

Eintägiges Vorwelkheu durch höhere Luftvorwärmung

Karl Blümel, Reiner Koschatzky und Karl Maurer

Lehrstuhl für Landtechnik, Stuttgart-Hohenheim

1. Aufgabenstellung

Die Gewinnung von Belüftungsheu hoher Qualität ist besonders für die Betriebe des süddeutschen Grünlandgürtels von entscheidender Bedeutung, da sie wegen der bestehenden Auflagen seitens der Milchverwertung auf das Füttern von Gärfutter verzichten müssen. Als Folge und zugleich als Nachteil der begrenzten Trocknungsleistung der meisten bislang in Betrieb befindlichen Belüftungsanlagen ist die im allgemeinen zweitägige Vortrocknung auf dem Felde anzusehen. Sehr hohe Niederschläge und das gleichzeitige Ansteigen der Lufttemperaturen führen in Verbindung mit zunehmender Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung zu besonderer Wuchsfreudigkeit und zu hohen Flächenerträgen des ersten Schnittes, der schon Ende April, Anfang Mai erfolgt.

Auf Grund der für das Alpenvorland spezifischen Witterungsverhältnisse mußten einzelne Schönwettertage während der Hauptniederschlagszeit im Mai und Juni für die Rauhfutterbereitung ungenutzt bleiben. Dadurch kann der optimale Schnittzeitpunkt nicht immer wahrgenommen werden. Qualitätseinbußen des Belüftungsheus ließen sich nicht vermeiden. Daher war man bestrebt, die Belüftungsanlagen trocknungstechnisch so zu verbessern, daß man das Gut mit der gleichen zulässigen Feuchte wie bei der Welksilagebereitung einbringen, das heißt am gleichen Tage mähen und einlagern kann. Während einer Vortrocknungsdauer von annähernd acht bis zehn Stunden wird das Gut auf dem Felde entsprechend den jeweiligen Witterungsverhältnissen auf einen Wassergehalt von ungefähr 65 bis 50 % heruntergetrocknet.

Bislang wurden bei der Welkheutrocknung mit Kaltluft vorwiegend Axiallüfter mit einer Druckleistung von etwa 70 bis 80 mmWS Gesamtdruck im stabilen Kennlinienbereich eingesetzt [1]. Bei derartigen Anlagen sollte die Stärke der jeweiligen Einlagerungsschicht nicht über 0,4 bis 0,5 m liegen. Teilweise müssen bei großen Heustockhöhen und extrem dicht lagerndem Welkgut zusätzlich Ziehstöpsel verwendet werden. Die Belüftungsanlagen sind dann so zu dimensionieren, daß der zur Welkheutrocknung erforderliche Minimalwert der spezifischen Luftmenge von ungefähr 0,1 bis 0,15 m³/s je m² Heustockgrundfläche gewährleistet ist. Die Welkheutrocknung mit Kaltluft setzt also geringe tägliche Einlagerungsmengen voraus, so daß dieses Verfahren nicht für alle Betriebsgrößen geeignet ist.

Auf Grund der genannten Leistungsdaten der Lüfter und der bekannten Feuchtegleichgewichtskurven von Wiesengras [2] sind der Welkheubelüftung mit atmosphärischer Kaltluft Grenzen gesetzt. Bei ungünstigen Witterungsverhältnissen ist eine ausreichend schnelle Trocknung des mit hoher Anfangsfeuchte eingelagerten Gutes nur noch unter zusätzlicher Verwendung von Luftvorwärmgeräten sichergestellt. Bei hohen Einlagerungsfeuchten müssen aus dem dicht lagernden Halmgut mit hohem Strömungswiderstand sehr große Wassermengen abgeführt werden. Die auftretenden Raumgewichte können, besonders im unteren Bereich des Heustapels, infolge der darüber lagernden Schichten bis zu 240 kp/m³ erreichen [3]. Daher ist es zweckmäßig, wenn die Welkheu-Belüftungsanlagen künftig Gebläse mit höherer Luft- und Druckleistung als bisher erhalten. Weiterhin ist durch Luftvorwärmung eine Erhöhung der Trocknungsleistung zu erreichen, da die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft entsprechend ihrer Erwärmung zunimmt.

Will der Landwirt die volle Werbe- und Bergeleistung, die ihm heute durch den Einsatz moderner Erntemaschinen zur Verfügung steht, ausnutzen und zum andern das Wetterrisiko, die Substanz- und Nährstoffverluste auf ein Minimum reduzieren, so ist dies nur durch eine erhebliche Steigerung der Trocknungsleistung dieser Welkheu-Belüftungsanlagen und der damit verbundenen Verkürzung der Gesamttrocknungsdauer möglich. Deshalb sind im Anschluß an die Untersuchungen zur Welkheutrocknung mit Kaltluft [3] vom Lehrstuhl für Landtechnik in Stuttgart-Hohenheim im Sommer 1970 Heutrocknungsversuche mit hohen spezifischen Luftmengen und Luftvorwärmung durchgeführt worden¹⁾.

2. Versuchsaufbau und -durchführung

Die zur Durchführung der Trocknungsversuche in Hohenheim errichtete Belüftungsanlage wurde mit einem Flachrost ohne Hauptkanal und luftdichten Seitenwänden ausgestattet. Die Grundfläche der Anlage betrug 70,5 m². Der Lattenrost war 0,60 m über dem Boden angebracht. Für die Trocknungsversuche ist in der Institutswerkstatt ein Verbrennungsmotor-Lüfter-Aggregat²⁾ zusammgebaut worden (Bild 1). Der Antrieb des Axiallüfters mit einem druckseitig angeordneten Leitapparat erfolgte direkt durch einen luftgekühlten Vierzylinder-Dieselmotor mit einer maximalen Leistung von 44 kW (60 PS). Um die Verlustwärme des Motors (frei werdende Kühlungs- und Abgaswärme) für die Halmgut-trocknung ausnutzen zu können, wurde das Motor-Lüfteraggregat mit einer äußeren Verkleidung umgeben, so daß die vom Lüfter angesaugte Luft zwangsweise den Motor umströmte und sich dabei erwärmte. Zur besseren Ausnutzung der Abgaswärme für die Vorwärmung der Trocknungsluft bildete man den Auspuff als Wärmetauscher in Form eines Rohrsystems aus. Es konnte eine Gesamtluftvorwärmung erzielt werden, die je nach Fördervolumen des Gebläses bis zu 4 °C betrug. Das verlängerte Auspuffende lag außerhalb des Lüfteransaugbereiches. Zur wirkungsvollen Lärmdämpfung umgab man den Motorraum mit Strohballen und einer 0,30 m starken Mauer aus Beton-Formsteinen.

Eine möglichst gleichmäßige Luft- und Druckverteilung muß bei Welkheu-Belüftungsanlagen gefordert werden. Daher wurde zwischen Belüftungsaggregat und Trocknungsanlage ein 4 m langes, diffusorartig ausgebildetes Übergangsstück

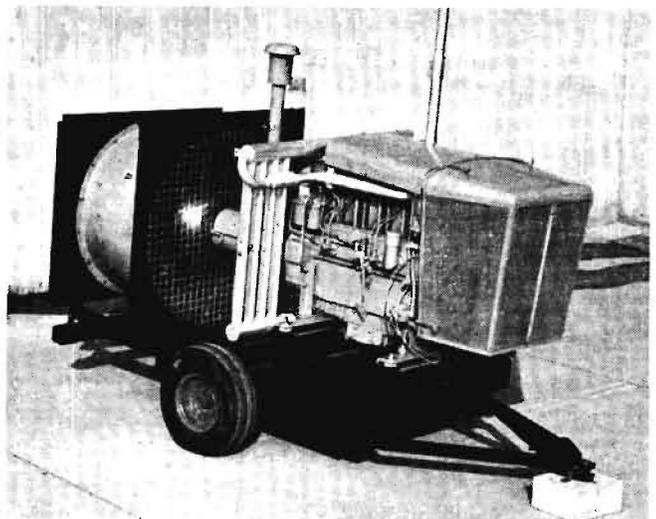


Bild 1: Axiallüfter mit Dieselmotorantrieb

¹⁾ Die Versuche wurden in den Jahren von 1968 bis 1970 mit Unterstützung des KTBL durchgeführt

²⁾ Der Motor wurde dankenswerterweise von der Fa. Gebr. Claas, der Lüfter von der Fa. Fischachtaler Maschinenfabrik bereitgestellt

mit Rechteckquerschnitt geschaltet, dessen freie Querschnittsfläche an der Einblasseite in die Trocknungsanlage 1,6 mal so groß war wie die an der Lüfteranschlußstelle. Durch diese Querschnittsvergrößerung des Übergangskanals konnte die Strömungsgeschwindigkeit der Luft und damit der dynamische Druckanteil gesenkt werden. Da das Einblasen der Luft bei einer Gesamtanlagenbreite von 6,50 m über einer Breite von 3,80 m erfolgte, wurde das Todwassergebiet der Luftströmung unter dem Rost klein gehalten. Zusätzliche Einbauten im Abstand von 1,50 und 3,50 m von der Luft-eintrittsstelle führten zu einem sehr gleichmäßigen Druckaufbau unter der gesamten Rostfläche.

Beim Beschicken der Trocknungsanlage mit Welkgut ist das Futter in waagerechten Schichten gleichmäßig hoch und locker einzubringen, ohne daß es dabei zu örtlichen Verdichtungen im Heustock kommt. Sonst sind ungleichmäßige Durchtrocknung und gegebenenfalls Schimmelnester im Heustapel unvermeidbar. Diese Forderung ist umso wichtiger, je höher die Luft vorgewärmt wird. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde zum Füllen der Belüftungsanlage ein mechanischer Schichtenverteiler³⁾ verwendet (Bild 2). Dieser selbsttätige Schichtenverteiler, der sich zum Beschicken von rechteckigen Flachrostanlagen besonders eignet, ist über der Mitte der Trocknungsanlage an Laufschienen fahrbar aufgehängt. Eine Seilwinde zieht ihn während des Verteilvorganges über der Streufläche langsam hin und her. Dabei wird das Gut von den gegenläufigen Verteilerhaspeln nach beiden Seiten hin gestreut, so daß durch das Wandern der Abstreustelle schichtenweise eine lockere Einlagerung gegeben ist. Frühere Untersuchungen zeigten, daß das Halmgut sehr gleichmäßig in der Belüftungsanlage verteilt wird und keine nennenswerten Entmischungerscheinungen, weder nach Feuchte noch nach Struktur, festzustellen waren [4]. Das einzulagernde Halmgut — die theoretische Schnittlänge betrug bei Ladewagengut 14 beziehungsweise 19 cm, bei Häcksel 8 cm — gelangte vom Lade- beziehungsweise Häckselwagen aus mit Hilfe eines Kettenschrägförderers in die Fördermulde des Verteilers und wurde von der Verteilerförderkette den Streuhaspeln zugeführt. Den gesamten Versuchsaufbau zeigt Bild 3.

Bei den Untersuchungen wurden alle für die Trocknung notwendigen Daten des Versuchsgutes, hier Wiesengras, fest-

³⁾ Für die Bereitstellung des mechanischen Schichtenverteilers sei der Fa. Edel in Wangen/Allgäu gedankt

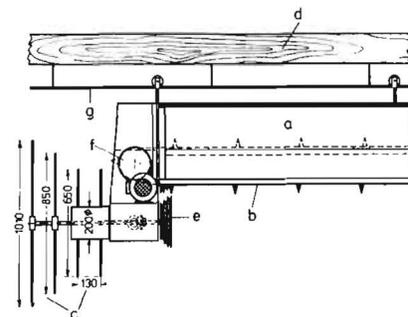


Bild 2: Mechanischer Schichtenverteiler für die Einlagerung von Welkheu

- a Fördermulde
- b Förderkette
- c Verteilerhaspeln
- d Längsbalken
- e Haspelantrieb
- f Förderkettenantrieb
- g Laufschiene

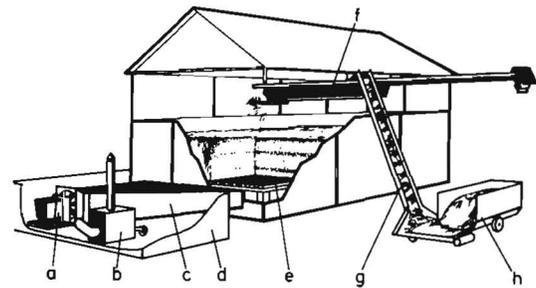


Bild 3: Aufbau der Versuchsanlage

- a Motor-Axiallüfteraggregat
- b Luftvorwärmer
- c Übergangskanal
- d Verkleidung zur Schalldämpfung
- e Flachrost
- f Mechanischer Schichtenverteiler
- g Kettenschrägförderer
- h Ladewagen

gehalten. Durch Wiegen ermittelte man die Ein- und Auslagerungsmengen. Die mittleren Feuchten bei der Ein- und Auslagerung sind aus einer Vielzahl von Einzelproben nach dem Trockenofen-Verfahren bestimmt und auf Naßbasis bezogen worden. Somit ließ sich die Gutfeuchte U nach der Gleichung $U = m_w / (m_w + m_s)$ mit m_w als der Masse des Wassers im Gut und m_s als der Masse der Trockensubstanz ermitteln. Der Einlagerungsfeuchtegehalt des Halmgutes lag bei den einzelnen Versuchen zwischen 50 und 60 %.

Tafel 1: Daten und Ergebnisse der fünf Versuche

Versuch Nr.		1	2	3	4	5
Versuchsbeginn:	Datum	2. 6.	11. 6.	29. 7.	18. 8.	23. 9.
Theoretische Schnittlänge des Halmguts	[cm]	14	14	14	19	8
Naßgutmenge	[kg]	22 240	13 220	20 740	6 980	19 780
Mittlere Einlagerungsfeuchte	[%]	59,7	49,0	57,2	47,5	49,2
Trockenmasse	[kg]	8 920	6 700	8 860	3 660	10 000
Auslagerungsmenge	[kg]	10 190	7 520	10 000	3 870	11 770
Mittlere Auslagerungsfeuchte	[%]	14,5	12,0	13,6	9,3	15,0
Verluste bei Ein- und Auslagerung	[kg]	~ 200	~ 100	~ 200	~ 150	~ 200
Maximaler Druck unterm Rost	[mm WS]	85	55	70	45	100
Bezogener Druckverlust	[mm WS/m]	40,5	30,6	35,0	36,0	47,5
Gefördertes Luftvolumen	[m³/s]	22,0	23,5	22,0	22,0	18,5
Spezifische Luftmenge	[m³/sm²]	0,312	0,333	0,312	0,312	0,262
Belüftungsdauer	[h]	84,5	57,0	39,0	14,6	39,8
Luftvorwärmung	[° C]	4	4	20	20	20
Dieselloilverbrauch	[l]	1 009	624	401	157	420
Motoröl (einschließlich Ölwechsel)	[l]	15	10	7	3	7
Heizölverbrauch	[l]	—	—	870	500	1 250
Betriebszeit der Heizöfen	[h]	—	—	23	14	32
Betriebskosten *)	[DM]	221	132	194	95	245
Verdunstungskosten je kg Wasser *)	[DPf]	1,84	2,30	1,85	3,20	3,05
Trocknungskosten je dz getrocknetem Heu *)	[DM]	2,17	1,82	1,94	2,46	2,08
Abgeführte Wassermenge	[kg]	12 050	5 700	10 500	3 000	8 010
Je m³ Luft abgeführte mittlere Wassermenge	[g/m³]	1,75	1,18	3,38	2,60	3,02
Stapelhöhe	[m]	2,10	1,80	2,05	1,25	2,10

*) Die Kosten für den elektrischen Antrieb der Gebläse in den Heizaggregaten wurden vernachlässigt

Die Betriebsdauer und -drehzahl des Belüftungsaggregates sowie der Kraftstoffverbrauch des Motors wurden durch Zwischenmessungen ständig überprüft. Während des Trocknungsvorganges zeichneten die bekannten Thermohygrographen den Temperatur- und Feuchteverlauf der angesaugten Luft wie auch den aus dem Heustock austretenden Abluft auf. Die Druckmessungen erfolgten ausschließlich mit U-Rohr-Manometern. Der Eichdruck des Lüfters und die Verteilung des statischen Druckes unter dem Belüftungsrost konnten laufend kontrolliert werden.

Um Aufschluß über die Temperaturen und damit über den Trocknungsverlauf im Heustock als Funktion der Belüftungszeit zu erhalten, legte man unter den Rost und jeweils nach einer Einlagerungsschichtdicke von etwa 0,25 m Thermolemente in den Heustapel. Ein Vierundzwanzig-Kanal-Schreiber registrierte den zeitlichen Temperaturverlauf im Heustock. Die Thermolemente waren in der Mitte und jeweils im vorderen und hinteren Drittel der Belüftungsanlage ausgelegt. Außerdem wurden bei zwei Einlagerungen Proben verschiedener Halmgutpressungen und -feuchten über der Stockfläche verteilt in der letzten Schicht eingebracht. Als Probenbehälter dienten würfelförmige Gitterkäfige mit einer Kantenlänge von 0,30 m. Auf diese Weise sollte der Einfluß unterschiedlicher Verdichtungen im Heustapel untersucht und festgestellt werden, inwieweit eine Konservierung ohne Verderb möglich ist.

3. Meßergebnisse

Es wurden insgesamt fünf Versuche durchgeführt. Bei den ersten beiden Versuchen arbeitete man mit geringer Vorwärmung der Trocknungsluft. Man nutzte lediglich die Wärmeabgabe des Dieselmotors zur Luftvorwärmung aus. Die weiteren Untersuchungen dagegen galten der zusätzlichen Vorwärmung der Gebläseluft durch erhebliche Wärmeleistungen. Alle gemessenen Daten und Versuchsergebnisse sind in *Tafel 1* zusammengestellt.

Eine erfolgreiche Trocknung ist nur dann gesichert, wenn das Gebläse bei dem sich einstellenden Betriebsdruck eine genügend hohe Luftleistung besitzt. Bei der Welkheutrocknung sollten, wie bereits erwähnt, spezifische Luftmengen von 0,1 bis 0,15 m³/s je m² Grundfläche der Belüftungsanlage nicht unterschritten werden. Es muß also die Geschwindigkeit der Trocknungsluft beim Durchströmen des Heustapels stets größer als 0,1 bis 0,15 m/s sein. Der sich ergebende Betriebsdruck ist vor allem beim Einsatz von Axiallüftern zu beachten und gegebenenfalls während der Einlagerung zu überprüfen [5]. Bei zu hohem Strömungswiderstand im Heustock kann der Axiallüfter „abreißen“. Er arbeitet dann im instabilen Kennlinienbereich mit erheblich geringerem Luftdurchsatz, der im allgemeinen für die Trocknung unzureichend ist.

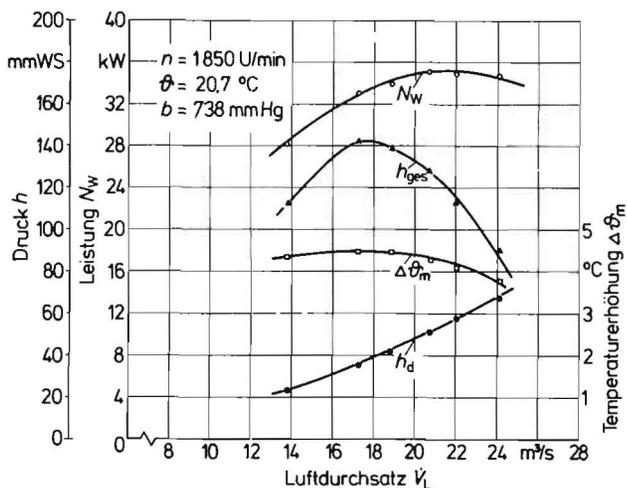


Bild 4: Kennfeld des bei den Trocknungsversuchen verwendeten Axiallüfters

Bei allen Versuchen arbeitete das Motor-Lüfteraggregat mit einer Drehzahl $n = 1850$ U/min. Das in Vorversuchen aufgenommene Kennfeld des Axiallüfters zeigt Bild 4. Bei dieser Drehzahl liefert das Gebläse je nach erforderlicher Druckleistung zwischen 18,5 und 23,5 m³ Luft in der Sekunde. Dieses geförderte Luftvolumen entsprach bei der gegebenen Anlagengröße von 70,5 m² Grundfläche einem spezifischen Luftdurchsatz von 0,262 beziehungsweise 0,33 m³/s je m². Entsprechend der aufgenommenen Kennlinie des Axiallüfters muß ein Ansteigen des Gesamtdruckes über 140 mmWS in Verbindung mit einem gleichzeitigen Absinken des Luftdurchsatzes unter 17,5 m³/s, bedingt durch den wachsenden Widerstand der Einlagerungsschicht, vermieden werden. Unterhalb dieser beiden Grenzwerte arbeitet der Lüfter im instabilen Kennlinienbereich. Der maximale statische Druck unter dem Rost schwankte bei den einzelnen Versuchen je nach Gutzusammensetzung, Einlagerungsfeuchte, Stapelhöhe und Lagerungsdichte zwischen 45 und 100 mmWS. Daraus ergab sich ein bezogener Druckverlust je Meter Einlagerungsschichtdicke von etwa 30 bis 50 mmWS. Es bleibt darauf hinzuweisen, daß die gemessenen Werte des statischen Druckes unter dem Rost bei den entsprechenden Luftdurchsätzen von denen des aufgenommenen Kennfeldes abweichen. Unter dem Belüftungsrost gilt die auf dem Prüfstand ermittelte Kurve des dynamischen Druckanteils nicht mehr. Durch den teilweisen Abbau des dynamischen Druckes verbunden mit einer gleichzeitigen Umwandlung in statischen Druck sind unter dem Belüftungsrost höhere Werte möglich. Die erforderliche Antriebsleistung des Axialgebläses lag bei einem Fördervolumen von 18,5 bis 23,5 m³/s zwischen 34 kW (46,2 PS) und 35,5 kW (48,3 PS).

Da bei den ersten beiden Versuchen lediglich die Verlustwärme des Motors zur Luftvorwärmung verwendet wurde, konnte im Mittel nur eine Erwärmung der Trocknungsluft um etwa 4 °C gegenüber der angesaugten Außenluft erzielt werden. In diesem Falle ließ sich bei einer Einlagerungsfeuchte von annähernd 60 % eine mittlere Wasseraufnahme von etwa 1,7 g/m³ vorgewärmter Gebläseluft feststellen. Der niedrigere Wert von ungefähr 1,2 g/m³ bei Versuch 2 ist hauptsächlich auf die geringere Endfeuchte des Gutes zurückzuführen.

Bei den Versuchen 3 bis 5 wurde die Trocknungsluft um weitere 16 °C durch zusätzlich installierte Heizöfen mit einer Bruttowärmeleistung von 350 000 kcal/h erwärmt. Die Gesamterwärmung der Gebläseluft um $\Delta\theta = 20$ °C gegenüber der Außenluft bewirkte eine beachtliche Erhöhung des Wasseraufnahmevermögens der Luft. So konnten je m³ erwärmter Gebläseluft mittlere Wassermengen zwischen 2,6 und 3,4 g abgeführt werden. Die relativ niedrige Wasserabfuhr von 2,6 g/m³ beim Versuch 4 gegenüber den Vergleichswerten der Versuche 3 und 5 ist in einer erheblichen Unter-

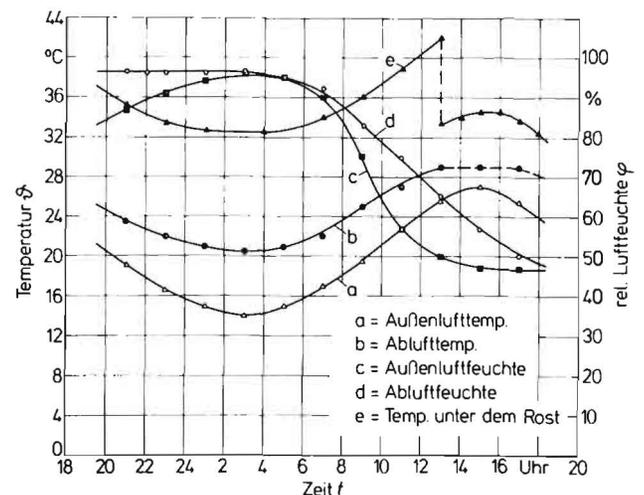


Bild 5: Temperatur- und Feuchteverlauf während des Trocknungsprozesses (Versuch 3)

trocknung begründet, auf die weiter unten noch hingewiesen wird.

In Bild 5 ist ein Ausschnitt des Temperatur- und Feuchteverlaufs von Außen- und Abluft sowie des Temperaturverlaufs unter dem Rost über der Trocknungszeit für den Versuch 3 aufgetragen. Aus dem Temperaturverlauf der Luft unter dem Belüftungsrast und der angesaugten Außenluft ist zu ersehen, daß bei einer zusätzlichen Bruttowärmezufuhr von 350 000 kcal/h bis zu Beginn der Nachbelüftung eine ziemlich konstante Temperaturdifferenz $\Delta\theta \approx 17 \dots 20^\circ\text{C}$ erreicht wurde. Die starke Vorwärmung erfolgte bei diesem Versuch von abends 18.00 Uhr bis mittags 13.00 Uhr des folgenden Tages. Erwartungsgemäß lagen in den Abend- und Nachtstunden die Werte der relativen Feuchte der Außenluft sehr hoch und erreichten mit $\varphi = 96\%$ ihr Maximum gegen 3.00 Uhr nachts. Mit zunehmender Erwärmung der Außenluft am Vormittag sank die Luftfeuchte dann auf $\varphi = 50\%$. Infolge der Wasseraufnahme und der damit verbundenen Abkühlung beim Durchströmen der Halmgutschicht war die Temperatur der Abluft im Durchschnitt um 12°C niedriger als die der vorgewärmten Gebläseluft unterm Rost. Während der ersten neun Stunden des Trocknungsprozesses blieb der Feuchtegehalt der Abluft mit $\varphi = 97\%$ weitgehend konstant. Erst bei zunehmender Erwärmung in den Morgen- und Vormittagsstunden und mit fortschreitender Trocknung nahm die relative Feuchte der Abluft bis zum Beginn der Nachbelüftung sehr gleichmäßig ab.

Bei der Nachtrocknung wurde die zugeführte Bruttowärmemenge während der ersten acht Stunden auf 150 000 kcal/h reduziert. Anschließend belüftete man noch weitere zwölf Stunden ohne Zusatzwärme. Der mittlere Restfeuchtegehalt des Heus betrug bei der Auslagerung $U_A \approx 14\%$.

Im I, x -Diagramm für feuchte Luft sind einige Zustandsänderungen der Trocknungsluft von Versuch 3 zu verschiedenen Zeiten bei zusätzlicher Vorwärmung der Außenluft um $\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$ wiedergegeben (Bild 6). Die Punkte A_1 bis A_4 geben den jeweiligen Außenluftzustand zu den einzelnen Zeiten an, während die Punkte A'_1 bis A'_4 den entsprechenden Luftzustand bei 20°C Erwärmung darstellen. Die dazugehörigen Abluftzustände sind durch die Punkte E_1 bis E_4 im Diagramm festgehalten. Wie die Zustandsänderungen der Trocknungsluft deutlich machen, verläuft der Trocknungsvorgang im Mittel adiabatisch. Eine volle Sättigung der Abluft wurde nicht erreicht. Zur Bildung einer ausgeprägten Kondensationsschicht ist es daher im Heustock nicht gekommen. Außerdem ist aus diesem Bild die Wasseraufnahme der Trocknungsluft während der ersten Stunden der Belüftung ersichtlich.

Über das Verhalten der Temperaturen im Heustapel geben die Bilder 7 und 8 näheren Aufschluß. Durch in den Heustock bei definierten Einlagerungshöhen eingebrachte Thermoelemente konnten die Temperaturen in Abhängigkeit von der Stapelhöhe während des ganzen Trocknungsprozesses ermittelt werden. Diese Temperaturkurven sind für den Versuch 3 (Bild 7) in Abständen von fünf beziehungsweise vier Stunden, für den Versuch 4 (Bild 8) zunächst stündlich, später nach Zwischenzeiten von zwei Stunden wiedergegeben. Diesen Diagrammen kann die Trocknungsweglänge, das heißt die Dicke der Heuschicht, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt gerade in Trocknung befindet, entnommen werden. Außerdem läßt sich aus den Temperaturkurven ersehen, bis in welche Höhe der Heustock zu den verschiedenen Zeiten durchgetrocknet ist. Aus Bild 8 ist zu entnehmen, wie seit Trocknungsbeginn um 19.00 Uhr mit zunehmender Belüftungsdauer die sich gerade in Trocknung befindenden Schichten immer dünner werden, bis gegen 4.00 Uhr der Trocknungsprozeß vollkommen abgeschlossen ist. Auf die beendete Trocknung der gesamten Einlagerung kann aus der Temperaturkonstanz der Kurve „g“ geschlossen werden.

Bild 9 zeigt den Temperaturverlauf im Heustock bei verschiedenen Stapelhöhen in Abhängigkeit von der Trocknungszeit ebenfalls für den Versuch 4. Außerdem sind in

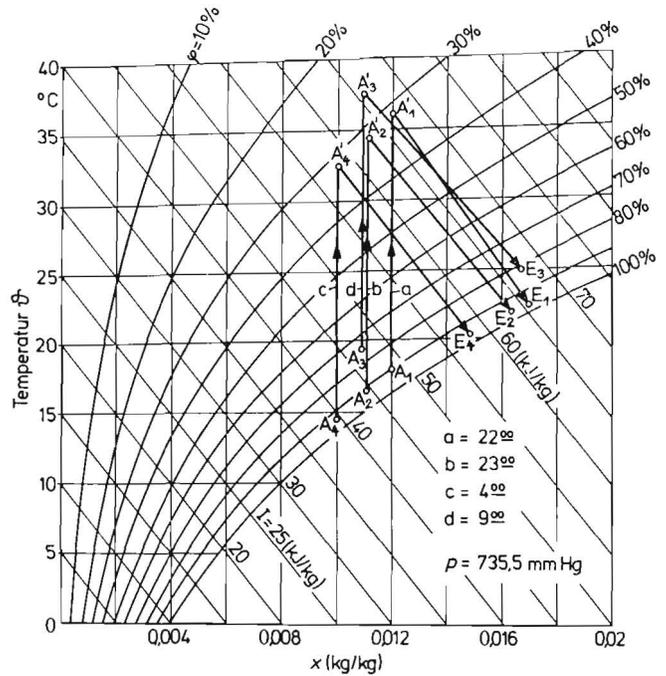


Bild 6: Zustandsänderungen der Trocknungsluft bei einer Vorwärmung um 20°C (dargestellt im I, x -Diagramm für feuchte Luft)

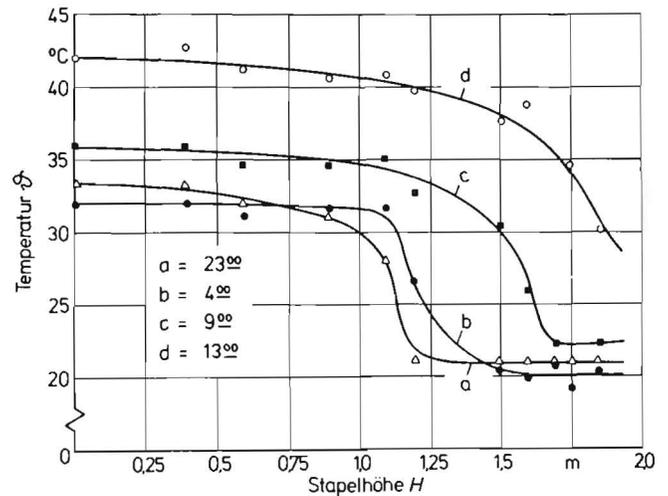


Bild 7: Temperaturverlauf im Heustapel zu verschiedenen Zeiten (Versuch 3)

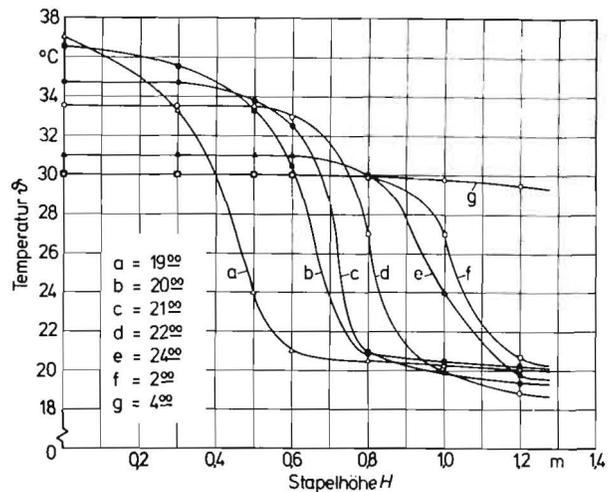


Bild 8: Temperaturverlauf im Heustapel zu verschiedenen Zeiten (Versuch 4)

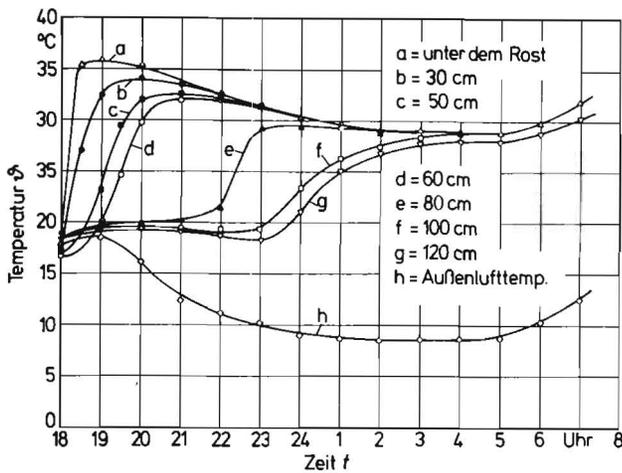


Bild 9: Temperaturverlauf in verschiedenen Schichten der Einlagerung, der Außenluft und der Luft unter dem Belüftungsrost (Versuch 4)

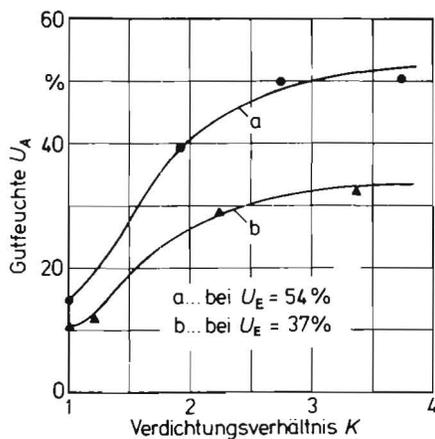


Bild 10: Auslagerungsfeuchten in Abhängigkeit von dem Verdichtungsverhältnis der Einlagerung

diesem Diagramm die Temperaturen der Außenluft sowie der vorgewärmten Trocknungsluft unter dem Rost festgehalten. Während des Trocknungsprozesses blieb die Temperaturdifferenz von Außen- und Unterrostluft annähernd konstant und betrug im Durchschnitt 20 °C. Bei Trocknungsbeginn ist durch die große Wärmezufuhr besonders in den unteren Heustockschichten ein schneller und starker Temperaturanstieg zu verzeichnen, während sich die Schichten oberhalb 0,8 m Stockhöhe in den ersten acht Stunden der Trocknung kaum erwärmen. Erst nachdem die unteren Einlagerungsschichten durchgetrocknet sind, was durch eine gewisse Temperaturkonstanz in diesem Bereich zum Ausdruck kommt, erwärmt sich allmählich das noch zu trocknende Gut. Übereinstimmend ist für den Versuch 4 den beiden Diagrammen Bild 8 und 9 zu entnehmen, daß auf Grund ihrer gleichbleibenden Temperatur ab 4.00 Uhr die ganze Einlagerungsschicht von 1,25 m Dicke durchgetrocknet ist.

Bei allen Trocknungsversuchen mit einer Luftvorwärmung um $\Delta\theta = 20^\circ$ wurde der von HARTMANN und LEHMANN [6] angegebene Grenzwert der maximalen Trocknungszeit von etwa 40 Stunden nicht überschritten. Nach diesem Zeitraum kann es bei den verwendeten Trocknungstemperaturen zur Schimmelbildung im Gut kommen. Bei einer spezifischen Luftmenge von 0,312 m³/s je m² Heustockgrundfläche konnten bei einer Einlagerungsfeuchte von $U_E \approx 60\%$ 100 dz getrocknetes Heu bei einer Luftvorwärmung um 20 °C in etwa 35 Stunden, bei einer Vorwärmung um 4 °C in ungefähr 85 Stunden bereitet werden.

Versuche mit in den Heustock eingelegten Probewürfeln verschiedener Halmgutpressungen haben gezeigt, daß bei

einer Einlagerungsfeuchte von $U_E = 37\%$ lagerfähiges Heu ($U_A < 20\%$) nur bis zu einem Verdichtungsverhältnis $K = 1,6$, bei $U_E = 54\%$ sogar nur bis zu einem $K = 1,2$ in der vorgegebenen Trocknungszeit ohne Verderb konserviert werden konnte (Bild 10). Das Verdichtungsverhältnis ist definiert als $K = \gamma_1/\gamma_2$, wobei γ_1 das Raumgewicht des vorgepreßten Halmgutes im Probewürfel und γ_2 das der lockeren Schüttung im Stapel darstellt. Um vergleichbare Größen zu erhalten, sind beide Werte auf Trockensubstanz bezogen. Das mittlere spezifische Gewicht γ_2 betrug wegen der geringen Stapelhöhe nur 75 kp TS/m³.

Die Trocknungskosten je dz lagerfähigen Heus lagen bei den Versuchen mit 4 °C Luftvorwärmung zwischen 1,82 DM und 2,17 DM, bei denen mit einer Erwärmung der Gebläseluft um 20 °C zwischen 1,94 DM und 2,46 DM. Es handelt sich hier in allen Fällen um reine Betriebskosten, zu deren Errechnung folgende Preise für die einzelnen Betriebsmittel zugrundegelegt wurden:

Für Dieselöl 0,18 DM/l (in diesem Preis ist die Gasölbeihilfe, die der Landwirtschaft gewährt wird, schon berücksichtigt), für Motorenöl 2,00 DM/l und für Heizöl 0,124 DM/l. Die relativ hohen Trocknungskosten von 2,46 DM/dz Heu des 4. Versuches sind in der starken Untertrocknung bis auf einen Restfeuchtegehalt von $U_A = 9,3\%$ begründet. Im allgemeinen beliefen sich bei einer Einlagerungsfeuchte zwischen 50 % und 60 % die durchschnittlichen Trocknungskosten auf 2,00 bis 2,25 DM/dz Heu.

Da der elektrische Anschlußwert in den landwirtschaftlichen Betrieben für den Antrieb leistungsstarker Gebläse nicht ausreicht, bietet sich der Verbrennungsmotor als Antriebsaggregat an [7]. Eine einfache Vergleichsrechnung mit den üblichen Tarifen für elektrischen Strom zeigt bei den vorliegenden Versuchen, daß der Dieselmotor etwa ein Drittel billiger arbeitet als ein elektrischer Antrieb. Im letzteren Fall muß die Wärmeabgabe des Verbrennungsmotors noch zusätzlich von den Luftvorwärmgeräten aufgebracht werden.

4. Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen den heutigen Stand der Technik bei der Welkheutrocknung mit stark angewärmter Luft. Durch die Verkürzung der Gesamttrocknungszeit, besonders bei der Verwendung höherer Zulufttemperaturen, läßt sich eine entscheidende Verbesserung der Rauhfutterqualität erzielen. Im Vergleich zur Welksilagebereitung sind die Investitionskosten bei der Welkheutrocknung niedriger. Der Gutzustand, die Trocknungstechnik sowie die Wirtschaftlichkeit sind bei der Auswahl der nötigen Geräte zu beachten. Durch die erreichten hoher Trocknungsleistungen bei der Verwendung großer spezifischer Luftmengen und gleichzeitiger hoher Luftvorwärmung ist eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Werbe- und Bergekapazität möglich.

5. Schrifttum

- [1] SCHEUERMANN, A.: Stand der Entwicklung bei der Unterdachttrocknung von Heu. Landtechnik 21 (1966) S. 745–748
- [2] SEGLER, G.: Fortschritte in der Heubelüftungstechnik. Landtechnik 13 (1958) S. 590–595
- [3] SEGLER, G., SCHEUERMANN, A. und G. ULRICH: Untersuchung zur Entwicklung der Welkheutrocknung. Landtechnische Forschung 18 (1970) S. 76–83
- [4] BLÜMEL, K. und K. MAURER: Untersuchungen an einem Schichtenverteiler zur Einlagerung von Halmgut in Belüftungsanlagen mit rechteckiger Grundfläche. Grundlagen der Landtechnik 20 (1970) S. 135–136 und S. 167–170
- [5] FINKBEINER, TH.: Vergleichende Untersuchungen an Radial- und Axialgebläsen für die Heubelüftungstrocknung. Grundlagen der Landtechnik 17 (1967) S. 171–175
- [6] HARTMANN, D. und D. LEHMANN: Qualitätsheu durch Warmluftstättrocknung ohne Schimmelbildung. Württembergisches Wochenblatt für Landwirtschaft (1970) S. 1920–1921
- [7] SEGLER, G.: Stand der Heubelüftungstechnik. Landtechnik 24 (1969) S. 246–250