

Der Strömungswiderstand bei der Belüftungstrocknung von blattreichem, dicht lagerndem Heu

Von **Albert Scheuermann**, Stuttgart-Hohenheim¹⁾

Der wirtschaftliche Betrieb des Lüftergebläses für die Unterdach-trocknung von Heu erfordert eine Anpassung der Lüftergröße an den Luftmengenbedarf und den erforderlichen Luftdruck. Im Zusammenhang mit Versuchen zur Verbesserung der Heubelüftungstechnik ergaben Messungen des Druckwiderstandes beim Belüften von dicht lagerndem, blattreichem Heu höhere Druckwiderstände als bisher angenommen wurde. Der Strömungswiderstand beim Durchströmen parallel zur Schichtrichtung beträgt nur das 0,39- bis 0,45fache des Strömungswiderstandes in der senkrechten Richtung. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse konnten die Luftführungseinrichtungen verbessert werden, sodaß die Luftverluste und der erforderliche Luftdruck in wirtschaftlichen Grenzen gehalten werden konnten.

Die richtige Planung und Auslegung von Heubelüftungsanlagen, insbesondere die Auswahl des günstigsten Lüfters, erfordert neben anderen Größen die Kenntnis des Strömungswiderstandes des Trocknungsgutes. Bei der Einführung des Verfahrens der Heubelüftungstrocknung in Westdeutschland durch Segler in den Jahren 1949/52 [1] lag bereits eine Reihe amerikanischer Untersuchungsergebnisse über den Strömungswiderstand bei der Belüftungstrocknung von Alfalfaheu vor [2 bis 9]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren jedoch teilweise sehr stark von den verwendeten Versuchseinrichtungen und -bedingungen beeinflusst worden. Sie konnten deshalb nur mit Einschränkungen zur Auslegung der ersten Belüftungsanlagen in Westdeutschland herangezogen werden. Aus diesem Grund wurden bei der Erprobung der ersten Versuchsanlagen auch Messungen des Druckverlustes bei der Belüftungstrocknung von Wiesen gras durchgeführt [1].

Die Messungen an den ersten Versuchsanlagen sind später durch die Laborversuche von Matthies [10] ergänzt worden. Erste Empfehlungen und Hinweise zum Bau und Betrieb von Heubelüftungsanlagen wurden aufgrund dieser Messungen gegeben [11]. Bei den üblichen spezifischen Luftmengen von 0,06 bis 0,12 m³/s je m² Grundfläche (für eine Trocknungsschicht von 2 m) wurde im Arbeitsbereich des Lüfters ein erforderlicher Gesamtdruck von 25 bis 35 mm WS bei Stapelhöhen bis zu 4 m als ausreichend angesehen. In dem bei der Belüftungstrocknung üblichen Bereich der Luftgeschwindigkeiten war der Druckverlust je m Stapelhöhe zu 5 bis 7 mm WS ermittelt worden. Mit zunehmender Verbreitung des Verfahrens zeigte sich jedoch, daß bei Wiesenheu die Gutzusammensetzung und damit der Strömungswiderstand sehr verschieden sein kann. Da die vorgenannten Druckverlustmessungen an einem vorwiegend stengeligen Gut durchgeführt worden waren, ergab sich, daß die zur Bemessung der Lüfter empfohlenen Druckwerte nicht immer ausreichten, um eine Belüftung mit der gewünschten spezifischen Luftmenge zu gewährleisten. Besonders bei Heubelüftungsanlagen in den Grünlandbetrieben des süddeutschen Graslandgürtels lag der Strömungswiderstand des zu trocknenden Heues über den früher ermittelten Werten. Bei einem Erfahrungsaustausch mit einer Herstellerfirma von Heulüftern im Winter 1957/58 berichtete diese über ihre Beobachtungen und Erfahrungen mit Heubelüftungsanlagen im Allgäu. Messungen an

frisch beschickten Anlagen sollen bei normalen spezifischen Luftmengen und Stapelhöhen von 2 bis 3 m Druckverluste von 50 bis 60 mm WS ergeben haben. Die bei diesen Anlagen eingebauten Axiallüfter waren für Drücke bis zu 70 bzw. 80 mm WS im stabilen Kennlinienbereich ausgelegt.

Untersuchungen an Heubelüftungsanlagen

Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen wurden im Frühjahr 1958 eine Reihe von Heubelüftungsanlagen besichtigt. Hierbei konnten Anlagen mit gutem Trocknungserfolg und einem Heu von guter Qualität beobachtet werden, aber auch Belüftungsanlagen mit einem stark verschimmelten Heu, bedingt durch einen Mißerfolg bei der Trocknung. Fehler beim Bau oder Betrieb der Anlagen konnten bei den letztgenannten Betrieben nicht festgestellt werden. Gute Trocknungserfolge wurden vor allem bei den Anlagen mit Lüftern höherer Druckleistung beobachtet. Es lag deshalb die Vermutung nahe, daß ein bei Belüftungsanlagen im Allgäu auftretender größerer Strömungswiderstand die Hauptursache für das Versagen von Heubelüftungsanlagen ist, obwohl sie nach den bislang empfohlenen Richtwerten ausgelegt und betrieben worden waren.

Bei der Besichtigung der Belüftungsanlagen in den Allgäuer Mähweidebetrieben war besonders die dichte Lagerung des blattreichen Wiesenheues mit seiner ausgeprägten horizontal verlaufenden Schichtstruktur aufgefallen, **Bild 1**. Da die reinen Grünlandbetriebe des süddeutschen Graslandgürtels, vor allem in den Hartkäsereibereichen, das gesamte Winterfutter fast ausschließlich als Heu und Öhmd gewinnen, werden hierbei besonders hohe Anforderungen an die Trocknungsleistung der Anlagen gestellt.

Durch praktische Messungen an Heubelüftungsanlagen im Allgäu in den Jahren 1958 und 1959 war zu klären, ob die beobachteten Mißerfolge bei der Trocknung durch eine zu geringe Luftförderung der Axiallüfter verursacht wurden oder ob andere Einflußfaktoren wirksam waren. Der Betriebspunkt des Lüfters kann wegen des größeren Strömungswiderstandes von Heu in einen ungünstigen Kennlinienbereich fallen, wobei die geförderte Luftmenge sehr abfällt.



Bild 1. Schüttstruktur von Mähweideheu mit horizontaler Schichtung des Gutes.

¹⁾ Vorgetragen auf der 23. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 14. Oktober 1965.

Dipl.-Ing. Albert Scheuermann ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Georg Segler) der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim.

Durch ein verspätet einsetzendes Wachstum bedingt, stand auf den Wiesen im Allgäu zu Beginn der Heuernte Anfang Juni 1958 ein sehr junges, blattreiches Futter mit einem hohen Anteil an Untergräsern, Klee und Kräutern. **Bild 2** zeigt einige der blättrigen Wiesenpflanzen in getrocknetem Zustand, entnommen aus einem belüfteten Heustapel. Die Anlagen wurden in den ersten Junitagen fortlaufend beschickt und die Heuernte in zwei bis drei Wochen eingebracht. Hierbei sind Stapelhöhen von 5 bis 6 m und mehr erreicht worden. Das Heu wurde überwiegend lang eingelagert, wobei es von Hand (Hocheinfahrt) mit dem Greiferaufzug oder vereinzelt mit Langheugebläsen abgeladen und auf die Anlagen gebracht wurde. Häufig mußte das Heu auf dem Stock noch von Hand verteilt werden.

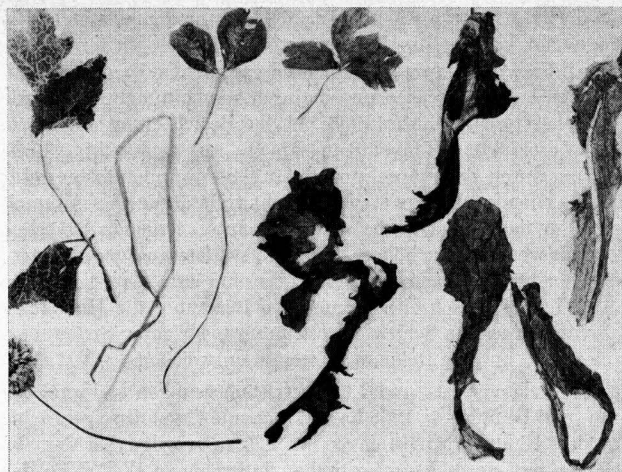


Bild 2. Blattgröße und -form von getrockneten, blättrigen Wiesenpflanzen aus einem belüfteten Heustapel.

Während der Heuernte 1958 wurden im Allgäu an sieben Anlagen Druckabfallmessungen durchgeführt und im Verlauf der Öhmernte an weiteren drei Anlagen. Schon die ersten Meßergebnisse erbrachten die Bestätigung für das Auftreten höherer Druckverluste an Heubelüftungsanlagen. Es wurden für den statischen Druck Werte bis zu 60 mm WS im Hauptkanal und unter den Rosten ermittelt. In **Bild 3** sind beispielsweise die Ergebnisse von Messungen an einer Flachrostanlage ohne senkrechte Luftführung gezeigt. Die ungefähre Bestimmung des Betriebspunktes anhand der vorliegenden Kennlinien der Lüfter ergab, daß die spezifische Luftmenge bei den untersuchten Anlagen in dem üblichen Bereich von 0,03 bis 0,06 m³/s je m³ zu trocknendes Heu lag. (Bezogen auf die Anlagengrundfläche und eine Trocknungsschicht von 2 m sind dies die normalen Werte 0,06 bis 0,12 m³/s je m²).

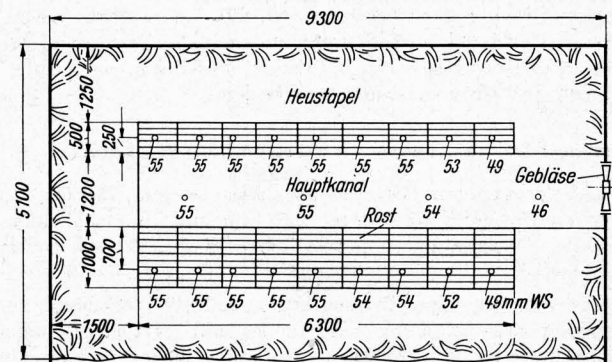


Bild 3. Verlauf des statischen Druckes im Hauptkanal und unter den Rosten bei einer Flachrostanlage mit drei festen Seitenwänden und einer freien Stapelseite. Luftverteilung durch Hauptkanal und Seitenroste.

Interessant waren die Hinweise aus der Praxis, daß der höchste Druckabfall an den Anlagen beobachtet wurde, solange noch keine Ziehstöpsel nachgezogen waren. Die Luftverteilung erfolgte in diesem Stadium allein durch Hauptkanal und Roste, d. h., bei einem eingewandeten Heustapel herrschte vorwiegend eine Parallelströmung im Gut vor, und zwar senkrecht zur Schichtung des Heues. Die Trocknungsluft mußte je nach Länge der Ziehstöpsel durch eine 1 bis 2 m dicke Heuschicht hindurchströmen. Wurden die Stöpsel mit zunehmender Füllhöhe hochgezogen, so konnte ein Absinken des statischen Druckes festgestellt werden.

Technische Daten:

Lüfter:	Luftmenge (ohne Diffusor) bei 60 mm WS Gesamtdruck	$V_{60} = 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$
Anlage:	Grundfläche	$F = 47,4 \text{ m}^2$
	Stapelhöhe	$H = 3,2 \text{ m}$
	spezifische Luftmenge im Betriebspunkt	$q = 0,116 \text{ m}^3/\text{s je m}^3$
	Feuchtegehalt der Trocknungsschicht	$U_1 \approx 50\%$

Bei der Besichtigung der ersten Anlagen im Frühjahr 1958 war, wie bereits erwähnt, die betont horizontale Schichtung des Heues aufgefallen. Im Verlauf von Lagerdichtmessungen im Winter 1959 wurde deshalb besonders auf den Aufbau der Schichtung geachtet. Hierbei zeigte sich, daß durch das Absetzen und Zusammenpressen des teilweise sehr feucht eingelagerten, blattreichen Futters sich plattenförmige Nester gebildet hatten. Da die meisten Blatteile in überwiegend horizontaler Schichtung eingelagert waren, ergab sich damit eine starke Drosselung der freien Durchtrittsfläche bei vertikaler Durchströmung. Aus diesen Beobachtungen und aus den Druckabfallmessungen an den Anlagen mit senkrechter Luftführung durch Ziehstöpsel durfte man schließen, daß je nach Durchströmrichtung unterschiedliche Druckverluste beim Belüften dieses blattreichen Mähweideheues auftreten. Frühere amerikanische Untersuchungen schienen dies zu bestätigen [7; 8]. Bickel kam bei seinen Untersuchungen zum gleichen Ergebnis [12]. Luftaustrittsmessungen an Heustapeln mit freien Seitenwänden, die ebenfalls 1958 im Allgäu durchgeführt wurden, bestätigten die vorgenannten Überlegungen. In **Bild 4** sind die Ergebnisse von Messungen der Luftaustrittsgeschwindigkeit an der freien Seite und der Oberfläche eines belüfteten Heustapels im Allgäu aufgetragen. Im vorliegenden Fall betrug die Stapelhöhe 5 m, wobei die Trocknung der unteren 3,5 bis 4 m bereits abgeschlossen war, als die letzte Schicht aufgebracht wurde. Aus der Höhe der Luftaustrittsgeschwindigkeit an der freien Seite und der Oberfläche des Stapels (es wurde jeweils die mittlere Luftaustrittsgeschwindigkeit der einzelnen Zonen aufgetragen) kann man ungefähr die Luftverluste abschätzen, die durch das ungenutzte Entweichen der Trocknungsluft durch bereits getrocknete Schichten eintreten. Die Luftverluste an der freien Seitenwand betragen

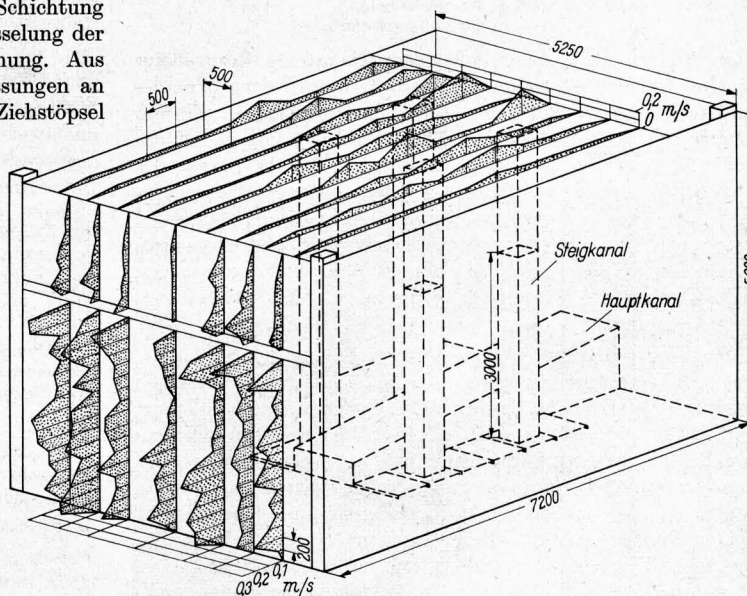


Bild 4. Messungen der Luftaustrittsgeschwindigkeit an der freien Seite und der Oberfläche einer beschickten Heubelüftungsanlage.

In den Steigkanälen sind die Stöpsel entfernt und die Kanäle mit Heu verschlossen. Die unteren 3 m der Kanäle sind frei.

bei dieser Anlage etwa 40 bis 50%. Unter ungünstigen Bedingungen können die Luftverluste an offenen Seitenwänden dazu führen, daß einzelne Schichten gar nicht oder nur unvollkommen belüftet werden und dadurch verschimmeln. So wurde beispielsweise im Winter 1958 bei der Besichtigung einer 8 m hoch beschickten Heubelüftungsanlage mit senkrechter Luftführung durch Ziehstöpsel und freien Seitenwänden festgestellt, daß die oberste 1 bis 2 m starke Schicht vollständig verschimmelt war. Für das Versagen der Anlage konnten folgende Ursachen genannt werden: Der höhere Strömungswiderstand der obersten, sehr feucht eingelagerten Schicht verminderte das geförderte Luftvolumen, gleichzeitig konnte die Luft über die Heukanäle durch die trocknen Schichten mit ihrem niedrigeren Strömungswiderstand und die freien Stapelseiten entweichen.

Die Druckverlust- und Luftaustrittsmessungen während der Heu- und Öhmernte 1958 hatten folgende Ergebnisse gebracht: An den Heubelüftungsanlagen im Allgäu wurden bei der Belüftung mit normalen spezifischen Luftmengen Werte für den statischen Druck im Hauptkanal und unter den Rosten bis zu 60 mm WS gemessen, die Lüfter mit einem Gesamtdruck bis zu 70 bis 80 mm WS erforderlich machen können, wenn eine gewisse Druckreserve vorhanden sein soll. Luftaustrittsmessungen an Heustapeln haben unter anderem die Vermutung bestätigt, daß das Heu je nach Durchströmrichtung einen unterschiedlichen Strömungswiderstand besitzt.

Druckabfallmessungen an blattreichem Wiesenheu

Ziel der weiteren Untersuchungen war es nun, die für den höheren Strömungswiderstand bzw. für das unterschiedliche Widerstandsverhalten verantwortlichen Einflußfaktoren zu bestimmen.

Für die folgenden Betrachtungen soll die Gleichung zur Ermittlung des Strömungswiderstandes halm- und blattförmiger Erntegüter von *Matthies* [10] als Grundlage dienen, und zwar in der Form:

$$\Delta p = C h \varrho_s^m \eta^{2-n} \varrho_L^{n-1} v_L^n$$

Es bedeuten:

Δp	mm WS	Strömungswiderstand der Schütttschicht
C	—	Stoffbeiwert
h	m	Stapelhöhe
ϱ_s	kg/m ³	Schüttdichte des Stapels
η	kps/m ²	dynamische Viskosität der Luft
ϱ_L	kg/m ³	Dichte der Luft
v_L	m/s	Geschwindigkeit der Luft
m	—	Exponent der Schüttdichte
n	—	Exponent der Luftgeschwindigkeit.

Im Stoffbeiwert C sollen außer dem Einfluß der Bezugslänge des Gutes wieder alle weiteren nicht bekannten Kenngrößen der Schüttung (wie Einfluß der Gutart, Gutzusammensetzung und Schüttstruktur) enthalten sein. Nach *Matthies* kann die Schüttdichte ϱ_s nur zum Vergleich verschieden dichter Stapel des gleichen Gutes verwandt werden. Ob es möglich ist, verschieden dichte Stapel von Gut ähnlicher Zusammensetzung zu vergleichen, muß die Auswertung der späteren Labormessungen zeigen. Der Exponent m ist in hohem Maß abhängig von den Eigenschaften des Erntegutes, während n sich nicht so sehr verändert.

Wie die ersten Messungen und Untersuchungen ergeben haben, weichen die Gutzusammensetzung, die Schüttstruktur und die Lagerdichte von den bis dahin im Schrifttum bekannten Werten ab. Im Winter 1958/59 wurden Schüttdichtebestimmungen an den Belüftungsanlagen durchgeführt, an denen während der Sommermonate Druckabfallmessungen vorgenommen worden waren. Hierbei sind beim Heu und Öhmd im Allgäu Schüttdichten von 140 bis 225 kg/m³ ermittelt worden. Die bisher bekannten Werte lagen zum Vergleich bei 80 bis 120 kg/m³ (in Ausnahmefällen bis 150 kg/m³) [10]. Bei diesen Messungen zeigte sich, daß die Lagerdichte sehr stark von der Gutzusammensetzung und vom Anfangsfeuchtegehalt abhängig ist. Junges, blattreiches Futter lagert dichter als altes stengeliges und überständiges Gut. Heu mit einem hohen Einlagerungsfeuchtegehalt ergibt eine höhere Schüttdichte als stark vorgetrocknetes Gut.

Ein Einfluß der Stapelhöhe auf die Lagerdichte konnte wegen der teilweise stark unterschiedlichen Gutzusammensetzung in den einzelnen Schichten nicht eindeutig ermittelt werden.

Die Ergebnisse der bisherigen Messungen gaben den Anlaß, eine Heuprobe (bestehend aus Mähweideheu, 1. Schnitt ungehäcksel) im Frühjahr 1959 aus einer Belüftungsanlage herauszuschneiden und den Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und der Schüttdichte zu bestimmen. Die etwa 2 m hohe Heuprobe, **Bild 5**, wurde hierzu mit einer rotierenden Schneideeinrichtung genau beschnitten und in einen runden Versuchsbehälter eingepaßt. An der beschnittenen Oberfläche der Probe ist die horizontale Schichtung des Gutes deutlich sichtbar. **Bild 6** zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsanlage. Bei den Druckabfallmessungen wurde die statische Druckverteilung am Behälterumfang mit Ringleitungen und zusätzlich mit einer Drucksonde über den Behälterquerschnitt in verschiedenen Guthöhen ermittelt. Die Lagerdichte der Heuprobe ist durch Pressen nachträglich gesteigert und die Schüttdichte um etwa 30 bis 40% erhöht worden. Für die

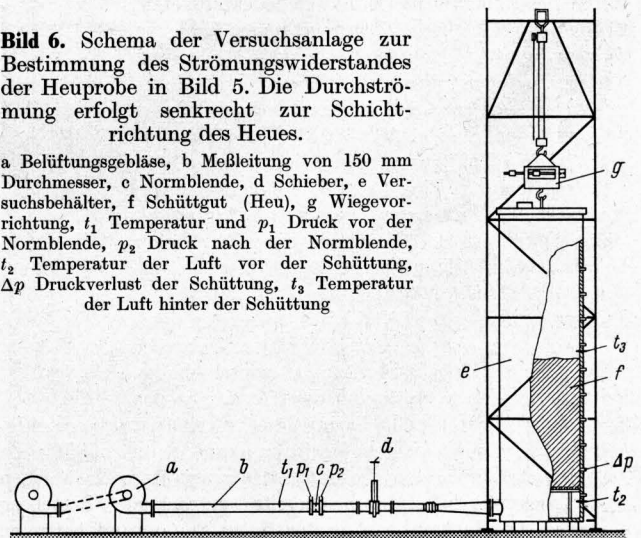


Bild 5. Beschnittene Probe aus Mähweideheu vor dem Einbringen in die Versuchsanlage nach Bild 6.

Mittlere Schüttdichte $\varrho_s = 140 \text{ kg/m}^3$

Bild 6. Schema der Versuchsanlage zur Bestimmung des Strömungswiderstandes der Heuprobe in Bild 5. Die Durchströmung erfolgt senkrecht zur Schichtungsrichtung des Heues.

a Belüftungsgebläse, b Meßleitung von 150 mm Durchmesser, c Normblende, d Schieber, e Versuchsbehälter, f Schüttgut (Heu), g Wiegevorrichtung, t_1 Temperatur und p_1 Druck vor der Normblende, p_2 Druck nach der Normblende, t_2 Temperatur der Luft vor der Schüttung, Δp Druckverlust der Schüttung, t_3 Temperatur der Luft hinter der Schüttung



Bestimmung des Strömungswiderstandes bei hohen Lagerdichten mußten zum Erzielen höherer Luftgeschwindigkeiten zwei Radialgebläse hintereinandergeschaltet werden (siehe Bild 6).

Die Ergebnisse der Druckabfallmessungen sind in logarithmischer Auftragung in **Bild 7** zusammengestellt. Es ist der bezogene Druckverlust $\Delta p/h$ für verschiedene Schüttdichten bei geringfügig veränderlichem Feuchtegehalt für vertikale Durchströmung (senkrecht zur Schichtrichtung des Heues) aufgetragen. Der Strömungswiderstand beim Belüften in der Horizontalen, parallel zur Schichtung des Heues, konnte mit dieser Versuchsanlage nicht durchgeführt werden.

Die ersten Messungen bestätigten die Ergebnisse der Untersuchungen an den Anlagen in der Praxis. Der Strömungswiderstand erreichte bei den in Heubelüftungsanlagen vorkommenden Luftgeschwindigkeiten sehr hohe Werte, so beträgt beispielsweise der Druckverlust je m Stapelhöhe bei einer Luftgeschwindigkeit v_L von 0,1 m/s und einer Schüttdichte $\rho_s = 140 \text{ kg/m}^3$ $\Delta p = 45 \text{ mm WS}$. Die Bestimmung der botanischen Zusammensetzung der untersuchten Probe aus dem Allgäu brachte ungefähr folgendes Ergebnis: 40 bis 50% Obergräser, 30 bis 20% Untergräser, 20% Klee und 10% Kräuter. Bei der untersuchten Heuprobe handelte es sich also um ein blattreiches Futter.

Die Art, Zusammensetzung, Beschaffenheit und der Zustand des Gutes waren eine der Ursachen für den hohen Druckverlust. Der Exponent n der Luftgeschwindigkeit, dargestellt durch die Neigung der Widerstandskurven in Bild 7 wird durch die vorgenannten Kennwerte mit beeinflußt. Die Kurven sind ab einer Luftgeschwindigkeit von 0,07 m/s Geraden. Die Gleichung der Widerstandslinien lautet in allgemeiner Form $\Delta p = C_1 h v_L^n$ und der Richtungsfaktor n beträgt hier 1,43. Der Strömungswiderstand von halm- und blattförmigen Erntegütern ist jedoch in stärkerem Maß von der Lagerdichte abhängig. In **Bild 8** wurde im doppeltlogarithmischen Netz der Druckverlust $\Delta p/h$ über der mittleren Lagerdichte für $v_L = \text{const}$ aufgetragen. Es ergaben sich wiederum Geraden, und die Gleichung der Widerstandslinien kann in der Form geschrieben werden $\Delta p = C_2 h \rho_s^m$. Die höhere Lagerdichte wurde beim gleichen Gut durch Zusammenpressen der Heuprobe von $\rho_s = 140 \text{ kg/m}^3$ auf $\rho_s = 170 \text{ kg/m}^3$ erzeugt. Aus dem Diagramm in Bild 8 kann der Exponent m der Schüttdichte als Neigung der Geraden ermittelt werden. Es ergab sich der sehr hohe Wert von $m = 4,05$. *Matthies* [10] fand bei seinen Untersuchungen mit Luzerneheu folgende Werte für den Exponenten $n = 1,60$ und $1,54$; für $m = 2,40$ und $2,74$. Eine Steigerung der Lagerdichte wirkt sich bei blattreichem Wiesenheu demnach sehr viel stärker auf den Strömungswiderstand aus im Vergleich zu Luzerneheu.

Die Ergebnisse dieser Druckabfallmessungen, in Verbindung mit den Druckverlustmessungen an Anlagen, berechtigen zu folgenden Überlegungen: Für die Heubelüftungsanlagen im süddeutschen Grünlandgürtel mit seinen Mähweidebetrieben sind für die Belüftung des dort anfallenden, blattreichen Futters Lüfter mit höherer Druckleistung erforderlich. Dieses Ergebnis wurde bereits vor Jahren der DLG und den verantwortlichen Stellen im BML mitgeteilt, damit die Anerkennung und Bezuschussung von Lüftern mit hoher Druckleistung, wie sie für die Belüftungsanlagen in den Mähweidebetrieben des süddeutschen Graslandgürtels erforderlich sind, ohne Einschränkung durchgeführt werden konnten. Ferner wurde mit Herstellerfirmen von Axiallüftern über die Probleme gesprochen, die sich aus den Meßergebnissen für die Lüfterkonstruktion und für die Gestaltung der Anlagen ergeben. Da die Frage nach dem Strömungswiderstand bei der Belüftung in Schichtrichtung, die durch die Ergebnisse der Luftaustrittsmessungen an freien Stapelseiten gestellt wurde, nach diesen Messungen zunächst nicht beantwortet werden konnte, sind im Lauf der letzten Jahre weitere Untersuchungen an Heuproben durchgeführt worden. Über Ergebnisse dieser erweiterten Versuche soll nachfolgend berichtet werden.

Aufgrund der bei den ersten Druckverlustmessungen an Heuproben gemachten Erfahrungen wurde eine Versuchsanlage entworfen, die Druckabfallmessungen bei der Durchströmung,

sowohl senkrecht zur Schichtung des Gutes als auch parallel dazu, ermöglichen.

Bild 9 zeigt diese Anlage mit der erforderlichen Meßleitung, dem Druckraum und dem Aufnahmebehälter für die Heuprobe (links im Bild). Die Proben wurden wiederum aus Heubelüftungsanlagen im Allgäu herausgeschnitten. Hierbei sind Proben vom ersten bzw. zweiten und dritten Schnitt Mähweideheu entnommen und durchgemessen worden. Das Gut war mit dem Feldhäcksler geerntet worden. Für die Messungen mußten die

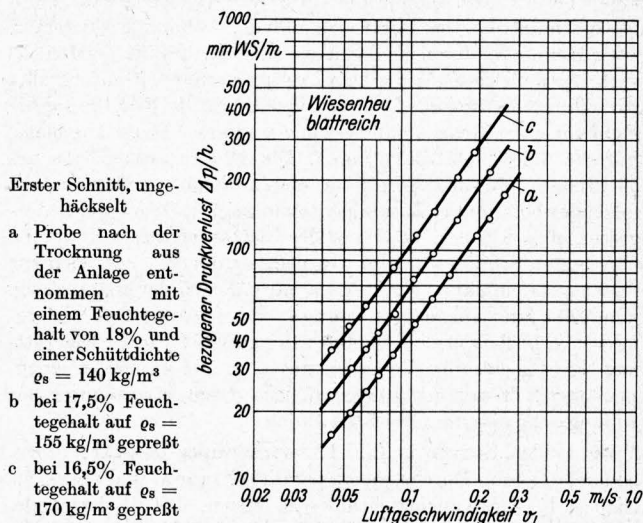


Bild 7. Druckverlust von blattreichem, dichtlagerndem Wiesenheu aus dem Allgäu in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit.

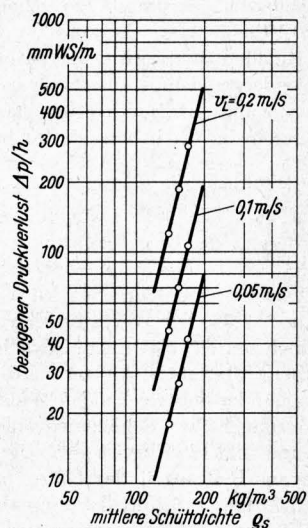


Bild 8. Druckverlust von blattreichem Wiesenheu in Abhängigkeit von der Schüttdichte bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten.

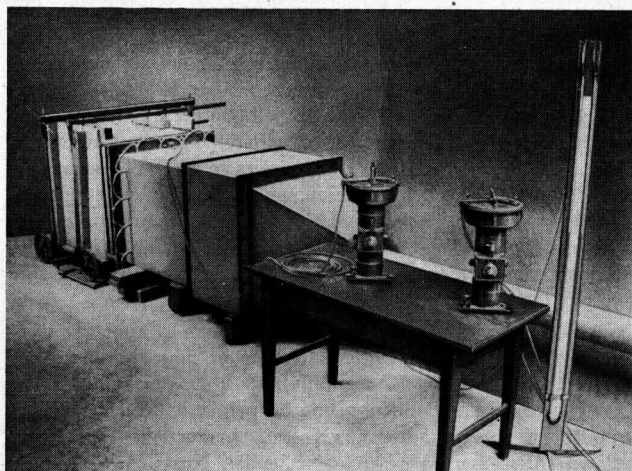


Bild 9. Ansicht der Versuchsanlage zur Ermittlung des Strömungswiderstandes senkrecht und parallel zur Schichtrichtung des Heues.

Proben zunächst wieder mit einer besonders entwickelten Beschneidevorrichtung, **Bild 10**, auf das gewünschte Maß — in unserem Fall ein Würfel mit 80 cm Kantenlänge — gebracht werden. Die Probe wurde allseitig von einem Gitter umfaßt, **Bild 11**, so daß sie in jeder gewünschten Lage in den Versuchbehälter gebracht werden konnte, ohne daß sich die Struktur veränderte. Auf diese Weise war es möglich, den Strömungswiderstand für jede Durchströmrichtung zu bestimmen. Bei den Messungen mit der neuen Versuchsanlage wurde der Druckabfall bei der Anströmung des Gutes von verschiedenen Seiten her bestimmt. Hierbei zeigte sich, daß der Strömungswiderstand einer Heuprobe hinreichend genau erfaßt wird, wenn der Druckverlust jeweils einmal beim Durchströmen senkrecht und parallel zur Schichtrichtung des Heues ermittelt wird. In **Bild 12** sind die Ergebnisse der Druckabfallmessungen an einer Probe aus blattreichem Wiesenheu aufgetragen. Die Probe bestand aus gehäckseltem Mähweideheu vom ersten Schnitt mit ungefähr folgender botanischer Zusammensetzung: 56% Ober- und Untergräser, 40% Kräuter, 4% Klee. Der Blattanteil dieser Heuprobe vom ersten Schnitt war also wesentlich größer im Vergleich zur Probe aus dem Jahr 1959. Ferner war das Heu der ersten Probe von 1959 lang eingelagert worden, während das Gut der gemessenen Probe mit dem Feldhäcksler geerntet wurde. Die mittlere Schüttdichte des Heues betrug $\rho_s = 134 \text{ kg/m}^3$ bei einem Feuchtegehalt von rd. 10% und liegt damit etwas unter der Anfangsschüttdichte der ersten Probe.

Die beiden Kurven in **Bild 12** kennzeichnen den Strömungswiderstand beim Durchströmen parallel (Kurve a) und senkrecht (Kurve b) zur Schichtrichtung des Heues. Die Widerstandslinien in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei konstanter Schüttdichte verlaufen im logarithmischen Netz nahezu parallel. Im unteren Geschwindigkeitsbereich sind die Kurven schwach gekrümmt. Sie gehen bei Luftgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,2 m/s langsam in Geraden über. Die Neigung der Geraden ist jedoch etwas unterschiedlich, und zwar verläuft die Widerstandslinie für die Durchströmung parallel zur Schichtrichtung des Heues etwas flacher. Der Exponent n der Luftgeschwindigkeit beträgt (für höhere Luftgeschwindigkeiten) bei Durchströmung parallel zur Schichtrichtung (Kurve a) $n = 1,38$ und beim Belüften senkrecht zur Schichtrichtung (Kurve b) $n = 1,45$. Zieht man Ersatzgeraden im technisch wichtigen Bereich der Luftgeschwindigkeiten zwischen $v_L = 0,05 \text{ m/s}$ und $v_L = 0,25 \text{ m/s}$, so ergeben sich folgende Neigungen der Ersatzgeraden: Für Kurve a wird $n = 1,26$, und für Kurve b beträgt $n = 1,33$. Die Werte für den Exponenten n bestätigen, daß es sich um ein blattreiches Gut handelt, da dieser mit zunehmendem Blattanteil kleiner wird [10]. Vergleicht man ferner die einander entsprechenden Widerstandslinien bei Durchströmung senkrecht zur Schichtrichtung des Heues in **Bild 7** (Kurve a) und **Bild 12** (Kurve b), so zeigt sich, daß der Druckverlust stark vom Blattanteil des Gutes beeinflusst wird. Trotz der etwas niedrigeren Schüttdichte ergab sich bei der Kurve b in **Bild 12** ein höherer Druckverlust, und zwar aufgrund des höheren Blattanteils, wie die botanische Zusammensetzung der beiden Proben leicht erkennen läßt. Für die Praxis wichtig sind die Schlußfolgerungen, die aus den Druckabfallmessungen an Heuproben gezogen werden können. Die Messungen haben folgendes gezeigt: Der Strömungswiderstand je m Stapelhöhe bei dichtlagerndem, blattreichem Heu wird im normalen Bereich der Luftgeschwindigkeiten ($v_L = 0,06 \dots 0,12 \text{ m/s}$) bereits so groß, daß schon bei Stapelhöhen über 1 ... 2 m eine senkrechte Luftführung notwendig wird. Dies ist insbesondere der Fall, wenn durch einen höheren Einlagerungsfeuchtegehalt höhere Schüttdichten zu erwarten sind und eine luftdichte Einwandung die Luft zum senkrechten Durchströmen des Stapels zwingt.

Der Einbau von senkrechten Luftführungen ist auch aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich. Verfügt man durch speziell ausgelegte Lüfter (z. B. Radiallüfter) über die erforderliche Druckleistung zur Belüftung von Stapeln mit 3 bis 4 m Höhe vom Rost aus, so muß doch aus Kostengründen darauf verzichtet werden. Aus einem Vergleich der beiden Kurven a und b in **Bild 12** geht außerdem hervor, daß der Druckverlust beim Durchströmen senkrecht zur Schicht das 2,2- bis 2,6fache des Druckverlustes bei der Belüftung parallel zur Schichtrichtung erreicht.

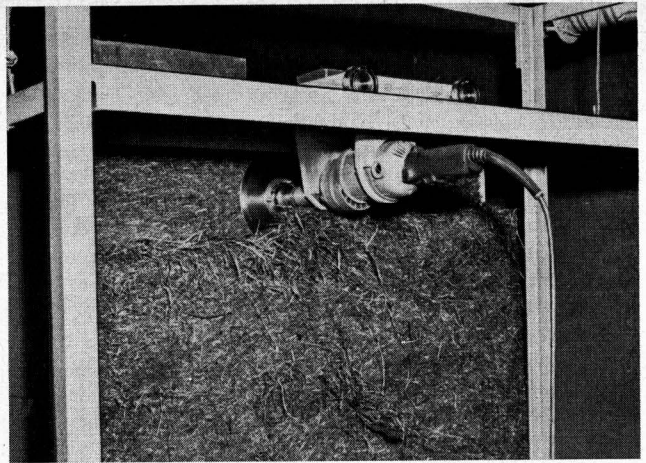


Bild 10. Ansicht der Beschneidevorrichtung zum genauen Beschneiden der Heuprobe.

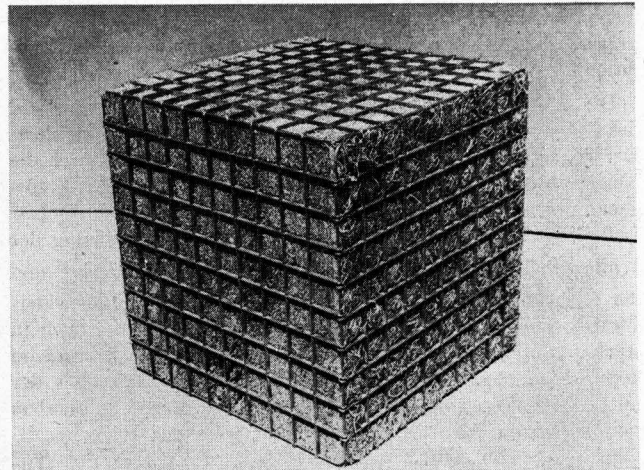


Bild 11. Auf Maß beschnittene Heuprobe mit der erforderlichen Eingitterung zum Erhalten der Schichtstruktur.

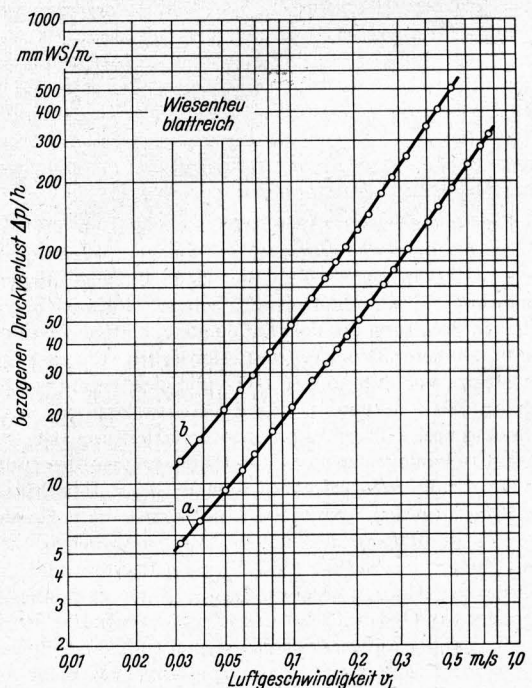


Bild 12. Druckverlust von dichtlagerndem Mähweideheu in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit v_L , bei der Durchströmung senkrecht und parallel zur Schichtung des Heues (Feuchtegehalt $\approx 10\%$, Schüttdichte $\rho_s = 134 \text{ kg/m}^3$).

- a Verlauf der Widerstandskurve bei Durchströmung parallel zur Schichtrichtung
- b Verlauf der Widerstandskurve bei Durchströmung senkrecht zur Schichtrichtung des Heues

Auswirkung der Untersuchungen

Die bisherigen Ausführungen erstreckten sich zunächst auf Druckabfallmessungen an Belüftungsanlagen und auf Druckverlustmessungen an bereits trockenen Heuproben. Hierbei konnte ein Einfluß von Gutart, Gutzusammensetzung und der Lagerdichte (Schüttgewicht) auf den Strömungswiderstand von blattreichem Wiesenheu (Mähweideheu) festgestellt werden. Für die Berechnung der erforderlichen Druckleistung von Lüftern für Heubelüftungsanlagen fehlen noch Hinweise über weitere, den Strömungswiderstand beeinflussende Faktoren. Amerikanische Untersuchungen [13] ergaben beispielsweise bei gleicher Schüttdichte und Feuchtegehalt des Gutes einen höheren Druckverlust bei geknicktem Luzerneheu im Vergleich zu ungeknicktem Gut. Der Unterschied war jedoch sehr gering. Ebenso wurde der Einfluß der Gutlänge — ob Häcksel- oder Langheu — untersucht. Hierbei ergab sich (ebenfalls bei konstanter Schüttdichte und Feuchtegehalt) für das gehäckselte Luzerneheu ein größerer Strömungswiderstand im Vergleich zu ungehäckseltem Gut. Dieser Einfluß machte sich auch bei unseren Messungen bemerkbar. Während die erste Probe aus dem Jahr 1958 aus langem Mähweideheu bestand, war das Gut der später durchgemessenen Proben mit dem Feldhäckseler gerentet worden.

Der Strömungswiderstand von Heu wird ferner in starkem Maße vom Feuchtegehalt des Gutes beeinflusst. Während des Trocknungsvorganges in einer Belüftungsanlage läuft vor allem in den ersten Tagen nach der Einlagerung, je nach Feuchtegehalt des Gutes, ein gewisser Setzprozeß ab, d. h., die Lagerdichte und damit der Trockensubstanzgehalt je Volumeneinheit wird erhöht. Der Strömungswiderstand müßte also ansteigen. Gleichzeitig erfolgt jedoch in der Trocknungszone durch den Feuchteentzug ein Schrumpfen des Gutes, d. h., die Hohlräume werden größer und der Strömungswiderstand nimmt ab [13]. Bei Trocknungsversuchen im Institut für Landtechnik Hohenheim, über die an anderer Stelle berichtet werden soll, wurden die vorstehenden Überlegungen bestätigt.

Welche Folgerungen ergeben sich nun aus den bisher dargestellten Untersuchungen für die Auslegung von Belüftungsanlagen und für die Gestaltung der Kennlinien von Axiallüftern? Zunächst ergeben sich bestimmte Forderungen an die Luftführung und -verteilung im Stapel. Zur Vermeidung seitlicher Luftverluste sind wegen des unterschiedlichen Widerstandsverhaltens vier luftdichte Seitenwände bei den Anlagen erforderlich. Der Druckverlust nimmt beim Belüften von blattreichem, dichtlagerndem Heu senkrecht zur Schichtebene schon bei Stapelhöhen von 1 bis 2 m sehr hohe Werte an. Es werden dadurch senkrechte Luftverteileranrichtungen notwendig. Gute Erfahrungen wurden bei Belüftungsversuchen im Allgäu mit folgender Anlagenbauart gemacht: Flachrostanlage mit luftdichten Seitenwänden (in den Ecken abgerundet) und Ziehstöpseln mit großem Durchmesser zum Erzielen großer Vertikalkanäle im Heu. Der Rost wurde hochgelegt und der Hauptkanal niedrig gehalten, damit der Höhenunterschied Hauptkanal—Rost möglichst klein wird. Bei erdlastiger Heulagerung sollte der Hauptkanal so tief gelegt werden, daß für die Anlage eine ebene Rostfläche entsteht. Schwierigkeiten durch eine ungleichmäßige Trocknung des Gutes über dem Hauptkanal und dem Rost sind damit ausgeschaltet.

Die Belüftung dieses blattreichen Mähweideheues stellt aber nicht nur an die Anlagenausführung erhöhte Anforderungen, sondern auch an die Lüfter. **Bild 13** veranschaulicht den Einfluß einer Erhöhung des Strömungswiderstandes auf die Fördermenge zweier Lüfter mit verschiedener Kennlinie. Lüfter A ist ausgelegt für niedere Drücke, Lüfter B für hohe Druckleistung. Die eingetragenen Widerstandslinien sind Kurven gleichen Wider-

standes für eine Anlage, die im Fall der unteren Linie mit grobstengeligen Heu bei niedriger Schüttdichte gefüllt ist. Die obere Widerstandslinie kennzeichnet die Verhältnisse, wie sie sich bei der Belüftungstrocknung von blattreichem Wiesenheu (beispielsweise in Mähweidebetrieben) ergeben. Die Widerstandslinie ist an Versuchsanlagen im Allgäu ermittelt worden. Für eine gute Trocknungsleistung der Anlage sind Schwankungen in der Fördermenge, aufgrund von Veränderungen im Strömungswiderstand, so klein wie möglich zu halten. Die steilere Kennlinie des Lüfters B erfüllt diese Forderung am besten. Bei der Kennlinie des Lüfters A ergeben dagegen schon kleinere Veränderungen des Strömungswiderstandes beträchtliche Schwankungen in der Fördermenge. Der Lüfter A ist also für Anlagen zur Trocknung von blattreichem Wiesenheu nicht geeignet.

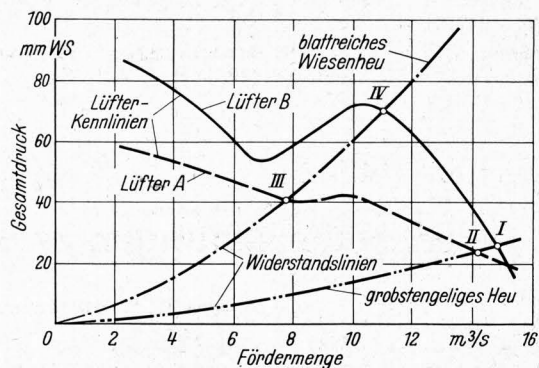


Bild 13. Abhängigkeit der Fördermenge zweier Lüfter vom Kennlinienverlauf und vom Strömungswiderstand des Trocknungsgutes.

Zur Erleichterung der Lüfterauswahl wurde von Segler [14] eine systematische Einteilung der Heubelüftungsanlagen in drei Kategorien durchgeführt (siehe **Tafel 1**). Diese Einteilung erfolgt nach der geforderten Trocknungsleistung und den daraus resultierenden Anlagenkennwerten für die Auswahl des Lüfters.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Die Druckabfallmessungen an Heubelüftungsanlagen im Allgäu haben gezeigt, daß dort ein höherer Strömungswiderstand beim Belüften dieses blattreichen, dichtlagernden Mähweideheues auftritt. Durch Druckverlustmessungen an Heuproben wurden diese Beobachtungen bestätigt. Die Druckverluste lagen wesentlich über den bei früheren deutschen und amerikanischen Untersuchungen ermittelten Werten. Anlagen zur Trocknung von blattreichem Mähweideheu stellen besondere Anforderungen an die Luftverteileranrichtungen und an den Lüfter. Für Anlagen mit hohen Anforderungen an die Trocknungsleistung konnten durch die Verbesserung der Luftführung die Trocknungskosten in wirtschaftlichen Grenzen gehalten werden.

Tafel 1. Richtlinien für die Anlagenplanung bei verschiedenem Anfangsfeuchtegehalt des eingelagerten Heues nach Segler [14].

Anlagenart Kategorie	Anfangs- feuchte- gehalt %	Spezifische Luftmenge*)		Lüfter	
		m ³ /s je m ³ Heu	m ³ /s je m ² Belüftungsfläche		
I	unter 35	unter 0,03	unter 0,06	Axial- und Radial- lüfter mit geringe- rer Luftleistung und niedrigerem Leistungsbedarf	geeignet für Klein- anlagen und geringe Ansprüche an die Trocknungs- leistung
II	35 bis 45	0,03 bis 0,06	0,06 bis 0,12	normaler Axiallüf- ter bis zu 40 mm WS Gesamtdruck	heute vorwiegend eingebaute Anla- genart für normale Ansprüche an die Trocknungsleistung
III	45 bis 60	über 0,06 bis 0,09	über 0,12 bis 0,18	verstärkter Lüfter mit größerer Luft- und Druckleistung bis zu 80 mm WS Gesamtdruck	Anlagen für höhere Ansprüche an die Trocknungsleistung

*) bei einer Trocknungsschicht von 2 m

Schrifttum

- [1] Segler, G., H. J. Matthies und G. Birk: Entwicklung und Erprobung von Heubelüftungsanlagen. Ber. über Landtechn. Bd. 28. Wolftratshausen: Verlag Neureuter 1952.
- [2] Guillon, R.: Forced air flow in drying hay. Agric. Engng. **27** (1946) H. 11, S. 519/20.
- [3] Hendrix, A. T.: Resistance of hay to air flow. Agric. Engng. **26** (1945) H. 9, S. 369/71.
- [4] Hendrix, A. T.: Observations on the resistance of hay to air flow. Agric. Engng. **27** (1946) H. 5, S. 209/12.
- [5] Davis, R. B. jr.: Mow-drying chopped and long alfalfa hay. Agric. Engng. **28** (1947) H. 3, S. 105/08.
- [6] Bruhn, H. D.: Flow of air through chopped hay in mow driers. Agric. Engng. **28** (1947) H. 5, S. 202/04, 207.
- [7] Hendrix, A. T.: Air flow through baled hay. Agric. Engng. **28** (1947) H. 6, S. 259/60.
- [8] Davis, R. B. jr., und V. H. Baker: Fundamentals of drying baled hay. Agric. Engng. **32** (1951) H. 1, S. 21/25.
- [9] Davis, R. B. jr., und V. H. Baker: The resistance of long and chopped hay to air flow. Agric. Engng. **32** (1951) H. 2, S. 92/94, 100.
- [10] Matthies, H. J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. Diss. TH Braunschweig 1954. VDI-Forsch.-heft 454. Düsseldorf: VDI-Verlag 1956.
- [11] Anleitung zum Bau und Betrieb von Heubelüftungsanlagen. Aus den Arb. des Instituts für Landmaschinen der TH Braunschweig 1957.
- [12] Bickel, H.: Untersuchungen über die Wirksamkeit verschiedenartiger Heubelüftungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Strömungswiderstandes. Diss. ETH Zürich 1964.
- [13] Le Roy Day, C.: Effects of conditioning and other factors on resistance of hay to air flow. Transactions ASAE **6** (1963), S. 199/201.
- [14] Segler, G.: Fortschritte bei der Heubelüftung. Dt. Landw. Presse **85** (1962) Nr. 29 und 30, S. 301/302, 309/10.

DK 62.001/002

Wechselbeziehungen zwischen Konstruktion und Versuch

Von Gerd W. H. Bolten und Gerhard Welschof, Neuß am Rhein¹⁾

Die von der Firmenleitung im Hinblick auf die Marktlage gestellte Entwicklungsaufgabe ist verbindlich für das Entwicklungs-Komitee, das in seinem an die Leitung von Versuch und Konstruktion zu gebenden Auftrag klar abgegrenzte Informationen zu vermitteln hat. Diese müssen alle wichtigen technischen und organisatorischen Faktoren enthalten. Eine optimale Abstimmung der schöpferischen Ideen auf die Entwicklungszeit und -kosten ist das vordringliche organisatorische Anliegen der Leitung von Versuch und Konstruktion. Dabei ist auf eine zweckmäßige Gliederung der Entwicklungsabteilung nach Projekten und Funktionen zu achten. Um die gestellte Aufgabe entsprechend dem Zeitplan lösen zu können, empfiehlt sich eine Aufteilung der gesamten Entwicklung in einzelne Phasen. Die in ständiger Auswertung der Versuchsergebnisse von der Konstruktion erstellten Fertigungsunterlagen sind von dieser eigenverantwortlich freizugeben.

Die Terminologie liefert mehr oder minder klare Definitionen für die Begriffe Konstruktion und Versuch. Im allgemeinen Sprachgebrauch, ja selbst in der Umgangssprache der Ingenieure, ist eine scharfe Trennung oftmals jedoch nicht gegeben, vor allem dann nicht, wenn der Terminus Entwicklung noch hinzukommt. Das mag daran liegen, daß die Begriffe Entwicklung, Konstruktion und Versuch eng miteinander verbunden sind, ineinander übergehen und eine strenge Trennung früher nicht üblich beziehungsweise notwendig war. Es lag eben alles in einer Hand. Heute ist eine Aufgabenteilung zwischen Konstruktion und Versuch in der Industrie üblich. Um die Wechselbeziehung zwischen Konstruktion und Versuch darzulegen, sei zuvor möglichst klar abgegrenzt, welche Beziehungen unter bestimmten Voraussetzungen gemeint sind. Die Zusammenhänge werden damit präzisiert und einfacher darstellbar.

1. Vom Entwicklungsauftrag bis zur Produktionsfreigabe

1.1 Produktwert — Absatzchancen

Die Industrie erzeugt Güter. Sie tut es, um in der Jahresabschlußbilanz einen Gewinn auszuweisen. Auch wenn oftmals

¹⁾ Vorgetragen auf der 23. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 13. Oktober 1965.

Dipl.-Ing. Gerd W. H. Bolten ist Chefingenieur der Motorenkonstruktion und stellvertretender Direktor der Entwicklung der International Harvester Company m.b.H., Neuß am Rhein; Dr.-Ing. Gerhard Welschof ist Chefingenieur für den Versuch in derselben Firma.

andere Formulierungen gebraucht werden, so münden doch auch diese irgendwie ein in den Verkaufsslogan: Ohne Gewinn hat Umsatz keinen Sinn. Darunter sei keineswegs ein skrupelloses Gewinnstreben verstanden. Die Industrie wie auch der handwerklich arbeitende Kleinbetrieb versuchen, ein Qualitätserzeugnis zu einem angemessenen Preis auf den Markt zu bringen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird entwickelt und produziert. Der Erfolg der Bemühungen läßt sich ausdrücken durch den Wert des fertigen Produktes. Der Begriff „Wert“ wird hier als Erfolgsmaßstab für die Absatzchancen verwendet.

In Bild 1 sind die darzulegenden Zusammenhänge vereinfacht dargestellt. Es wird dabei vorausgesetzt, daß ein Markt für das zu entwickelnde Produkt vorhanden ist. Verkauft wird die „Funktion“ in einer guten Verpackung zu einem kostengerechten

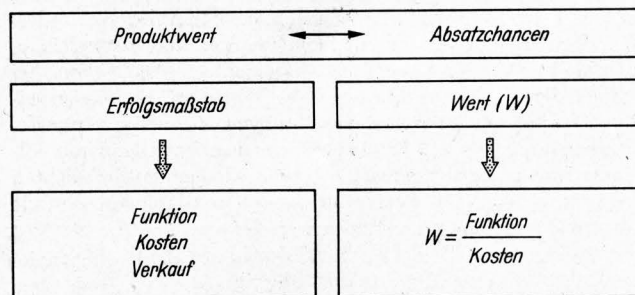


Bild 1. Zusammenhang zwischen Produktwert und Absatzchancen.

Preis. Es besteht eine direkte Beziehung zwischen dem Produktwert und den Absatzchancen. Als Erfolgsmaßstab für die Absatzchancen sind drei Faktoren zu nennen: Funktion, Kosten und Verkauf. Obwohl der Wert des Produktes — wie auf der rechten Seite des Bildes 1 dargestellt ist — als Quotient von Funktion und Kosten definiert werden kann, ist in bezug auf den Erfolg der Verkauf zu berücksichtigen. Selbst dann, wenn ein Markt für das hergestellte Produkt vorhanden ist, ist dies nicht ohne eine Verkaufsorganisation abzusetzen. Auch muß die durch die Verkaufsabteilung zu bestimmende Stückzahl der Entwicklung zugrunde gelegt werden.

Unter der Voraussetzung, daß der Entwicklungsauftrag die geforderten Funktionen festlegt, können durch die Entwicklung vornehmlich die Kosten beeinflusst werden. Aus dem Gesagten folgt:

Der Entwicklungsauftrag beinhaltet unter anderem bindende Funktionsmerkmale. Die Entwicklung beeinflusst mittelbar durch