich der Ablufttemperaturen nach Rechnung und Versuch
 - 3.2. Berechnung der fiktiven Übergangsflächen
 - 3.3. Folgerungen
4. Zusammenfassung
5. Schrifttum

Dipl.-Ing. Rudolf Thaer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode. Die Arbeit entstand zum größeren Teil unter dem vorherigen Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke, jetzt Universität Göttingen.

1. Einleitung

In der Bundesrepublik werden jährlich zu Futterzwecken 2 bis 5 Millionen Tonnen Kartoffeln gedämpft und anschließend einsiliert. Das Dämpfen erfolgt mittels fahrbarer Dämpfanlagen, die von Hof zu Hof wandern, oder aber an zentraler Stelle (Zuckerfabrik, Molkerei). In beiden Fällen gelangen die Kartoffeln normalerweise in noch heißem Zustand in den Silo. *Zimmer* [1] hat festgestellt, daß bei dem üblichen Silierverfahren ungefähr 20 von 100 Nährstoffeinheiten verlorengehen; diese Verluste lassen sich aber um etwa 8 Einheiten vermindern, wenn die Kartoffeln nicht heiß, sondern auf 30°C oder eine niedrigere Temperatur abgekühlt eingelagert werden. *Weise* [2] wies nach, daß dadurch auch die Silagequalität verbessert wird. In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sollte geklärt werden, wie sich eine Kühlung gedämpfter Kartoffeln zweckmäßig durchführen läßt¹⁾.

2. Die Versuche

2.1. Wahl des Kühlprinzips

Als Kühlmedien kommen Wasser und Luft in Betracht. Aus verschiedenen Gründen, die früher dargelegt wurden [3; 4], ist die Wasserkühlung gedämpfter Kartoffeln als nicht aussichtsreich anzusehen. Deshalb beschränkte man sich bei den Versuchen auf die Luftkühlung und baute eine Versuchsanlage nach dem Gegenstromprinzip zum Einsatz in landwirtschaftlichen Betrieben. Gegenstrom ist leichter zu verwirklichen als Kreuzstrom und ist wirkungsvoller als Gleichstrom. Nachdem Vorversuche gezeigt hatten, daß unzerquetschte Kartoffeln in ihrem Innern sehr lange heiß bleiben, wurden die Hauptversuche

¹⁾ Die Versuche wurden von der Kommission „Futterkonservierung“ der Futter- und Grünlandabteilung der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft angeregt. Dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, das das Forschungsvorhaben finanziell unterstützt hat, sei auch an dieser Stelle gedankt.