

Der Strömungswiderstand bei landwirtschaftlichen Belüftungsanlagen

Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig ¹⁾

Für die Belüftung und Trocknung landwirtschaftlicher Erntegüter werden im allgemeinen verhältnismäßig kleine Luftmengen benötigt, so daß der Widerstand, den die Güter dem Luftstrom entgegensetzen, fast immer die ausschlaggebende Größe für die Bemessung des Kraftbedarfes von Belüftungsgebläsen ist. Unterlagen für eine ungefähre Vorabrechnung des zu erwartenden Strömungswiderstandes sind daher die Voraussetzung für eine wirtschaftlich günstige Ausbildung der Belüftungsanlage und die genaue Kenntnis aller den Widerstand beeinflussenden Faktoren kann beim praktischen Betrieb solcher Anlagen in vielen Fällen zu einer merklichen Herabsetzung der Betriebskosten führen.

In der landtechnischen Fachliteratur [1 bis 8], besonders in der amerikanischen, wurde bereits eine ganze Reihe von Untersuchungen über den Strömungswiderstand landwirtschaftlicher Erntegüter veröffentlicht. Leider war es nicht möglich, sich auf Grund der bisherigen Arbeiten klare Vorstellungen über die Höhe des Strömungswiderstandes von Erntegütern zu machen, da die erwähnten Veröffentlichungen außerordentliche Schwankungen zeigten. Es wurde auch nur in wenigen Arbeiten der Versuch unternommen, die Zusammenhänge zwischen dem Strömungswiderstand und den für seine Zusammensetzung maßgebenden Größen zu klären und auch diese Versuche führten zu keiner umfassenden Behandlung des Problems.

Im Rahmen der am Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig laufenden Arbeiten auf den Gebieten der Heu-, der Kartoffel- und der Gemüsebelüftung mußten aus diesem Grunde eigene Untersuchungen angestellt werden. Es war das Ziel dieser Versuche, die für die Entwicklung der landwirtschaftlichen Trocknungs- und Belüftungstechnik wichtigen Zusammenhänge zwischen dem Wider-

stand und den ihn beeinflussenden Faktoren zu klären und zum anderen der Praxis Unterlagen für den wirtschaftlichen Betrieb von Belüftungsanlagen in die Hand zu geben. Obwohl die Arbeiten sich zunächst auf die Untersuchung von Heu und von Kartoffeln und Gemüse erstrecken sollten, zeigte es sich schon nach den ersten Vorversuchen, daß umfassenden Ergebnissen nur durch Einbeziehung einer größeren Reihe von Erntegütern mit möglichst verschiedenen strömungstechnischen Eigenschaften erzielt werden konnten. So wurden außer Heu, Stroh und Rübenblatt vor allem Raps, Klee, Wicken, Getreide, Erbsen, Bohnen, Mais, Kartoffeln, Mohrrüben und Zucker- und Futterrüben untersucht. Die Versuche wurden außerdem so angelegt, daß auch alle in landwirtschaftlichen Betrieben vorkommenden Zustände dieser Güter, wie verschiedene Wassergehalte, verschiedene Reinheitsgrade oder verschiedene Korngrößen-Zusammensetzungen, berücksichtigt werden konnten.

Die Untersuchungen wurden in der in Abbildung 1 gezeigten Versuchsanlage durchgeführt. Sie bestand aus einem Windkessel und einem darüber befindlichen Meßbehälter von 630 mm Durchmesser. Dieser Durchmesser war groß genug, um vor allem bei Körnerfrüchten einen etwa zu erwartenden Wandeinfluß auszuschalten. In etwa 1 m Abstand über dem Windkessel befand sich ein mit dünnem Maschendraht ausgelegter Siebrost, auf dem das zu messende Erntegut bis zu einer Schütthöhe von 3,5 m gelagert werden konnte. Die von einem Zentrifugalgebläse erzeugte Luft wurde über eine Meßblende und einen Schieber in den Windkessel geleitet, um von dort durch das auf dem Rost lagernde Erntegut zu strömen. Die mit dem Schieber eingestellte Luftmenge konnte mit Hilfe der DIN-Blende (Öffnungsverhältnis $m = 0,2$) an einem Wassersäulen-Minimeter abgelesen werden.

Der Strömungswiderstand des Schüttgutes wurde an acht am Umfang des Meßbehälters angebrachten und durch einen Schlauch verbundenen Meßstützen unmittelbar unter dem Siebrost oder in verschiedenen Ebenen über dem Siebrost abgenommen. Seine Messung erfolgte mit einem Debro-Feinstdruckmesser und bei Drücken über 200 mm WS mit einem U-Rohr-Manometer. Der Widerstand des Siebrostes konnte infolge der geringen Windgeschwindigkeiten unberücksichtigt bleiben.

¹⁾ In diesem Aufsatz wird über die praktischen Ergebnisse von Untersuchungen berichtet, die auf Veranlassung von Prof. Dr.-Ing. G. Segler am Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule, Braunschweig, mit Mitteln des KTL und mit ERP-Mitteln durchgeführt wurden. Die geschlossenen Ergebnisse der Arbeiten mit den zugrundeliegenden theoretischen Unterlagen werden zu Anfang des kommenden Jahres in der Schriftenreihe „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“ als „VDI-Forschungshelt“ erscheinen. An dieser Stelle sollen zunächst diejenigen Ergebnisse veröffentlicht werden, die für den praktischen Betrieb von landwirtschaftlichen Belüftungsanlagen von Bedeutung sind.

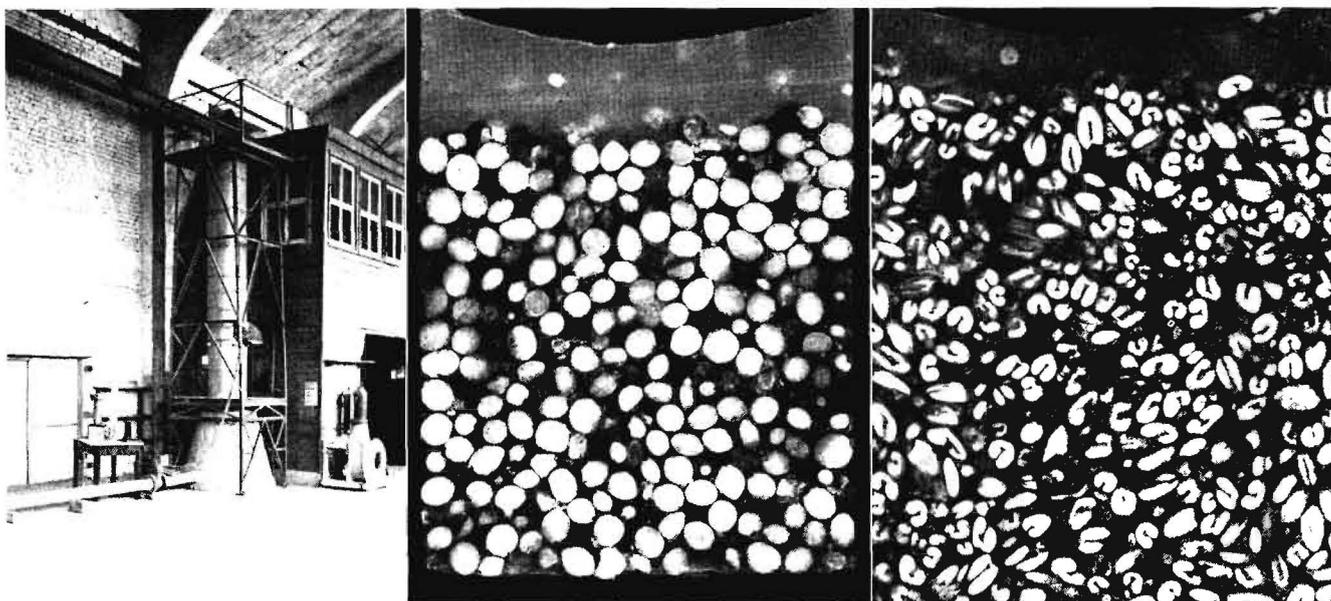


Abb. 1—3: Versuchsanlage zur Messung des Strömungswiderstandes — Schnittbild einer Wickenschüttung — Schnittbild einer Weizenschüttung

Über weitere meßtechnische Einzelheiten, insbesondere über die zur Wahrung der Meßgenauigkeit getroffenen Maßnahmen, über die Art der Berücksichtigung der Luftzustände und über die Ermittlung eines reproduzierbaren Schüttverfahrens zur Füllung des Versuchsbehälters wird später an anderer Stelle berichtet werden.

1. Allgemeine strömungstechnische Eigenschaften belüfteter Körner- und Erdfrüchte

Landwirtschaftliche Erntegüter weisen bekanntlich selbst in einer Schüttung ein und desselben Gutes vielfältige Formen auf. Die Größenunterschiede zwischen den einzelnen Körnern sind erheblich und die Art ihrer Oberflächen ist verschiedenartig. Betrachtet man weiter die Struktur einer Schüttung zahlreicher solcher Körner mit ihren völlig unregelmäßig ausgebildeten Hohlräumen — wie sie beispielsweise die in den Abbildungen 2 und 3 durch Ausgießen mit Paraffin hergestellten Schnitte zeigen — so schien es kaum möglich, Zusammenhänge zwischen dem Strömungswiderstand und den Eigenschaften dieser Güter zu finden. Und es erschien erst recht unmöglich, im Hinblick auf den Strömungswiderstand irgendwelche Beziehungen zwischen den einzelnen Gütern entdecken zu wollen. Um so überraschender war es, daß schon die ersten in der oben beschriebenen Anlage durchgeführten Versuche solche Beziehungen erkennen ließen.

Trägt man nämlich für einen mittleren Luftzustand die im Versuchsbehälter gemessenen auf einen Meter Schütthöhe

bezogenen Druckwiderstände ($\frac{\Delta p}{h}$) über der auf den freien

Behälterquerschnitt bezogenen Windgeschwindigkeit w auf, so ergeben sich für alle untersuchten Güter Kurven von auffallend ähnlichem Charakter. Die in Abbildung 4 wiedergegebenen, in doppelt-logarithmischem Maßstab aufgetragenen Kurven einiger der untersuchten Erntegüter mit verschiedenartigen Eigenschaften zeigen diese Ähnlichkeit recht deutlich. Schon die Staffelung dieser Kurven von Futterrüben bis zu Kleesamen läßt die Abhängigkeit des Strömungswiderstands vom Körperdurchmesser oder von der Größe der zwischen den Körpern gebildeten Hohlräume erkennen. Je größer der Körperdurchmesser, um so kleiner ist der Widerstand der Schüttung. Es kann aber schon durch Überlegungen festgestellt werden, daß der Widerstand außer von der Schütthöhe der Windgeschwindigkeit und dem Körperdurchmesser noch von einer Reihe weiterer Faktoren abhängt, die sich — wenn überhaupt — nur durch besondere Meßverfahren feststellen lassen, oder deren Größen nur experimentell gewonnen werden können. Es sind dies:

die Korngrößenverteilung innerhalb der Schüttung;

die Kornform;

die Kornlage zur Strömung;

die Oberflächenbeschaffenheit der Körner;

das Hohlraumvolumen (das ist das in der Schüttung zwischen den Körnern befindliche Luftvolumen in m^3 Luftraum je m^3 Schüttung);

der Wandeinfluß (der vor allem den Umstand berücksichtigt, daß das Hohlraumvolumen durch die Wahl des Behälterdurchmessers beeinflußt wird).

Unter Verwendung der früher insbesondere von Barth [9], Fehling [10] und Kling [11] gewonnenen Erfahrungen über den Druckverlust von Kohle- und Erzschüttungen und durch Anwendung der Erkenntnisse der Strömungsmechanik, insbesondere des Reynoldsschen Ähnlichkeitsgesetzes, konnte eine systematische Klärung des Einflusses der oben geschilderten Kenngrößen vorgenommen werden. Diese Klärung führte zu einer allgemein gültigen Formel für die Berechnung des Strömungswiderstandes korn- und knollenförmiger Erntegüter. Sie lautet:

$$(1) \Delta p = k \cdot \xi_{ks} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{h}{4} \cdot \frac{\gamma_l \cdot w^2}{2g} \quad [\text{mm WS}]$$

$$\text{wobei: } \xi_{ks} = f(\text{Re}) = f\left(\frac{\gamma_l \cdot dk \cdot w}{\eta \cdot g}\right)$$

$$= f\left(\frac{dk \cdot w}{\nu}\right)$$

In dieser Formel, die nicht für halm- und blattförmige Erntegüter verwendet werden darf, bedeuten:

Δp — den Strömungswiderstand oder Druckverlust in der Schüttung in kg/m^2

k — eine dimensionslose Stoffkonstante

ξ_{ks} — den dimensionslosen Widerstandsbeiwert der Kugelschüttung in Abhängigkeit von der Re-Zahl²⁾

ε — das Hohlraumvolumen in m^3/m^3

h — die Schütthöhe in m

γ_l — das spezifische Gewicht des strömenden Gases (der Trocknungsluft) in kg/m^3

w — die Windgeschwindigkeit, bezogen auf den freien Querschnitt des Meßbehälters in m/s

g — die Erdbeschleunigung in m/s^2

— die absolute Zähigkeit des Gases (Luft) $\frac{kg \cdot s}{m^2}$

— die kinematische Zähigkeit in m^2/s

dk — den reduzierten Korndurchmesser in m

Der aus dem 1000-Korn-Gewicht und dem Raumgewicht (nicht Schüttgewicht) der Körner zu ermittelnde reduzierte Korndurchmesser kann folgendermaßen definiert werden:

$$(2) dk = 0,124 \cdot \sqrt[3]{\frac{g_0}{z_0 \cdot \gamma_k}} \quad [m]$$

wobei z_0 : eine größere Anzahl (etwa 1000) von gezählten Körnern

g_0 : das Gewicht von z_0 -Körnern in g

k : das Raumgewicht der Körner in kg/m^3

Die obige Gleichung ermöglicht die Vorausberechnung des Strömungswiderstandes für beliebig gewählte Voraussetzungen und vor allem auch für verschiedene Luftzustände, etwa bei Verwendung von Heißluft. Ein für die landwirtschaftliche Belüftungspraxis besonders wichtiges aus der Formel zu entnehmendes Ergebnis ist aber die für geschüttete Kohle bereits von Fehling [10] gefundene Erkenntnis, daß das Hohlraumvolumen den Strömungswiderstand etwa mit der 4. Potenz beeinflußt. Das bedeutet, auf die Praxis übertragen, daß in Zukunft ganz besonderer Wert auf die Erzielung und Erhaltung einer lockeren Schüttung gelegt werden muß, wenn der Widerstand klein gehalten werden soll.

²⁾ Die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes ξ_{ks} von der Reynoldsschen Zahl kann für die einzelnen Erntegüter näherungsweise etwa wie folgt angesetzt werden:

Reduzierter Korndurchmesser der Güter in m	Beispiele	Näherungsformel für Widerstandsbeiwert $\xi_{ks} \cong C \cdot \text{Re}^{-n}$
1 bis $2 \cdot 10^{-3}$	Raps, Senf, Klee, Luzerne, Gräsern	$\xi_{ks} \cong 32 \cdot \text{Re}^{-0,74}$
3 bis $5 \cdot 10^{-3}$	Getreide, Wicken, Linsen	$\xi_{ks} \cong 19 \cdot \text{Re}^{-0,57}$
6 bis $10 \cdot 10^{-3}$	Erbsen, Bohnen, Mais	$\xi_{ks} \cong 11,5 \cdot \text{Re}^{-0,44}$
30 bis $150 \cdot 10^{-3}$	Kartoffeln, Mohrrüben, Zuckerrüben, Futterrüben	$\xi_{ks} \cong 3,2 \cdot \text{Re}^{-0,19}$

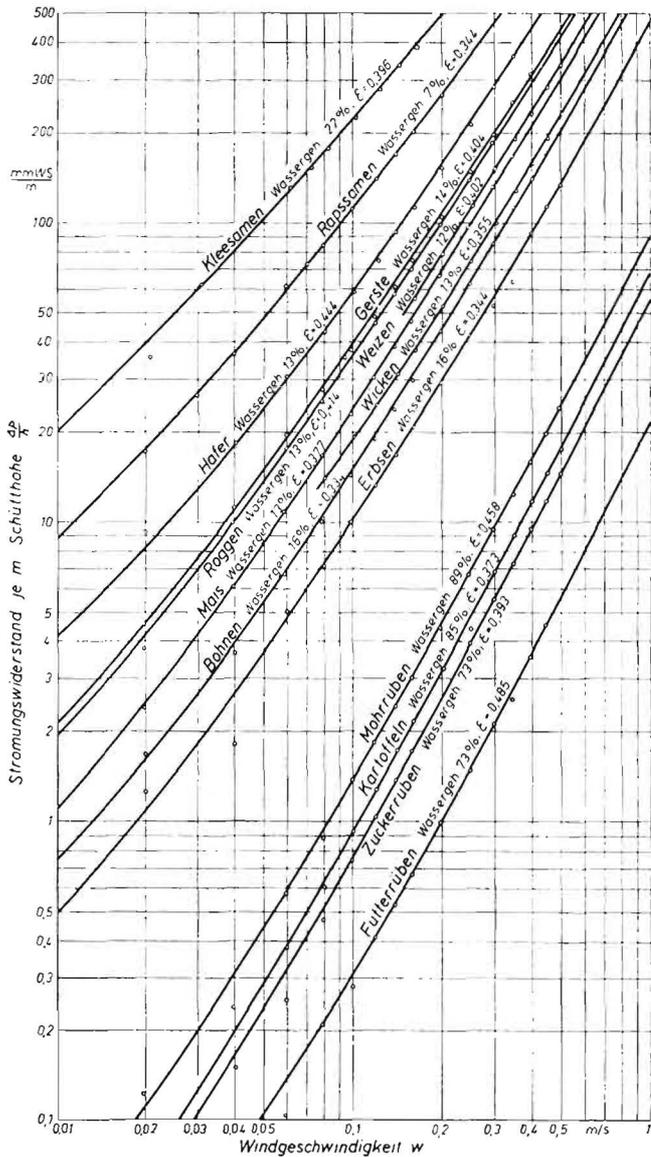


Abb. 4: Der Strömungswiderstand einiger landwirtschaftlicher Erntegüter

Die in die Formel eingeführte Stoffkonstante k enthält im wesentlichen den Einfluß der Kornform, der Kornlage und der Oberflächenbeschaffenheit der Körner. Sie gibt an, um wieviel mal größer — unter sonst völlig gleichen Verhältnissen — der Strömungswiderstand der Körnerschüttung im Verhältnis zum Widerstand einer Schüttung von glatten Kugeln ist. Man erkennt aus den in Abbildung 5 gezeigten Körnern und den zugehörigen Stoffkonstanten, daß die Größe der Konstanten tatsächlich wesentlich von der Form und der Beschaffenheit der Körner abhängt.³⁾ Auf diese Zusammenhänge

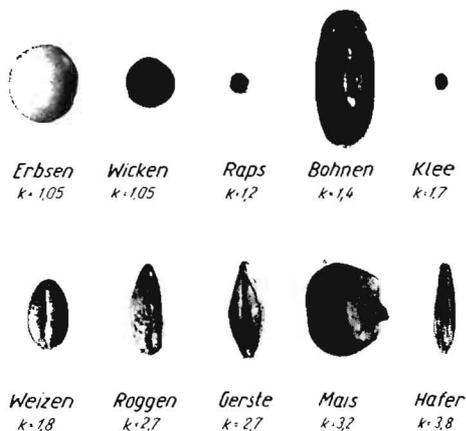


Abb. 5: Vergleich zwischen Stoffkonstanten und Kornbeschaffenheit

und auf weitere Einzelheiten und Berechnungsgrundlagen soll jedoch ebenfalls in dem bereits erwähnten späteren Bericht ausführlicher eingegangen werden.

II. Der Strömungswiderstand von Körner- und Erdfrüchten

Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse soll hier erörtert werden, ob beispielsweise größere Schütthöhen den Widerstand landwirtschaftlicher Erntegüter relativ ungünstig beeinflussen können, ob der Wassergehalt der Güter — im Rahmen der üblichen Werte — den Widerstand erhöht, und es soll an Hand von Beispielen gezeigt werden, daß durch die Wahl der Schüttmethode oder durch die Vermeidung von Beimengungen der Widerstand beeinflusst werden kann.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, daß zu einigen dieser Fragen auf dem Gebiete der Getreidebelüftung auch von Simons [12] in einer 1954 erschienenen Arbeit neue Erkenntnisse gewonnen wurden.

1. Der Einfluß der Schüttmethode

Schon bei der Erörterung der eben wiedergegebenen Formel für den Strömungswiderstand wurde der überraschend große Einfluß hervorgehoben, den das Hohlraumvolumen auf den Widerstand hat. Die praktische Bedeutung der Tatsache, daß das Hohlraumvolumen den Widerstand mit der 4. Potenz beeinflusst, ergibt sich aus der folgenden Überlegung:

Verdichtet man den Inhalt eines beispielsweise auf 2,06 m Höhe mit Roggen gefüllten Behälters von 1 m Durchmesser so weit, daß die Schütthöhe nach dem Zusammenrütteln noch 2,00 m beträgt, so steigt der Widerstand der Schüttung um etwa 18 % an. Bedenkt man, daß eine Vergrößerung der Schütthöhe um 0,06 m praktisch überhaupt keine Bedeutung hat, daß aber eine Vergrößerung des Widerstandes um 18 % den Kraftbedarf des Gebläses erheblich erhöhen kann, so erkennt man, daß in der Praxis alles getan werden muß, um vor allem bei Gütern mit hohem Druckabfall wie bei Körnerfrüchten in Belüftungs- und Trocknungsbehältern möglichst lockere Schüttungen zu erreichen. Solche Schüttungen sind vor allem durch die Wahl einer geeigneten Schüttmethode, unter Umständen aber auch durch besondere Ausbildung der Schüttbehälter zu erzielen. Die in Abbildung 6 wiedergegebenen Versuchsergebnisse zeigen, welche unterschiedlichen Widerstandsbeiwerte allein durch die Wahl verschiedener Schüttmethoden erreicht werden können. Der Widerstand, der mit einem Gebläse durch senkrecht Ausblasen in den 3,5 m hohen Versuchssilo aufgefüllten Maisschüttung lag etwa 70 % über dem Widerstand der gleichen Schüttung, die das zweifache jedoch mit einem Sack am Rand des Versuchsbehälters ausgeschüttet wurde. Wie die Untersuchungen ergaben, ist dieser große Unterschied allein auf die unterschiedlichen Hohlraumvolumina (0,347 und 0,401) zurückzuführen. Wie Abbildung 6 zeigt, nahm die mit einem besonderen Schüttbehälter eingefüllte Schüttung — entsprechend der Ausbildung des Behälters und der Wahl der Schüttmethode — etwa einen mittleren Wert zwischen den extremen Möglichkeiten ein.

Weitere Versuche zeigten allerdings, daß die geschilderten großen Unterschiede zwischen den Widerständen oder den Hohlraumvolumina der Schüttungen auch auf den nicht allzu großen Behälterdurchmesser von 630 mm zurückzuführen waren. Während beispielsweise eine im 630er Behälter mit Gebläse hergestellte Roggenschüttung einen um 77 % höheren Widerstand hatte als eine lockere Sackschüttung, betragen die in einem Behälter von 900 mm Durchmesser gemessenen Unterschiede nur etwa 33 %. Wie Abbildung 7 zeigt, konnte die lockerste Sackschüttung durch Ausschüttungen der Säcke auf dem Boden des Behälters, oder danach auf der Getreideoberfläche, hergestellt werden. Das Ausschütten der Säcke am oberen Silorand brachte einen etwas höheren

³⁾ Bei der Rechnung mit den hier angegebenen Zahlenwerten für k ist zu beachten, daß diese Werte natürlich genau genommen nur für die bei diesen Versuchen benutzten Sorten von Erntegütern gelten und daß sie nicht verallgemeinert werden dürfen.

Es werden weitere Untersuchungen erforderlich sein, um beispielsweise eine mittlere Stoffkonstante für „Weizen“, „Erbsen“ usw. festzulegen.

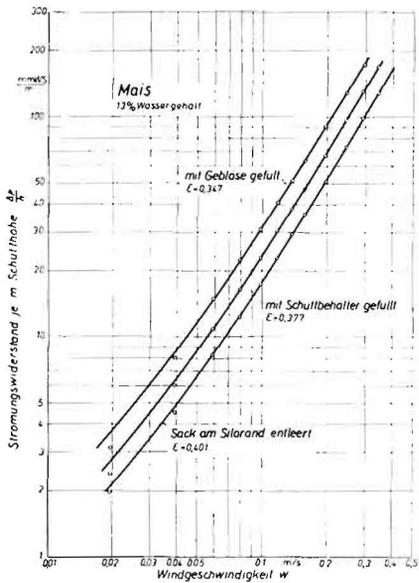


Abb. 6: Einfluß der Schüttmethode auf Hohlraumvolumen und Strömungswiderstand einer Maisschüttung (Silodurchmesser 630 mm)

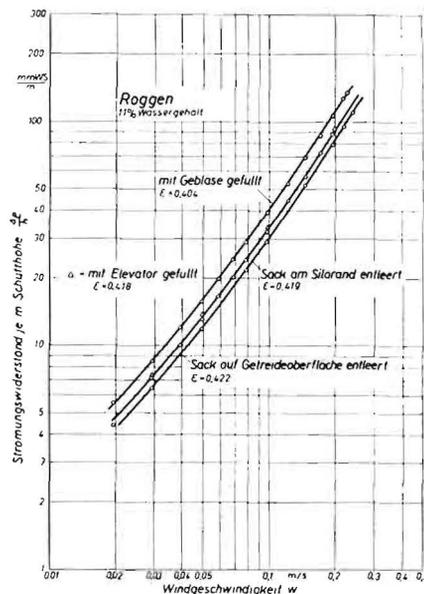


Abb. 7: Einfluß der Schüttmethode auf Hohlraumvolumen und Strömungswiderstand einer Roggenschüttung (Silodurchmesser 900 mm)

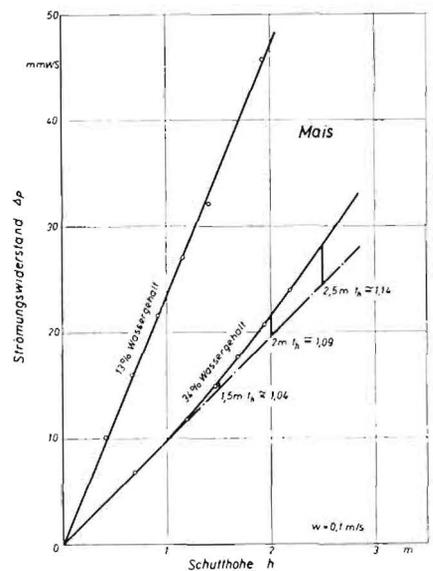


Abb. 8: Der Einfluß größerer Schütthöhen auf den Strömungswiderstand von Mais

Widerstand als die zuletzt erwähnte Methode. Eine mit Gebläse und Zyklon hergestellte Schüttung ergab erstaunlicherweise denselben Widerstand wie die reine Gebläseschüttung und ein mit Becherelevator gefüllter Behälter hatte einen Widerstand, der nur wenig über oder ein Hohlraumvolumen, das nur wenig unter dem der am Behälterrand geschütteten Sackschüttung lag. Aus diesen Ergebnissen scheint sich die Tatsache zu ergeben, daß eine Kornschüttung um so dichter lagern wird, je vereinzelter die Körner in den Behälter fallen, und daß sie um so lockerer sein wird, je größer die Körnermenge ist, die gleichzeitig in den Behälter fällt. Es ist wahrscheinlich so, daß die Körner, wenn sie einzeln fallen, eher die Zeit und die Möglichkeit finden, sich in eine stabile Lage zu bringen, während sie bei haufenweiser Schüttung sich gegenseitig durch Reibung derart beeinflussen, daß zwischen ihnen größere Hohlräume entstehen. Nur ausgedehntere, weitere Versuche können die Frage klären, ob diese Deutung sich festigen und ausbauen läßt.

Die Versuche zeigen als Ergebnis für die Praxis, daß überall dort verhältnismäßig große Hohlraumvolumen und damit geringere Widerstände erreicht werden, wo das Füllen der Silos absätzig erfolgt, wie bei Elevatorfüllung oder wie bei Anlagen, die zwischen Fördereinrichtung und Silo eine automatische Waage besitzen. Die Beantwortung der Frage, ob bei anderen Anlagen, die beispielsweise mit Gebläse beschickt werden, ähnliche, absätzig arbeitende, aber einfach ausgebildete Vorrichtungen zwischengeschaltet werden müssen, oder ob sich hier bessere Lösungen schaffen lassen, muß ebenfalls weiteren Versuchen überlassen bleiben.

Die bisherigen Ausführungen gelten in erster Linie für Körnerfrüchte. Bei Erdfrüchten braucht dem Schüttverfahren in der Praxis keine besondere Bedeutung geschenkt zu werden, da diese Güter infolge ihrer größeren Abmessungen und ihrer im Verhältnis dazu kleinen Schütthöhen im allgemeinen nur geringere Widerstände haben. Wichtig ist bei diesen Gütern nur, daß ihre Beschädigung beim Einfüllen in die Anlagen vermieden wird.

2. Der Einfluß größerer Schütthöhen

Aus versuchsmäßigen Gründen liegen den meisten, der in diesem Bericht geschilderten Versuche nur geringere Schütthöhen zwischen 1 und 1,5 m zugrunde. Es war aber zu erwarten, daß bei größeren Lagerhöhen nicht mehr mit einem proportionalen Anwachsen des Strömungswiderstandes mit der Schütthöhe, sondern mit einem steileren Anstieg zu rechnen ist. Entsprechende Versuche, die bei größeren Schütthöhen mit Mais und Roggen durchgeführt wurden, bestätigten (Abb. 8 und 9) diese Vermutung. Bis zu einer Schütthöhe von etwa 1,5 m kann bei beiden Gütern nach diesen Ergebnissen

praktisch mit einer etwa linearen Abhängigkeit zwischen Widerstand und Schütthöhe gerechnet werden, darüber hinaus jedoch ist ein schnelleres Anwachsen des Widerstandes zu erwarten. Die Ursache für dieses schnellere Anwachsen ist immer in dem bei größeren Schütthöhen in den unteren Schichten größer werdenden Vertikaldruck der Schüttsäule zu suchen. Der größere Vertikaldruck kann jedoch einmal eine Verschiebung der Körner unter sich und damit eine Verfestigung der Schüttung, zum anderen aber auch eine Verformung der Körner selbst zur Folge haben. Eine solche Verformung würde aber nicht nur eine Verdichtung der Schüttung (kleineres Hohlraumvolumen), sondern auch eine stömungstechnisch ungünstige Veränderung der Kornform und aus diesem Grunde eine Widerstandserhöhung bedeuten. Im ersten Fall (reine Verschiebung der Körner unter sich) kann auch bei größeren Schütthöhen ohne weiteres mit einer linearen Zunahme des Widerstandes gerechnet werden, wenn das entsprechend kleiner gewordene Hohlraumvolumen berücksichtigt wird; während bei Veränderung der Kornform außerdem die Veränderung der Stoffkonstanten in Rechnung gestellt werden müßte. Die Untersuchungen zeigten, daß bei den Schütthöhen, wie sie in betriebseigenen landwirtschaftlichen Belüftungsanlagen vorkommen, bei kornartigen Erntegütern bis zu 20 bis 25 % Wassergehalt kaum mit einer Veränderung der Kornform zu rechnen ist. So ließ sich beispielsweise der Verlauf der in Abbildung 9 dargestellten Widerstandskurve von Roggen noch gut mit der oben beschriebenen Widerstandsformel erfassen, wenn die bei den einzelnen Schütthöhen vorhandenen Hohlraumvolumina berücksichtigt wurden. Bei der untersuchten Maisschüttung (Abb. 8) von 34 % Wassergehalt (entspricht etwa der bei der Ernte vorhandenen Feuchtigkeit) war dies jedoch nicht mehr möglich. Es ist also zu vermuten, daß sich hier außer dem Hohlraumvolumen auch die anderen charakteristischen Größen der Schüttungsstruktur, vor allem Kornform, Kornlage und Oberflächenbeschaffenheit der Körner in den unteren Schichten verändert haben.

Interessant ist weiter, daß die gleiche Maisschüttung im getrockneten Zustand (13 % Wassergehalt) bei 1,95 m Schütthöhe in dem 630er Versuchsbehälter einen linearen Widerstandsverlauf zeigte. Hier reichte also der Druck der Säule noch nicht aus, um in den unteren Schichten eine Verkleinerung des Hohlraumvolumens oder sogar eine Verformung der jetzt harten Maiskörner hervorzurufen.

Ähnliche Untersuchungen mit Erdfrüchten konnten aus Mangel an genügenden Mengen dieser Güter nicht durchgeführt werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß bei diesen Gütern bei den üblichen Schütthöhen von 3 bis 4 m mit einer wesentlichen Veränderung des Hohlraumvolumens in den unteren

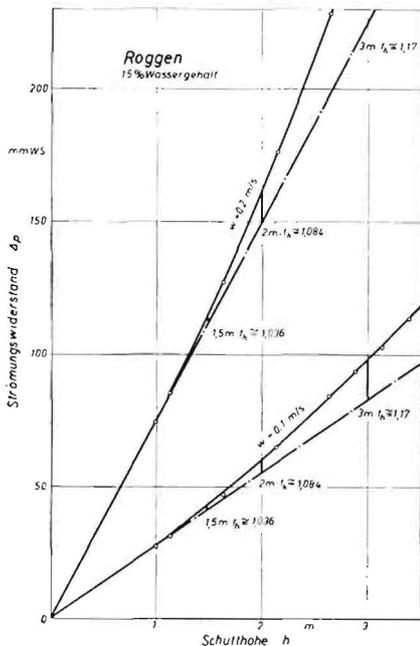


Abb. 9: Der Einfluß größerer Schütthöhen auf den Strömungswiderstand von Roggen

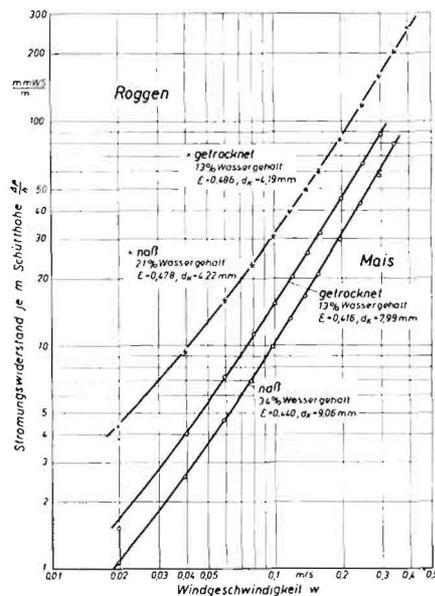


Abb. 10: Einfluß des Wassergehaltes auf den Strömungswiderstand während der Trocknung (Sildurchmesser 630 mm)

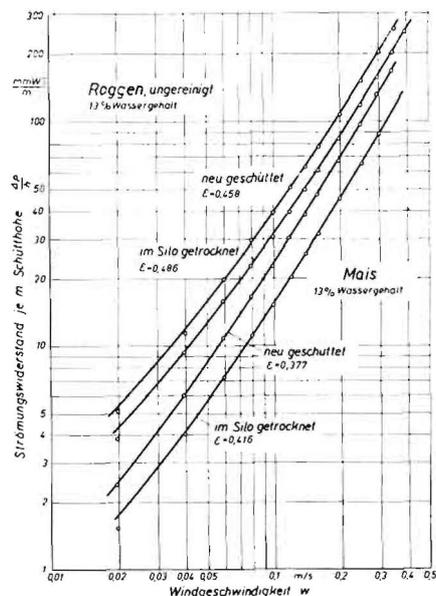


Abb. 11: Hohlraumvolumen und Strömungswiderstand von trocken geschütteten und im Silo getrockneten Gütern (Sildurchmesser 630 mm)

Schichten nicht zu rechnen ist. Auf keinen Fall würde der verhältnismäßig geringe Strömungswiderstand dieser Güter von einer solchen Veränderung nennenswert beeinflusst werden.

3. Der Einfluß des Wassergehaltes

Während der Trocknung von Körnerfrüchten ändert sich infolge der Wasserabgabe der Korndurchmesser und als Folge der Kornverkleinerung das Hohlraumvolumen. Es ergibt sich nun die Frage, wie sich die einzelnen Änderungen im Hinblick auf den Strömungswiderstand praktisch auswirken. Es liegt auf der Hand, daß eine genaue Klärung dieser Frage nur durch Großversuche in normalen Silos erreicht werden kann, denn auch der 630er Behälter reichte nicht aus, um im Hinblick auf das „Setzen“ der Körner während der Trocknung die gleichen Verhältnisse zu liefern, wie sie in einem Silo von 2 bis 3 m Durchmesser vorhanden sind. Trotzdem können die hier wiedergegebenen Versuchsergebnisse die oben erwähnten Zusammenhänge bestätigen.

Abbildung 10 zeigt die Widerstandskurven für je eine Roggen- und eine Maisschüttung, die beide in feuchtem Zustand eingefüllt und im Silo getrocknet wurden. Der reduzierte Korndurchmesser der Roggenschüttung verkleinerte sich während der Trocknung nur unmerklich und das Hohlraumvolumen vergrößerte sich sogar, so daß der Widerstand der feuchten Schüttung etwa gleich dem der im Silo getrockneten war. Da für diesen Versuch ungereinigter Roggen verwendet wurde, ist anzunehmen, daß die Auflockerung der Schüttung während der Trocknung in diesem Falle durch die Beimengung insofern begünstigt wurde, als sie ein stärkeres Setzen des ohnehin rauhern Roggens verhinderten. Im Gegensatz hierzu verringerte sich infolge des vorliegenden größeren Feuchtigkeitsgefälles der reduzierte Korndurchmesser und das Hohlraumvolumen während der Trocknung der Maisschüttung erheblich; die runderen Körner, die glattere Oberfläche und auch die stärkere Schrumpfung halten hier eine erhebliche Verfestigung der Schüttung und damit ein Anwachsen des Widerstandes zur Folge. Schon während dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß eine im Silo getrocknete Schüttung nach der Trocknung ein lockereres Gefüge und damit einen geringeren Widerstand hatte, als eine neu hergestellte Schüttung desselben Gutes bei gleichem Wassergehalt. Die in Abbildung 11 gezeigten Widerstandskurven erhärten diese Feststellung. Der unmittelbar nach der Trocknung neu geschüttete Roggen hatte einen um 25 bis 30 %, der neu geschüttete Mais sogar einen um 50 % höheren Widerstand. Diese Ergebnisse bestätigen eindeutig, daß in den meisten Fällen eine im Silo getrocknete Schüttung einen geringeren Widerstand haben wird als eine neu geschüttete. Dabei ist zu berücksichtigen, daß ein engerer Behälterdurch-

messer die während der Trocknung erfolgende Auflockerung mehr begünstigen wird als ein größerer Behälter.

Da es bei der Belüftung von Erdfrüchten darauf ankommt, den Wassergehalt der Güter zu erhalten, nicht aber diese Güter zu trocknen, erübrigte sich für Erdfrüchte eine Untersuchung der hier behandelten Probleme.

4. Der Einfluß von Beimengungen

Es ist eine bekannte Tatsache, daß Beimengungen den Widerstand von landwirtschaftlichen Erntegütern wesentlich erhöhen können. Es erwies sich als unzweckmäßig, genaue Zahlen für die Erhöhung des Widerstandes durch Beimengungen anzugeben, da es unmöglich ist, die in der Praxis vorkommenden Verunreinigungsgrade festzulegen oder die möglichen Verunreinigungen auch nur zu analysieren. Eine Körnerschüttung kann durch Verunreinigungen einerseits aufgelockert werden, andererseits verstopfen die Verunreinigungen aber wieder die durch sie größer gewordenen Hohlräume zwischen den Körnern. Es ist nicht vorauszu sehen, welcher dieser beiden Faktoren, — Auflockerung oder Verstopfung — überwiegt. Abbildung 12, in der das auf die gereinigten Körner bezogene Hohlraumvolumen angegeben ist, zeigt dies deutlich. Die durch die obere Kurve dargestellte Schüttung von ungereinigtem Weizen hat annähernd dasselbe, auf die reinen Körner bezogene Hohlraumvolumen wie die gereinigte Schüttung. Durch die Verstopfung mit Verunreinigungen hat sie jedoch einen um fast 50 % höheren Widerstand. Andererseits hat die weiter unten dargestellte, ungereinigte Schüttung durch ihre Beimengungen — deren Gesamtgewicht größer war, als das der oben erwähnten Verunreinigungen — eine merkliche Auflockerung erfahren. Die größeren Lücken wurden aber wieder soweit verstopft, daß die Schüttung wieder denselben Widerstand aufwies wie der gereinigte Weizen.

Nach diesen Ergebnissen dürfte es also zweckmäßiger sein, die sich in der Praxis durch Beimengungen ergebenden Widerstandserhöhungen statistisch zu erfassen und diese Werte, die erfahrungsgemäß zwischen 10 und 20 % liegen, als Richtwerte zu benutzen.

Auch bei der Belüftung von Erdfrüchten spielt die Frage des Einflusses von Beimengungen, die hier meist in Form von Erde auftreten, eine Rolle. Eigene Versuche haben gezeigt, daß durch Beimischung von Erde zu Kartoffeln die Widerstände um 10, 100, aber auch um 500 % steigen können, je nach Menge und Zustand der beigemengten Erde. Diese Frage kann daher ebenfalls nur durch statistische Ermittlungen in der Praxis beantwortet werden. Nach den bisherigen Erfah-

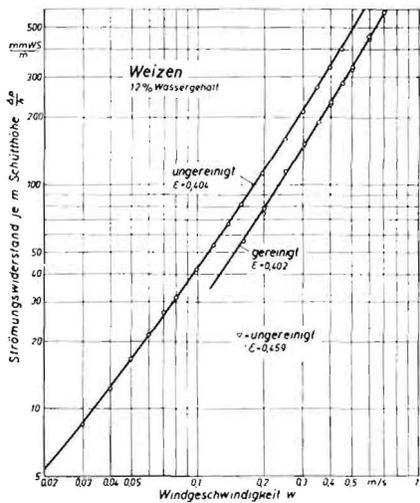


Abb. 12: Der Einfluß von Beimengungen auf den Strömungswiderstand von Weizen

rungen kann in der Praxis mit einer Erhöhung des Widerstandes durch Beimengungen um 20 bis 50 % gerechnet werden. Da aber bei den verhältnismäßig kleinen Windgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,2 m/s bei der Belüftung von Erdfrüchten keine großen Widerstände auftreten, erhöht sich der Kraftbedarf der Belüftungsanlagen dadurch nur unwesentlich. Es ist jedoch sowohl bei Erd- als auch bei Körnerfrüchten die Lagerung von gereinigten Gütern vorzuziehen.

5. Der Einfluß von Mischung und Schichtung

Besonders bei der Kartoffelbelüftung interessiert die Frage, ob eine Lagerung in sortiertem Zustand im Hinblick auf den Strömungswiderstand günstiger ist, als die Lagerung unsortierter Kartoffeln. Die in den Abbildungen 13 und 14 gezeigten Versuchsergebnisse sollen diese Frage beantworten. Abbildung 13 gibt den an ein und demselben Kartoffelstapel einmal in gemischtem (vier Größen-Klassen untereinander gemischt) und zum anderen in geschichtetem (vier Größen-Klassen getrennt übereinander gestopelt) Zustand gemessenen Druckabfall wieder. Die Kartoffeln zeigen im gemischten Zustand entsprechend dem kleineren Hohlraumvolumen einen um etwa 40 % höheren Widerstand als im geschichteten Stapel. Ähnliche Verhältnisse dürften in den meisten Fällen auch in der Praxis zu erwarten sein.

In Abbildung 14 ist der auf einen Meter Schütthöhe bezogene Strömungswiderstand der einzelnen Schichten im Ver-

hältnis zur Mischung eingetragen. Es zeigt sich hier, daß der Widerstand der Mischung etwa in der Höhe des Widerstandes der kleinsten Sorte liegt.

Diese Untersuchungen zeigen, daß in der Praxis die Belüftung sortierter Erdfrüchte zwar den geringsten Kraftbedarf ergeben wird, daß es aber bei künstlicher Belüftung durch Gebläse ohne weiteres und ohne einen sehr viel höheren Kraftaufwand möglich ist, auch unsortierte Kartoffeln zu belüften. Lediglich starke Erdbeimengungen sind zu vermeiden.

III. Der Strömungswiderstand von halm- und blattförmigen Erntegütern

1. Allgemeine strömungstechnische Eigenschaften

Wie bereits festgestellt wurde, war es nicht möglich, auch für halm- und blattförmige Erntegüter allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten für die Zusammensetzung des Strömungswiderstandes zu finden. Dieser Versuch scheiterte im wesentlichen an der Unmöglichkeit, eine Bezugsgröße (Halmdurchmesser oder ähnliches) festzulegen, die für den Ansatz einer Widerstandsgleichung zu verwenden wäre. Daher war von vornherein nur an eine empirische Ermittlung der Zusammenhänge zwischen dem Widerstand und den Einflüssen der Güter zu denken. Um aus den Messungen möglichst klare Tendenzen ermitteln zu können, wurden als Versuchsgut Erntegüter mit unterschiedlicher Beschaffenheit gewählt: Das blattlose Stroh, blattärmere und blattreichere Luzerne und gehäckseltes und ungehäckseltes Rübennblatt. In den Abbildungen 15 und 17 sind die Ergebnisse dieser Messungen wiedergegeben. Man erkennt sofort die überraschende Ähnlichkeit, die diese Kurven mit den Widerstandslinien für Körner- und Erdfrüchte haben. Wenn man die als Ersatzgröße für das nicht meßbare Hohlraumvolumen dieser Erntegüter gewählte Lagerdichte (oder das Schüttgewicht) s (in kg/m^3) betrachtet, muß man berücksichtigen, daß diese Kenngröße nur als relativer Maßstab für ein bestimmtes Gut von gleichem Wassergehalt benutzt werden darf. Die Lagerdichte ist daher nur in Verbindung mit einem Erntegut und einem bestimmten Wassergehalt zu verwenden.

Schon die in den Abbildungen 15 und 17 gezeigten Ergebnisse ließen eine annähernd regelmäßige Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Lagerdichte vermuten. Die Versuchsergebnisse bestätigten diese Annahme, so daß, unter Verwendung der für Körner- und Erdfrüchte gewonnenen Ergebnisse, für halm- und blattförmige Erntegüter folgende Gebrauchsformel entwickelt werden konnte:

$$(3) \quad \Delta p = C \cdot h \cdot \gamma_s m \cdot w^{2-n} \cdot \gamma^{n-1} \cdot w_n \text{ [mm WS]}$$

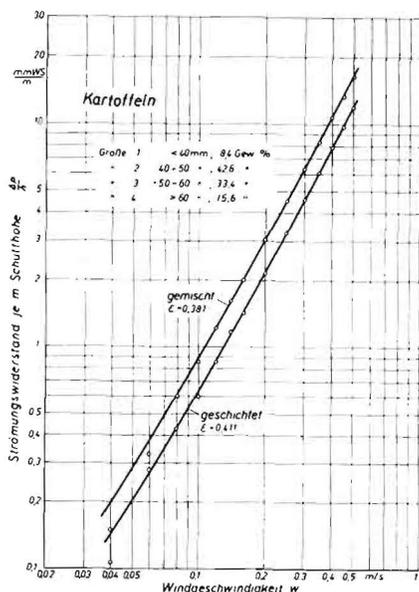


Abb. 13: Der Strömungswiderstand geschichteter und gemischter Kartoffeln

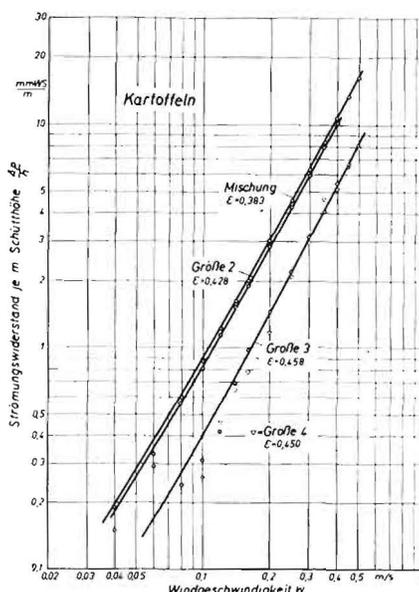


Abb. 14: Der Strömungswiderstand einzelner klassierter, geschichteter Güter im Verhältnis zur Mischung

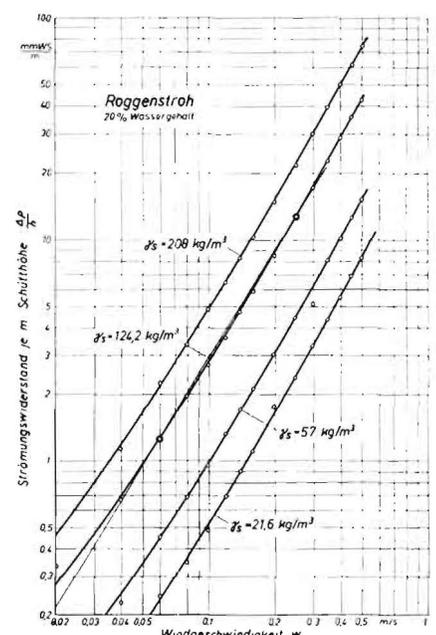


Abb. 15: Der Strömungswiderstand von Roggenstroh bei verschiedenen Lagerdichten

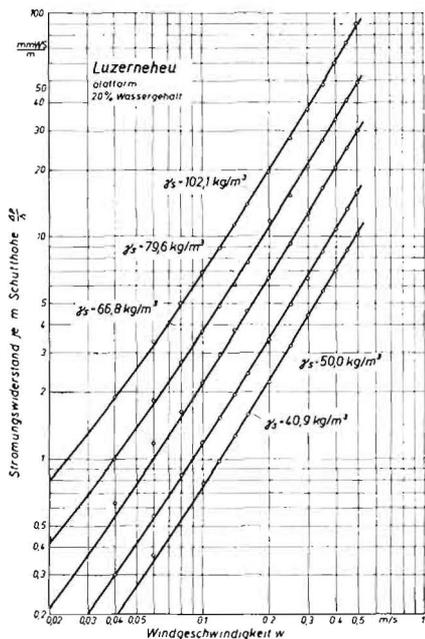


Abb. 16: Der Strömungswiderstand von Luzerneheu bei verschiedenen Lagerdichten

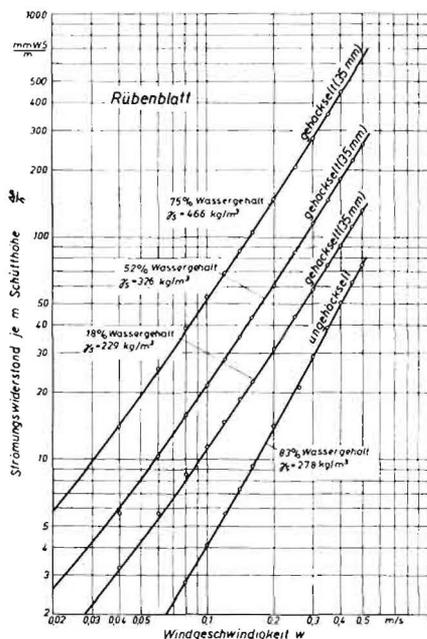


Abb. 17: Der Strömungswiderstand von locker gepacktem Rübenblatt

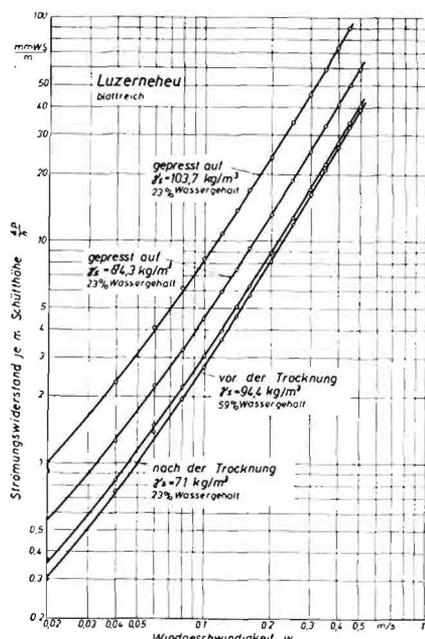


Abb. 18: Der Strömungswiderstand von Luzerneheu vor und nach der Trocknung

Neben den bereits bekannten Größen η , γ , w und h bedeutet C in dieser Formel einen Stoffbeiwert, der neben dem Einfluß einer Bezugslänge des Gutes alle unbekanntennenngrößen der Schüttung sowie alle Meßungenauigkeiten enthält und der nicht mit der Stoffkonstanten k für Körner- und Erdfrüchte verwechselt werden darf.

Eine Zusammenstellung der Stoffbeiwerte sowie der Exponenten m und n für die untersuchten Güter ist in Zahlentafel I wiedergegeben. Man erkennt in dieser Darstellung die Abhängigkeit der Exponenten m für die Lagerdichte von den Eigenschaften des Erntegutes. Außer dem Stoffbeiwert enthält also auch noch m den Einfluß der unbekanntennenngrößen des zu untersuchenden Gutes. Aber auch die Zahlen für den Stoffbeiwert zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Erntegüter. Sie werden mit wachsendem Blattanteil der Erntegüter kleiner, und zwar in erheblich stärkerem Maße als der Exponent n , der ebenfalls mit wachsendem Blattanteil abnimmt, der aber für die untersuchten Güter in dem verhältnismäßig abgegrenzten Bereich von 1,48 bis 1,64 liegt. (Der Exponent $n = 1,73$ für Rübenblatt soll bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden.) Im Gegensatz zu diesen Kenngrößen wächst der Exponent m mit zunehmendem Blattanteil stark an.

Die in der Zahlentafel wiedergegebenen Meßergebnisse zeigen also trotz der geringen Anzahl der Versuche interessante Zusammenhänge zwischen den im einzelnen eingeführten Kenngrößen, und die Abhängigkeit dieser Größen vom Strömungswiderstand löst klare Tendenzen erkennen. Während sich der Stoffbeiwert C entsprechend seiner Definition als auch vom Wassergehalt der Güter abhängig erwies, scheinen die Exponenten m und n nur die Eigenschaften der Güter, unabhängig vom Wassergehalt, zu kennzeichnen. Die Exponenten m und n wachsen mit dem Blattanteil der Güter, während C sich — wieder entsprechend seiner Festlegung — mit steigendem Blattanteil erheblich und innerhalb des gleichen Gutes mit steigendem Wassergehalt weniger stark verkleinert.

Es muß hier betont werden, daß diese Untersuchungen an halm- und blattförmigen Gütern infolge der geringen Mengen der zur Verfügung stehenden Erntegüter keine absolut genauen und allgemein gültigen Zahlenwerte liefern konnten, sondern daß es vielmehr ihr Ziel war, die Zusammenhänge zwischen den geschilderten Kenngrößen und dem Strömungswiderstand zu klären. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die vorliegenden Ergebnisse zu betrachten, und die wiedergegebenen Zahlen können vorläufig auch als Richtwerte nur mit Vorsicht verwendet werden. Es ist jedoch zu vermuten, daß auch weitere Untersuchungen auf breiterer Basis ähnliche Tendenzen ergeben werden.

Zohlentafel 1

Stoffbeiwerte C und Exponenten m und n für halm- und blattförmige Erntegüter

	Wassergehalt %	Untersuchte Lagerdichten γ_s kg/m^3	Stoffbeiwert $C^*)$	Exponent für Lagerdichte $m^*)$	Exponent für Luftgeschwindigkeit $n^*)$
Roggenstroh Tetra-Petkus	20	22+208	39	1,20	1,64
Luzerneheu (blattärmer)	20	41+102	0,73	2,40	1,60
Luzerneheu (blattreich)	23	71+104	0,35	2,74	1,54
	59	94	0,15	(2,74)	1,54
Zuckerrübenblatt (gehäckselt)	18	219+256	0,11	2,74	1,48
	52	306+326	0,08	2,74	1,48
	75	447+466	0,07	2,74	1,48
Zuckerrübenblatt (ungehäckselt)	83	276+377	$4,74 \cdot 10^{-6}$	3,76	1,73

*) Diese Werte gelten nur für die untersuchten Erntegüter. Ihre Verwendung als Richtwerte bei der Vorausberechnung von Strömungswiderständen ist nur unter Berücksichtigung der im Absatz III gemachten Vorbehalte möglich.

2. Der Einfluß des Wassergehaltes auf den Strömungswiderstand während der Trocknung

Während der Trocknung schrumpfen die Stengel und die Blätter halm- und blattförmiger Güter ständig weiter zusammen und es ergibt sich als Folge dieser Schrumpfung ein merkliches Zusammensacken des Stapels. Der Grad dieses Setzens hängt von der Art des Gutes ab, er ist bei Stroh geringer als bei Luzerne und bei Luzerne wieder geringer als bei dünnstengeligem Wiesenheu. Im Hinblick auf den Strömungswiderstand interessiert die Frage, ob neben der Verkleinerung der Stengelabmessungen durch das Setzen des Stapels auch eine Verkleinerung des Hohlraumvolumens und damit eine Erhöhung des Widerstandes zu erwarten ist. Der in Abbildung 18 dargestellte Versuch bestätigt die auch in der Praxis gefundene Tatsache, daß der Widerstand eines Heustapels sich während der Trocknung um etwa 10 bis 20 % erhöht; das Maß der Erhöhung schwankt mit der Beschaffenheit des Erntegutes und mit der Größe des Trocknungsbe-

Zahlentafel 2

Strömungswiderstände der untersuchten Erntegüter bei 0,1 m/s Windgeschwindigkeit

Erntegut	Strömungswiderstand je m Schütthöhe mm WS	Erntegut	Strömungswiderstand je m Schütthöhe mm WS
	m		m
Futterrüben	0,3	Wicken	19
Zuckerrüben	0,75	Mais	24
Kartoffeln	1	Weizen	29
Stroh	1	Roggen	36
Mohrrüben	1,5	Gerste	40
Luzerneheu	3	Hafer	60
Rübenblatt	5	Raps	115
Erbsen	10	Klee	230
Speisebohnen	15		

hälters. Unabhängig von diesem durch die Trocknung bedingten Druckanstieg wird der Anfangswiderstand eines Stapels bei Kaltbelüftungsanlagen außer von der Beschickungsmethode und der Größe der Anlage auch vom Wassergehalt des zu trocknenden Gutes beeinflusst. Je höher der Anfangswassergehalt ist, um so dichter wird das Gut lagern und um so höher wird sein Widerstand zu Beginn der Trocknung sein.

Zusammenfassung

Wie die aufgestellten Formeln (1) und (3) erkennen lassen, hängt der Strömungswiderstand aller untersuchten landwirtschaftlichen Güter — im Rahmen der in der Praxis vorkommenden Luftgeschwindigkeiten — etwa vom Quadrat der Windgeschwindigkeit ab, während der zwischen dem Schüttgut in der Schüttung vorhandene Luftraum (das Hohlräumvolumen) den Widerstand mit einer erheblich höheren Potenz, bei korn- und knollenartigen Erntegütern mit der 4. Potenz, beeinflusst. Alle anderen Kenngrößen, wie Schütthöhe,

Korngröße und Luftdichte, gehen nur linear oder mit einer noch kleineren Potenz in die Widerstandsgleichung ein.

Um einen möglichst geringen Strömungswiderstand zu erzielen, ergibt sich damit für die Praxis die Forderung, bei der Belüftung von Körnerfrüchten möglichst trockene Schüttungen herzustellen und sie während der Belüftung zu erhalten. Die Versuchsergebnisse zeigten, wie solche trockenen Schüttungen erreicht werden können und welche weiteren Möglichkeiten zur Erzielung eines niedrigen Strömungswiderstandes gegeben sind.

Wendet man bei der Beschickung von Belüftungsanlagen für verschiedenartige korn- und knollenförmige Erntegüter ein gleichbleibendes Schüttverfahren an und führt man die Belüftung unter vergleichbaren Bedingungen durch, so wird der Widerstand im wesentlichen von der Größe und von der Form der einzelnen Körner des Gutes bestimmt. Als grobe Faustzahlen für die bei den verschiedenen Gütern zu erwartenden Strömungswiderstände können die in der Zahlentafel 2 aufgeführten Werte dienen. Sie wurden für die unterschiedlichen Güter bei einer auf den freien Behälterquerschnitt bezogenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s gemessen.

Schrifttum:

- [1] V. H. Baker, B. M. Cannon, J. M. Stanley: A continuous drying process for peanuts. Agr. Eng. Juni 1952, S. 351.
- [2] R. B. Davis, V. H. Baker: Resistance of baled hay to air-flow. Agr. Eng. 1951, S. 24. Resistance of long and chopped hay to air-flow. Agr. Eng. Febr. 1951, S. 92.
- [3] C. K. Shedd: Some new data on resistance of grains to air-flow. Agr. Eng. Sept. 1951, S. 493. Resistance of grains and seeds to air-flow. Agr. Eng. Sept. 1953, S. 616.
- [4] B. M. Stahl: Engineering data on grain storage. Agr. Eng. Data 1, A.E. Indec 11.732.
- [5] R. M. Robinson, W. V. Hukall: Mechanical ventilation of stored grain. Agr. Eng. 1951, S. 606.
- [6] O. F. Theimer: Ventilation of grain storage. Agr. Eng. 1951, S. 106.
- [7] E. Raich: Luftdurchlässigkeit und Porenvolumen von geschüttetem Getreide und Messungen an Lüftungsanlagen nach Rank. TidL. 22. Jahrg., Heft 9 1941.
- [8] L. K. Ramsin: Der Gaswiderstand verschiedener Schüttstoffe. Wärme 51 Nr. 301 303, 1928.
- [9] W. Barth: Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik, Chemie Ing. Techn. 1954, Heft 1. Der Druckverlust bei der Durchströmung von Füllkörpersäulen und Schüttgut mit und ohne Berieselung. Chemie Ing. Techn. 1951, Heft 12.
- [10] W. Barth, W. Esser: Der Druckverlust in geschütteten Stoffen. Forschung 1933, Bd. 4, Heft 2.
- [11] R. Fehling: Der Strömungswiderstand ruhender Schüttungen. Feblungstechnik, Febr. 1939, Heft 2.
- [12] G. Kling: Das Wärmeleitvermögen eines von Gas durchströmten Kugelhäufwerks. Forschung Ing. Wes. Band 9, 82 (1938). Druckverlust von Kugelschüttungen. Z. VDI Bd. 84 Nr. 5, 1940.
- [13] D. Simonis: Untersuchungen über den Strömungswiderstand von Luft in Getreideschüttungen. Dissertation TH Braunschweig Juli 1954.
- [14] G. Segler, H. J. Matthies, J. Birk: Entwicklung und Erprobung von Heubelüftungsanlagen. KTL-Berichte über Landtechnik, Heft XXVII, 1953.
- [15] H. J. Matthies: Heutrocknung durch Kaltbelüftung. Landtechnik 1952 S. 773.
- [16] H. J. Matthies: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. Dissertation TH Braunschweig, Dezember 1954.
- [17] H. J. Matthies: Gebläsebelüftung bei der Lagerung von Kartoffeln und Gemüse. Landtechnik 1955 S. 578.

Résumé:

Dr.-Ing. H. J. Matthies: „Der Strömungswiderstand bei landwirtschaftlichen Belüftungsanlagen.“ Die maßgebende Größe für die Bemessung des Kraftbedarfes von Gebläsen für landwirtschaftliche Belüftungsanlagen ist der Strömungswiderstand der Erntegüter. Ausgehend von einer für Körner und Erdfrüchte gefundenen allgemein gültigen Formel für die Berechnung des Strömungswiderstandes werden besonders die für die landwirtschaftliche Belüftungspraxis wichtigen Fragen erörtert. Es wird an Hand der Versuchsergebnisse die überragende Bedeutung des zwischen den Körnern befindlichen Hohlraumvolumens geschildert, das den Widerstand mit der vierten Potenz beeinflusst, und es wird nacheinander der Einfluß der Schüttmethode, größerer Schütthöhen, des Wassergehaltes, der Beimengungen und der Mischung und Schichtung bei Erdfrüchten behandelt. Auch für halm- und blattartige Erntegüter, wie Heu und Rübenblatt, konnten bisher unbekannte Zusammenhänge zwischen dem Widerstand und den Eigenschaften der Güter gefunden werden, die beim Bau und beim Betrieb von Grünfüttertröcknungs- oder Heubelüftungsanlagen berücksichtigt werden sollten.

Dr.-Ing. H. J. Matthies: „Air Flow Resistance in Agricultural Ventilation Plant.“

The key factor in the calculation of power requirements of blowers and extractors for agricultural ventilation plant is the resistance to air flow exerted by the stored agricultural products. Using a general formula for the determination of the resistance to air flow exerted by grain and root crops, a number of topics of importance in agricultural ventilation practice are discussed. The great importance of the space between the grains is emphasised. Experiments have proved that this increases the resistance to the fourth power. The influence of the various methods of dumping the grains, the height of the heaps, the water content and the mixing and layering of root crops is discussed. Hitherto unknown relations between the resistance to air flow and the physical properties of stalk and root crops, such as hay and turnip leaves, are described. All these factors should be taken into consideration in the design and operation of green fodder drying and storage installations.

Dr.-Ing. H. J. Matthies :

«Le facteur de la résistance à la circulation de l'air dans les installations d'aération agricoles.»

Le facteur essentiel au calcul de la consommation d'énergie des ventilateurs utilisés pour les installations d'aération agricoles est la résistance que les produits de récolte opposent à la circulation de l'air. En se servant d'une formule trouvée pour le calcul de cette résistance à propos des grains et des tubercules et betteraves, l'auteur examine les problèmes posés par l'aération artificielle des magasins de stockage agricoles. En se basant sur les résultats des essais, il souligne la signification prédominante des espaces vides entre les grains qui influent sur la résistance avec la 4ème puissance et il traite successivement de l'influence de la méthode de déchargement, de la hauteur de stockage, de la teneur en eau, des produits d'addition et du mélange et de la disposition en couches de tubercules et de betteraves. En ce qui concerne les feuilles et graminées, comme par exemple les feuilles de betterave et le foin, on a trouvé des rapports inconnus jusqu'ici entre la résistance et les propriétés des produits qui devraient être pris en considération lors de l'étude de constructions et de méthodes de fonctionnement d'installations de séchage du fourrage vert et d'aération du foin.

Ing. Dr. H. J. Matthies: «La resistencia a la circulación en las instalaciones de ventilación agrícolas.»

En el cálculo de la energía necesaria para los sopladores de las instalaciones de ventilación agrícolas, la resistencia de las frutas cosechadas a la circulación de aire es el factor decisivo. Saliendo de una fórmula de valor general, establecida para la resistencia a la circulación que oponen los granos y las demás frutas agrarias, se tratan con preferencia las cuestiones prácticas importantes de la ventilación en la agricultura. Basándose en los resultados conseguidos en los ensayos, se describe la grandísima importancia del volumen de los huecos entre los granos que influye en la resistencia hasta el valor de la cuarta potencia. A continuación se tratan separadamente la influencia que ejerce el método y la altura del amontonamiento, el grado de humedad, las impurezas y la mezcla, así como el apludo de las frutas agrarias. Pudieron también establecerse relaciones hasta aquí desconocidas entre la resistencia y las condiciones de plantas de tallo y plantas de hojas que debían de tenerse en cuenta en la construcción y en el servicio de instalaciones de ventilación para el heno y para el secado de forrajes verdes.

Prof. Dr.-Ing. W. E. Fischer-Schlemm und Dipl.-Ing. O. Eggert:¹⁾

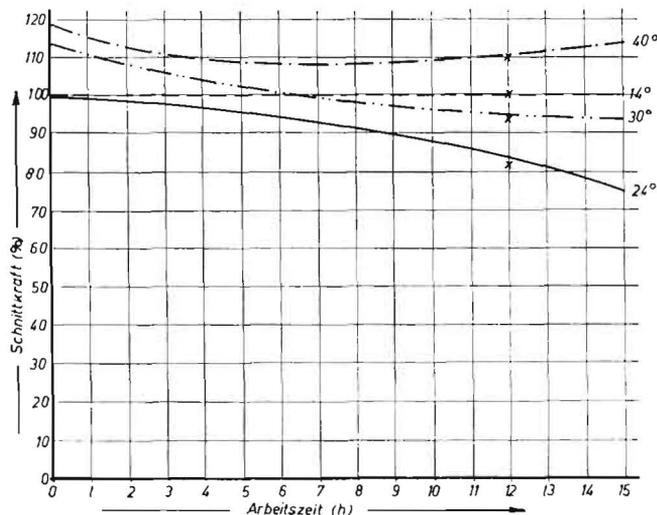
Der Einfluß des Häckselmesser-Watenwinkels auf Schnitthaltigkeit und Kraftbedarf

Landesanstalt und Institut für landwirtschaftliches Maschinenwesen, Stuttgart-Hohenheim

Die experimentellen und praktischen Untersuchungen, die wir zur Normung der Watenwinkel — Winkel zwischen der Klingenseite und der schrägen Schleiffläche — von Mähmesserklängen durchführten, gaben Anlaß, den Einfluß der Watenwinkel auch bei den Messern von Scheibenradhäcksler festzustellen. Bisher wurde dieser Winkel meist mit 14° gewählt; jedoch zeigte sich in der Praxis, daß Häckselmesser mit diesem Watenwinkel verhältnismäßig rasch stumpf werden und die mechanische Festigkeit ihrer Schneide (etwa gegenüber Fremdkörpern, die in die Maschine gelangen) ziemlich niedrig liegt.

Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurde seitens der Industrie ein Gebläsehäcksler mit einem besonderen vierflügeligen Messerrad und 380 mm Schnittbreite zur Verfügung gestellt. An jedem der vier Flügel wurde ein normales, aus gleichem Material hergestelltes Häckselmesser angebracht; die Messer unterschieden sich nur durch ihren Watenwinkel voneinander, und zwar wurden solche von 14, 24, 30 und 40° verwendet. So war die Gewähr gegeben, daß alle vier Prüfmesser bei gleichem



Zeichenerklärung: x Meßpunkt des Kontrollversuchs

Abb. 2: Schnittkraftverlauf verschiedener Watenwinkel (prozentual auf Messer mit 14°-Watenwinkel bezogen)

¹⁾ Unter Mitarbeit von E. Happle

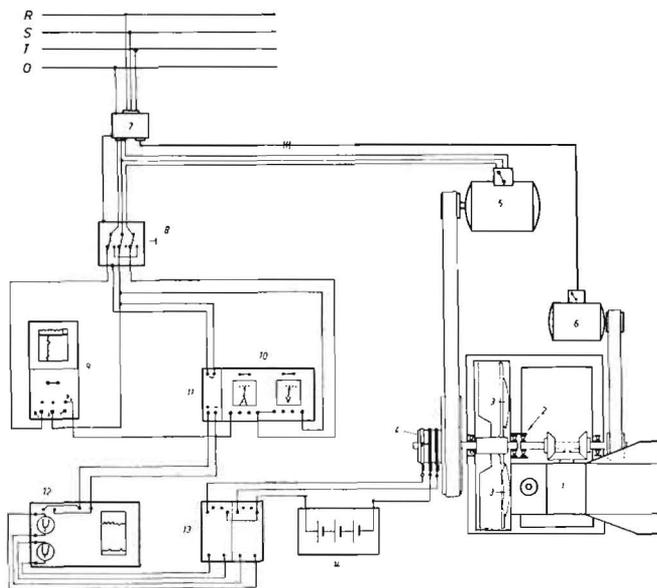


Abb. 1: Versuchsaufbau und Schaltschema

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 Gebläsehäcksler | 8 Umschalter |
| 2 geteilte Wellen | 9 Leistungsschreiber |
| 3 Versuchsmesser | 10 Strom- und Spannungsmesser |
| 4 Drehmomentenmesser m. Zeitmarke | 11 Gleichrichter |
| 5 Häckselmotor | 12 Oszillograph mit 2 Schleifen |
| 6 Varschubmotor | 13 Regelwiderstände |
| 7 Sicherungen und Verteilerkasten | 14 6 V-Akku |

Schnittgut und gleicher Vorschubgeschwindigkeit auch gleich viele Schnitte unter gleichen Schnittverhältnissen ausführen. Um den Schnittwiderstand der einzelnen Messer einwandfrei feststellen zu können, wurde die Messerradwelle unmittelbar hinter dem Radgehäuse abgesägt und hier in einem weiteren Kugellager abgestützt (Abb. 1). Diese kurze Welle, auf der das Messerrad saß, trieb ein kräftiger Drehstrommotor gesondert über einen Drehmomentenmesser auf der Radwelle an. Eine elektrische Markierungseinrichtung gestattete die spätere Feststellung, welche Schnittkraftwerte zu den einzelnen Messern gehörten; diese Werte wurden durch einen Dreischleifen-Oszillographen registriert.

Für die sämtlichen übrigen Elemente des Häckslers — Ketten-transport, Vorpressewalze, Einzugswalzen mit ihren Getrieben und Keilriemen — wurde ein zweiter Drehstrommotor aufgestellt. Die Messer waren schon vor den Versuchen mit einer selbstgebauten Schleifeinrichtung genau nach den gewünschten Watenwinkeln geschliffen worden; die Differenz der Winkel war nach dem Schleifen nicht größer als höchstens $\pm 0,5^\circ$. Um zu verhindern, daß der Rückstau des Blasgutes die Meßergebnisse fühlbar beeinflussen könnte, nahmen wir die Gebläseöhre während der Meßperioden ab.

Zur Feststellung der Messerabnutzung wurden die frisch geschliffenen Messer auf beiden Seiten mit sechs Körnerhieben gezeichnet und die Abstände zwischen den Körnermarken und der Schnittkante an diesen Stellen genau gemessen. Nach Einstellung der Messer bestimmten wir zuerst die Leerlaufkräfte, also die Reibung der Messer am Mundstück. Dann wurde in den Einlegetrog eine gleichmäßig starke