

# Trocknung von Halmgutwickelbriketts mit Warmluft

Friedrich Wilhelm

Institut für Landmaschinen, TU Braunschweig

## 1. Einleitung

Die fortschreitende Abwanderung von Arbeitskräften aus der Landwirtschaft und die intensive Aufklärung über die hohen Trockensubstanz- und Nährstoffverluste bei der noch üblichen Bodenheuerung verstärkten in den vergangenen Jahren die Forderung nach neuen Heugewinnungsverfahren.

So werden seit einiger Zeit mechanische, chemische und thermische Aufbereitungsverfahren für Grüngut getestet, die die Trocknungsdauer verkürzen und dadurch den Arbeitsaufwand und das Trocknungsrisiko verringern sollen. Die heute bekannten Aufbereitungsverfahren bringen jedoch nur eine geringe Verkürzung der Trocknungsdauer und schließen das Gut darüber hinaus so weit auf, daß hochwertige Nährstoffe leicht ausgewaschen werden können. Die Feldtrocknung ist deshalb auch für aufbereitetes Grüngut zu risikoreich [1].

Eine praktikable Möglichkeit, den Arbeitsaufwand bei der Heugewinnung zu senken und größere Trocknungsverluste auszuschließen, stellt die Welkheutrocknung dar. Bei diesem Verfahren wird das Grüngut schon im angewelkten Zustand mit einem Feuchtegehalt von etwa 40 bis 60 % geborgen und anschließend künstlich nachgetrocknet. Unter günstigen Bedingungen kann das Auswelken in einem Feldtrocknungstag erreicht werden, so daß der Arbeitseinsatz und das Wetterrisiko verhältnismäßig klein sind. Da dem Grüngut bei dem oben genannten Feuchtegehalt zwischen 80 und 65 % des zum Schnittzeitpunkt vorhandenen Wassers entzogen sind, ist dieser Feuchtegehalt auch hinsichtlich des Energieaufwandes für die künstliche Nachtrocknung günstig.

Mit dem Wickelverfahren wird nun der Landwirtschaft ein Verfahren in Aussicht gestellt, das im Gegensatz zur Normaldruckbrikettierung auch die Verdichtung angewelkten Grüngutes zu haltbaren Briketts ermöglicht. Gelänge es, solche Briketts wirtschaftlich zu trocknen, so wäre mit dem Wickelbrikettieren ein Heuwerkeverfahren gefunden, das die Vorteile der Welkheutrocknung und der Brikettierung in sich vereinigt und folgende Vorzüge hätte:

- Verarbeitung von angewelktem Material, also von Grüngut, das nur kurze Zeit auf dem Feld getrocknet wurde (geringer Arbeitsaufwand, geringes Wetterrisiko),
- Erzeugung von Rauhfutter hoher Dichte beziehungsweise geringen Raumbedarfs,
- Erzeugung von Rauhfutter, das schüttgutähnliche Eigenschaften besitzt (gute Mechanisierung der Förderung und Verfütterung möglich).

Zur Beantwortung der Frage, ob eine wirtschaftliche Trocknung von Wickelbriketts aus angewelktem Grüngut möglich

ist, wurden in den vergangenen Jahren am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig Trocknungsversuche durchgeführt.

## 2. Aufbau der Versuchsanlage

Für die Trocknungsversuche mit Wickelbriketts wurde ein Satz Trockner mit einem Durchmesser von 800 mm eingesetzt, der bis 3 m hohe Brikettschüttungen aufnehmen konnte. Bild 1 zeigt eine Skizze der Versuchsanlage. Die Trocknungsluft wird elektrisch aufgeheizt und mit Hilfe eines regelbaren Radialgebläses durch die Schüttung gepreßt. Ein Wärmespeicher in der Luftleitung zwischen Gebläse und Trockner glättet die von dem Heizer verursachten zeitlichen Temperaturschwankungen der Trocknungsluft. Regeleinrichtungen gestatten es, darüber hinaus die je Zeiteinheit durchgesetzten Luftmengen während eines Versuches konstant zu halten. Die in die Trocknungsanlage eingebauten Aufnehmer ermöglichen die Messung folgender Versuchsdaten:

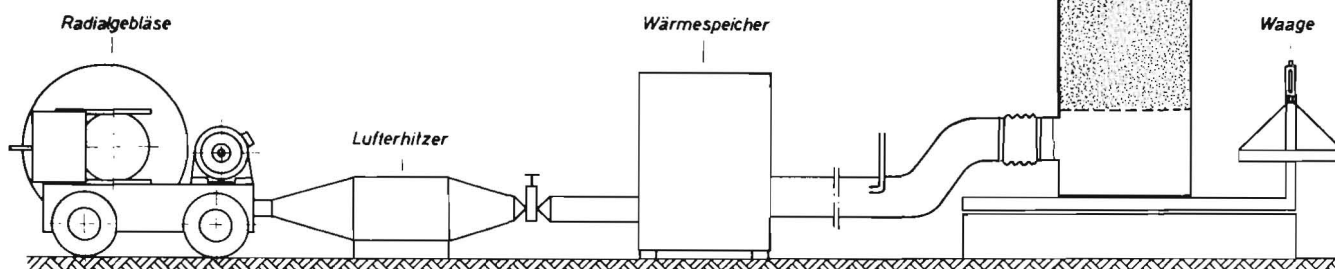
Luftmenge; verdunstete Wassermenge; statischer Überdruck in 13 verschiedenen Höhen der Brikettschüttung; Lufttemperatur und -feuchtigkeit in zehn verschiedenen Höhen der Schüttung.

## 3. Durchführung der Versuche

Die Briketts wurden mit der institutseigenen Wickelpresse hergestellt und in abgewogenen Portionen in den Trocknungsbehälter gefüllt. Mit den Briketts wurden auch die Sonden für die Messung der Lufttemperatur und -feuchtigkeit in die Schüttung eingebracht. Während der bis zu 60 Stunden dauernden Versuche zeichnete eine Digitalisierungsanlage alle 15 Minuten die Temperatur- und Feuchtigkeitswerte der in der Schüttung befindlichen Trocknungsluft auf. In größeren Zeitabständen wurden die Luftmenge, der Druckabfall in der Schüttung und die abgegebene Wassermenge ermittelt.

Zahlreiche entnommene Brikettproben gestatteten dazu die Bestimmung der mittleren Größe, Dichte und Feuchte der Briketts einer Schüttung.

Bild 1: Schemaskizze der Versuchsanlage zur künstlichen Trocknung von Wickelbriketts



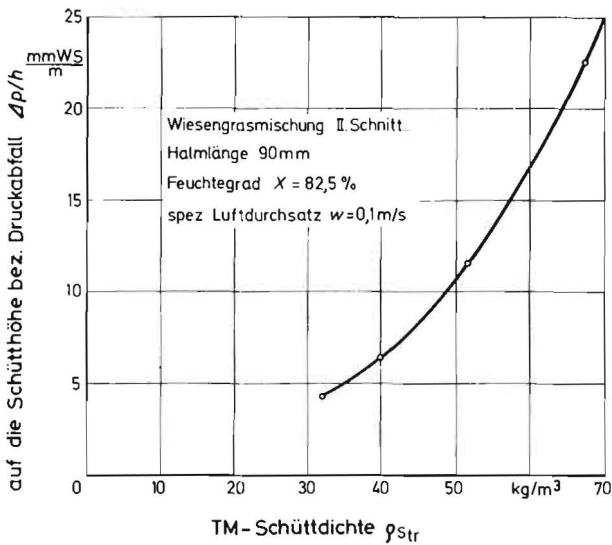


Bild 2: Auf die Schütthöhe bezogener Druckabfall einer Welkgrasschüttung in Abhängigkeit von der Schüttdichte

#### 4. Versuchsergebnisse

Bei oberflächlicher Betrachtung erscheint es zunächst nicht zweckmäßig, angewelktes Grüngut schon vor der Trocknung zu brikettieren, da verdichtetes Material langsamer trocknet als loses.

Die Unterschiede in der Trocknungsgeschwindigkeit von einzelnen Halmen und den aus Einzelhalmen zusammengepreßten Briketts sind verhältnismäßig groß. Bei der Trocknung von Schüttungen aus Einzelhalmen und von Schüttungen aus Briketts wirken sich diese Unterschiede jedoch nur abgeschwächt auf die Trocknungskosten aus. Der Grund dafür dürfte vor allem darin zu suchen sein, daß die Brikettschüttungen belüftungstechnisch günstiger sind als lose Welkheuschüttungen.

##### 4.1. Belüftungstechnische Unterschiede zwischen Schüttungen aus losem Welkgut und aus Wickelbriketts

In der Praxis hat sich gezeigt, daß Schüttungen aus angewelktem langem oder gehäckseltem Halmgut besonders stark zur Bildung sogenannter „Nester“ neigen, die wegen ihrer höheren Verdichtung nicht oder nur wenig von Luft durchströmt werden [1]. Die Ursache für die Neigung zur Nester-

bildung liegt in der sehr niedrigen Steifigkeit [2] und dem hohen spezifischen Gewicht des angewelkten Materials. Ausdehnung und Dichte der Nester sind zufällig und werden stark vom Schüttverfahren bestimmt. Sie lassen sich auch durch hohen Aufwand bei der Einlagerung des Gutes nicht vollständig vermeiden. So müssen Welkheuschüttungen stets — zum Teil erheblich — nachbelüftet werden, um die Dichtenester auch auf eine lagerfähige Feuchtigkeit herunterzutrocknen. Die so eintretende Verlängerung der Belüftungsdauer senkt die Schlagkraft und die Wirtschaftlichkeit dieses Heugewinnungsverfahrens.

Wie stark dichtere Zonen die Gleichmäßigkeit der Trocknung einer Loseheuschüttung beeinträchtigen, veranschaulichen die Bilder 2 und 3. Bild 2 (mit Hilfe von Messungen von HOLZE [3] angefertigt) zeigt, daß der auf die Schütthöhe bezogene Druckabfall einer Schüttung aus angewelktem Wiesengras sehr steil mit der Schüttdichte ansteigt. Daraus folgt, daß mit zunehmender Dichte der Nester deren Durchströmung mit Luft rapide absinkt.

Diese Benachteiligung hinsichtlich der Durchströmung und damit der Trocknung der dichteren Zonen verstärkt sich während der Trocknung noch weiter, denn die in Bild 3 dargestellte Abnahme des bezogenen Druckabfalls einer Grasschüttung mit dem Fortschreiten der Trocknung [3] begünstigt die von vornherein schneller trocknenden lockeren Zonen zusätzlich.

Neben dieser ungleichmäßigen Durchströmbarkeit besitzen lose Heuschüttungen eine weitere nachteilige Eigenschaft. Die Dichte der Schüttung ist von der Höhe der Schüttung abhängig — sie nimmt mit der Schütthöhe zu. Nach Angaben von SEGLER [4] beträgt bei einer 4 m hohen Schüttung die Dichte im oberen Viertel der Schüttung beispielsweise etwa 95 kg/m<sup>3</sup>, im unteren Teil dagegen 200 kg/m<sup>3</sup> und mehr. Daraus ergibt sich zweierlei: einmal sind zur Erzielung bestimmter Schüttdichten Mindestschütthöhen erforderlich und zum anderen nimmt der Belüftungswiderstand einer Loseheuschüttung während der Befüllung stark zu beziehungsweise der Luftdurchsatz sehr stark ab.

Ganz anders sind die Verhältnisse bei Brikettschüttungen. Hier ist die Dichteverteilung über die gesamte Schütthöhe nahezu gleichmäßig. So ließ sich zum Beispiel eine 1,25 m hohe Wickelbrikettschüttung durch Aufbringen von 600 kp/m<sup>2</sup> Verdichtungsdruck um nur 15 % verdichten. Dagegen beeinflusste die Dichte der Einzelbriketts die Dichte ihrer Schüttung sehr stark. Wie in Bild 4 dargestellt, steigt die Schüttdichte für Briketttrockenmassendichten über 280 kg/m<sup>3</sup> un-

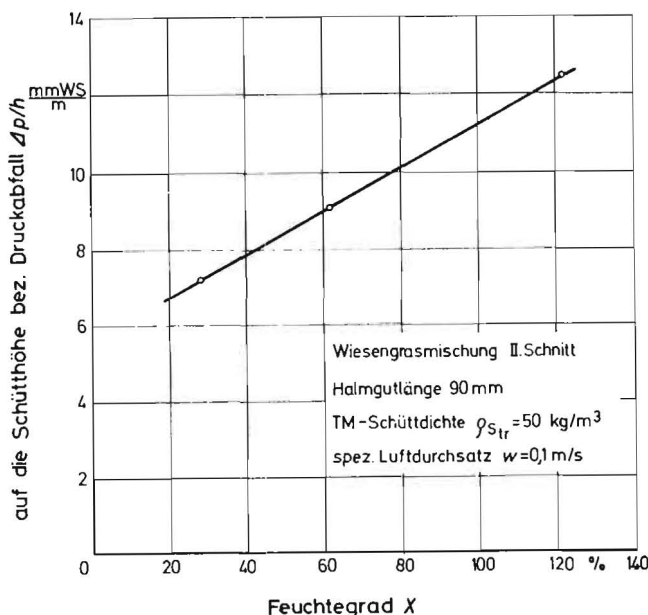


Bild 3: Auf die Schütthöhe bezogener Druckabfall einer Grasschüttung in Abhängigkeit vom Feuchtegrad des Gutes

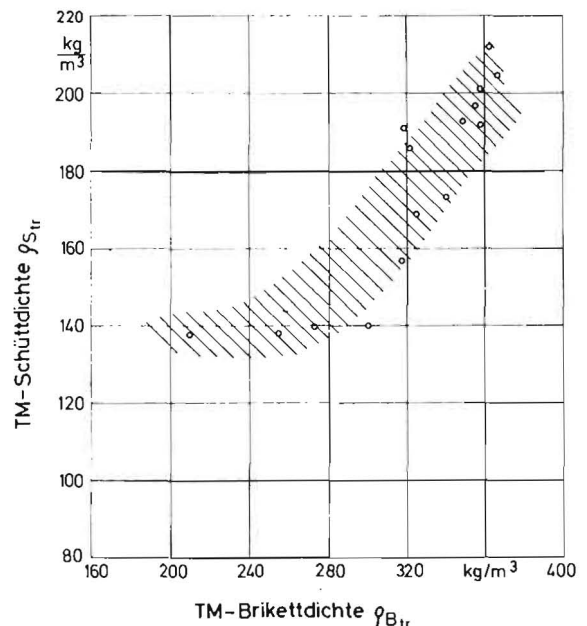


Bild 4: Dichte von Halmgutwickelbrikettschüttungen in Abhängigkeit von der Brikett-Trockenmassendichte

gefähr linear mit der Brikettdichte an und erreicht bei 360 kg/m<sup>3</sup> ungefähr 200 kg/m<sup>3</sup> (Behälterdurchmesser 800 mm).

Trotz der hohen Schüttdichten der Brikettschüttungen ist ihr Strömungswiderstand wesentlich niedriger als der von losem Heu (Bild 5). Die Ursachen dafür sind die unterschiedlichen Schüttungsstrukturen. Im Gegensatz zum losen Halmgut bilden die Briketts ein gleichmäßiges und verhältnismäßig weitporiges Kanalsystem aus. Aus diesen und den anderen oben aufgezeigten Eigenschaften von losen Heu- und Brikettschüttungen folgt, daß die Brikettschüttungen den Loseheuschüttungen belüftungstechnisch überlegen sind. Sie werden von den Trocknungsmedien gleichmäßiger durchströmt und haben den zusätzlichen Vorteil, daß in ihnen die Größe der höher verdichteten Gebiete mit der Größe der Briketts vorgegeben und nicht wie bei Welkheuschüttungen zufällig ist. Das Trocknungsrisiko einer Brikettschüttung ist also kalkulierbar.

Diesen günstigen Voraussetzungen steht die Tatsache gegenüber, daß der Wasserentzug aus den sehr dichten Heubriketts sehr schwer beziehungsweise langwieriger ist als bei losem Halmgut. Wie stark sich das auch auf die Trocknungskosten und den notwendigen Aufwand bei der Trocknung von Wickelbriketts auswirkt, zeigen die folgenden Ergebnisse.

#### 4.2. Einfluß der Trocknungsbedingungen auf Trocknungsdauer und Trocknungskosten

Zunächst durchgeführte Testversuche ergaben eindeutig, daß sich Halmgutbriketts aus Welkgut mit Hilfe von Kaltluft nicht trocknen lassen, eine Erfahrung, die auch TÜREK [5] bestätigt. So bestand die Frage, welche Lufterwärmung notwendig ist und wie stark sie Trocknungsdauer und Trocknungskosten beeinflusst.

In zwei Versuchsreihen, die mit Luzerne und Weidelgrasbriketts durchgeführt wurden, zeigte sich, daß die Trocknungsdauer mit zunehmender Vorwärmung der Luft stark abfällt. In Bild 6 sind diese Ergebnisse dargestellt. Die Kurven verlaufen nahezu parallel mit den gleichfalls in das Diagramm eingezeichneten Linien gleicher Luftvorwärmkosten. Das bedeutet, daß eine Erhöhung der Lufttemperatur hinsichtlich des Energiebedarfes für die Luftaufheizung kostenneutral ist. Da eine Trockenzeitverkürzung bei sonst gleichen Trocknungsbedingungen automatisch die Gebläsebetriebskosten senkt, wirkt sich die Temperaturerhöhung in dieser Richtung und damit auch insgesamt gesehen günstig aus.

Die Höhe der Gebläsebetriebskosten ist außer von der Trocknungsdauer noch von der Gebläseleistung  $N$  abhängig. Vor einer Beurteilung des Einflusses des spezifischen Luftdurchsatzes auf den Trocknungsvorgang muß deshalb dessen Wirkung auf die Gebläseleistung und -betriebskosten geklärt werden.

Allgemein gilt für Gebläsebetriebskosten:

$$K \sim \Delta p \cdot w \cdot t$$

$K$  ... Kosten  
 $\Delta p$  ... Gesamtdruck  
 $w$  ... spezifische Luftmenge  
 $t$  ... Trocknungsdauer.

Nach eigenen Messungen und nach Ergebnissen von HOLZE [3] kann für spezifische Luftmengen von  $w = 0,4 \dots 0,7$  m/s für den Druckabfall in Brikett- und Halmgutschüttungen ungefähr

$$\Delta p \sim w^{1,65}$$

angesetzt werden. Damit ergibt sich für die Gebläsebetriebskosten:

$$K \sim w^{2,65} \cdot t.$$

Das bedeutet, daß die Gebläsebetriebskosten erst dann unabhängig vom Luftdurchsatz sind, wenn die Trocknungsdauer mit  $w^{2,65}$  abnimmt.

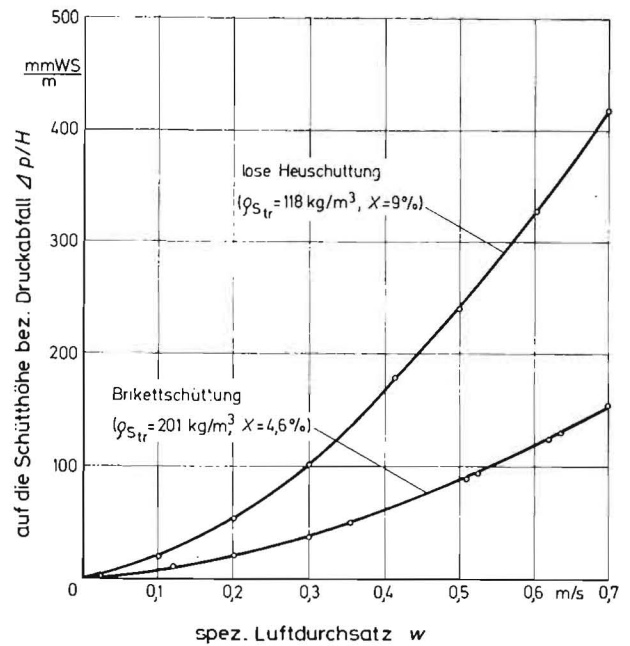


Bild 5: Auf die Schütthöhe bezogener Druckabfall einer Brikettschüttung und einer losen Heuschüttung in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz

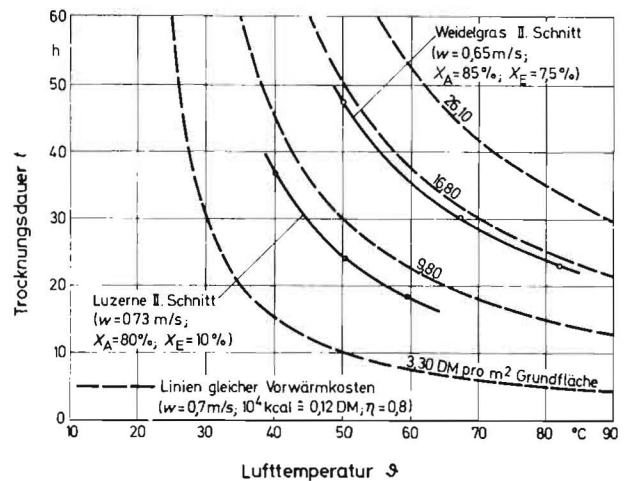


Bild 6: Trocknungsdauer von Wickelbrikettschüttungen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

In Bild 7 ist die Abhängigkeit der Trocknungsdauer  $t$  einer 2,90 m hohen Brikettschüttung aus Weidelgrasbriketts vom spezifischen Luftdurchsatz  $w$  dargestellt. Die Trocknungsdauer fällt danach stark mit dem steigenden Luftdurchsatz ab.

Trotzdem verläuft die Kurve flacher als die in das Diagramm eingezeichneten Linien konstanter Gebläsebetriebskosten. Das heißt, die erforderliche Gebläseantriebsleistung steigt mit zunehmendem Luftdurchsatz schneller an, als die Trocknungsdauer abfällt. Da außerdem die wegen der kürzeren Trocknungsdauer eingesparten Luftvorwärmkosten kleiner sind als die zusätzlich anfallenden Gebläsebetriebskosten, sollte der spezifische Luftdurchsatz im Hinblick auf die Trocknungskosten so niedrig wie möglich gewählt werden.

Wie oben angegeben, sind die Gebläsebetriebskosten vom Druckabfall  $\Delta p$ , dem spezifischen Luftdurchsatz  $w$  und der Trocknungszeit  $t$  abhängig. Es stellt sich deshalb die Frage, ob Trockenzeitverkürzungen auch allein durch Erhöhung des Luftdurchsatzes bei gleichzeitig künstlich niedrig gehaltenem Druckabfall oder bei kleinen Luftdurchsätzen und künstlich gesteigerten Druckabfällen erreicht werden können. Dann würde sich das Verhältnis Trocknungsdauer/Gebläsebetriebskosten günstiger als in der beschriebenen Versuchsreihe gestalten.

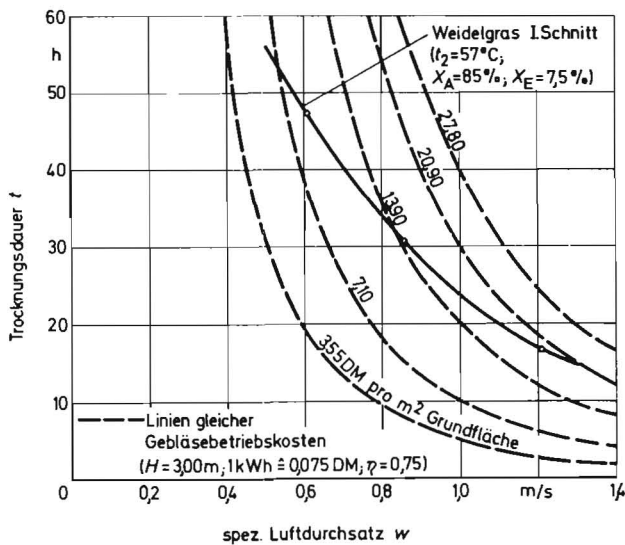


Bild 7: Abhängigkeit der Trocknungsdauer vom spezifischen Luftdurchsatz

Zur Untersuchung des Einflusses des Druckabfalls auf die Trocknung wurden zwei Schüttungen aus gleichen Briketts mit  $w = 1,0$  m/s belüftet. Der bezogene Druckabfall der einen Schüttung betrug dabei 137 mmWS/m, der der anderen Schüttung wurde durch Verdichten künstlich auf 311 mmWS/m erhöht. In Bild 8 sind die Trocknungsverläufe der beiden Schüttungen dargestellt. Während die Wasserabgabe im Anfangsstadium der Trocknung bei beiden nahezu gleich verläuft, wirkt sich der hohe Druckabfall in dem Bereich niedriger Feuchtgrade positiv auf die Trocknungsdauer aus. Da in beiden Fällen die zur Verfügung stehende Wasseraufnahmekapazität der Luft gleich war, bedeutet das, daß die Abgabe des im Brikettinnern vorhandenen Wassers schneller erfolgte und daß die einzelnen Briketts von der Luft in größerem Maße durchströmt wurden. (Die Tatsache, daß die Briketts überhaupt durchströmt werden, ließ sich experimentell nachweisen.) Die Zunahme der Brikettdurchströmung mit der Erhöhung des Druckabfalls glich jedoch nicht den verstärkten Leistungsbedarf aus. So stand einer Trockenzeitverkürzung von 35 % ein um 127 % höherer Druckabfall und damit auch eine entsprechend höhere Gebläseleistung gegenüber.

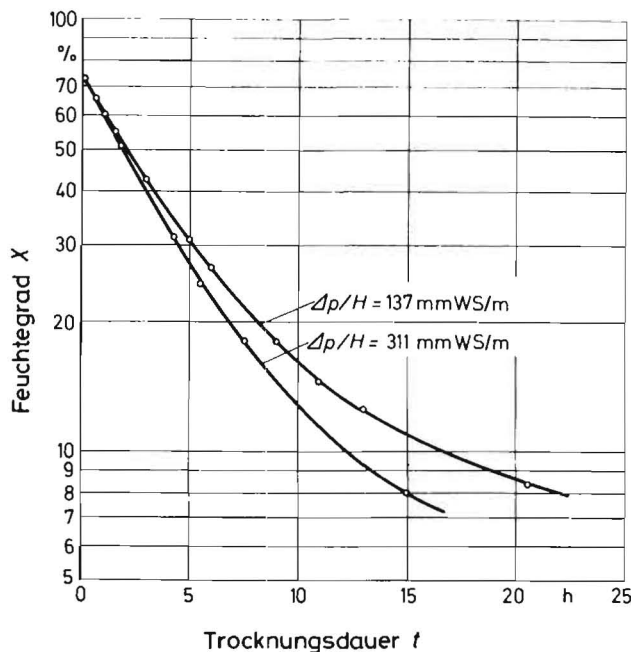


Bild 8: Trocknungsverlauf zweier Wickelbrikettschüttung bei unterschiedlichem Druckabfall

Das bedeutet, daß während des Trocknungsvorganges die Brikettdurchströmung nur den kleineren und die Brikettumströmung den größeren Anteil am Wasserentzug trägt.

In weiteren Versuchen wurde überprüft, ob eine Luftdurchsatzsteigerung auch bei künstlich konstant gehaltenem Druckabfall zu Trocknungszeitverkürzungen führt. Es wurden zwei 1 m hohe Schüttungen mit  $w = 0,74$  und  $w = 1,0$  m/s getrocknet. Durch zusätzliche Verdichtung der einen Schüttung wurde erreicht, daß bei beiden der Druckabfall gleich war. Die Trocknungsdauer war in beiden Fällen nahezu gleich und so ein Einfluß der Luftgeschwindigkeit nicht nachweisbar. Für diese beiden Schüttungen brachte also die höhere Luftgeschwindigkeit weder im Hinblick auf die Trocknungsdauer noch auf die Gebläsebetriebskosten Vorteile. Bei allen höheren Schüttungen hingegen verkürzten höhere Luftdurchsätze die Trocknungszeit, vergrößerten dabei aber die Trocknungskosten.

Da sich weder Druck- noch Luftgeschwindigkeitssteigerungen voll auf die Trocknungszeitverkürzung auswirken, wurde versucht, die Trocknungskosten durch Senkung dieser Daten zu verkleinern. Es zeigt sich jedoch, daß Schüttungen aus Briketts mit einer Trockenmassedichte von  $360 \text{ kg/m}^3$  bei spezifischen Luftdurchsätzen unter  $0,6$  m/s und bei bezogenen Druckabfällen unter  $80 \text{ mmWS/m}$  nicht einwandfrei trocknen und es zur Schimmelbildung in den Briketts, zum Nährstoffabbau und schließlich zum Verderb des Grüngutes kommt.

Die Klärung der Fragen, welcher Luftdurchsatz für weniger hohe Brikettdichten ausreicht und ob eventuell auch kleinere Luftmengen bei künstlich hochgehaltenem Druckabfall eine gute Trocknung gewährleisten, bleibt weiteren Versuchen vorbehalten.

Der oben beschriebene große Anteil der Brikettumströmung am Wasserentzug aus den Briketts legt den Schluß nahe, daß sich Briketts mit einem höheren Oberflächen-Volumen-Verhältnis beziehungsweise kleineren Maßen leichter trocknen lassen. Diese Annahme bestätigte sich in zwei Versuchen. Dabei wurden zwei 1 m hohe Schüttungen aus Briketts unterschiedlicher Länge —  $57,7$  bzw.  $96,4$  mm — aber sonst gleicher Beschaffenheit mit gleichem Luftdurchsatz getrocknet. Die Schüttung aus  $96,4$  mm langen Briketts war in  $29,7$  Stunden und die aus  $57,7$  mm langen Briketts in  $23,6$  Stunden trocken. Die kürzere Trocknungsdauer der Schüttungen mit kürzeren Briketts darf allerdings nicht allein der kleinen Briketlänge zugeschrieben werden, denn der Druckabfall war bei dieser Schüttung um  $40 \%$  höher (der wenn auch geringe positive Einfluß höherer Druckabfälle wurde bereits oben dargestellt).

Zusammenfassend kann über den Einfluß der Trocknungsbedingungen und Briketteigenschaften auf die Trocknungsdauer und Trocknungskosten gesagt werden:

- Verkürzung der Trocknungszeit — Senkung der Trocknungskosten durch: Temperaturerhöhung;
- Verkürzung der Trocknungszeit — Erhöhung der Trocknungskosten durch: Luftmengensteigerung; Druckabfallsteigerung;
- Verlängerung der Trocknungszeit — Erhöhung der Trocknungskosten durch: Brikettdichteerhöhung; Brikettvergrößerung.

### 5. Grenzen und Voraussetzungen für die Briketttrocknung in der Praxis

Die gefundenen Zusammenhänge lassen sich in der praktischen Briketttrocknung nur bis zu vorgegebenen Grenzen zur Senkung der Kosten ausnützen.

So darf die Brikettgröße nicht beliebig reduziert werden. Der Brikettdurchmesser sollte nach Untersuchungen von SCHEFFLER [6] etwa  $80$  mm betragen. Dann erreichen die Wickel eine annehmbare Haltbarkeit und die Brikettiermaschinen einen akzeptablen Durchsatz. Die Briketlänge darf hinsichtlich der Haltbarkeit nicht unter  $60$  mm liegen; es sind Längen von  $80$  mm und mehr anzustreben.

Die Vergrößerung der Brikettdichte beeinflusst die Haltbarkeit der Briketts sehr positiv. Da aber sowohl der Kraftbedarf der Pressen [6] als auch die Trocknungsdauer und -kosten bei Werten über  $360 \text{ kg/m}^3$  sehr rasch mit der Dichte ansteigen, sollte die Wickeldichte etwa  $360 \text{ kg/m}^3$  betragen.

Der zu empfehlende Feuchtegrad des Grüngutes im Brikettierstadium hängt vom Werbeverfahren und von der gewünschten Haltbarkeit der Briketts ab. Beide Faktoren lassen einen Feuchtegrad von  $X = 100 \%$  (Feuchtegehalt  $U = 50 \%$ ) als günstig erscheinen.

Die zur Brikett-Trocknung verwendete Lufttemperatur sollte  $50^\circ\text{C}$  betragen. Die wirtschaftlich wünschenswerten höheren Temperaturen sind im Hinblick auf die Qualität der zu trocknenden Wickelbriketts nicht zulässig. Die lange Trocknungsdauer der Brikettschüttung bewirkt, daß das Halmgut über lange Zeit die Lufttemperatur annimmt; Temperaturen über  $50^\circ\text{C}$  sind dann aber nachteilig [1; 7].

Die Vorwärmung der Trocknungsluft auf  $50^\circ\text{C}$  verstärkt die Anfälligkeit des Welkgutes für Schimmelbildung erheblich. Die Trocknungsdauer der Brikettschüttungen darf 50 bis 60 Stunden nicht übersteigen, wenn ein Schimmeln ausgeschlossen sein und gute Futterqualität erreicht werden soll. Für die oben angegebene Brikettgröße und -beschaffenheit wird dies erreicht, wenn man die spezifische Luftmenge auf mindestens  $0,6 \text{ m/s}$  bemißt und der bezogene Druckabfall in der Schüttung mindestens  $80 \text{ mm WS/m}$  beträgt. Dieser Wert wird bei  $0,6 \text{ m/s}$  in natürlich eingelagerten Brikettschüttungen stets erreicht. Meistens liegt der bezogene Druckabfall dann sogar bei  $100 \text{ mmWS/m}$ .

Mit  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $w = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $\Delta p/H = 100 \text{ mm WS/m}$  sind die Voraussetzungen für eine sichere künstliche Trocknung von Halmgutbriketts mit einer TM-Dichte um  $360 \text{ kg/m}^3$  bekannt, und es bleibt die Frage nach dem Trocknungsverfahren.

Grundsätzlich bieten sich für die Brikett-Trocknung zwei Möglichkeiten an: die Durchlauf- und die Satz-trocknung. Die Durchlauf-trocknung ist dabei energiegünstiger als die Satz-trocknung. Wegen der langen Trocknungsdauer und der noch nicht befriedigenden Schütteeigenschaften der Wickelbriketts wäre allerdings wahrscheinlich ein größerer technischer Aufwand für den Bau von Durchlauf-trocknern für Wickelbriketts notwendig. So muß die Satz-trocknung wahrscheinlich als die praktisch durchführbare und vernünftige Lösung angesehen werden.

## 6. Betriebskosten und Investitionen für die Satz-trocknung von Wickelbriketts

Bei der Satz-trocknung werden die auf die Masse des Trocknungsgutes bezogenen Trocknungskosten stark von der Schütthöhe bestimmt. Besonders groß ist der Einfluß bei langsam trocknenden Gütern und Produkten wie zum Beispiel Halmgutwickelbriketts.

Der Zusammenhang zwischen bezogenen Trocknungskosten, Schütthöhe und Trocknungsdauer läßt sich bei Annahme vereinfachter Zusammenhänge berechnen. Setzt man beispielsweise die in Bild 9 angegebene Feuchtigkeitsverteilung in einer Schüttung während der Trocknung voraus und nimmt folgende Werte an:

$\Delta p/H = 100 \text{ mmWS/m}$ ;  $w = 0,6 \text{ m/s}$ ; Lufterwärmung von 20 auf  $50^\circ\text{C}$ ; Gebläsewirkungsgrad = 0,75; Lufterhitzerwirkungsgrad = 0,8;

Kosten:  $1 \text{ kWh} = 0,075 \text{ DM}$ ,  $10\,000 \text{ kcal} = 0,12 \text{ DM}$ ;  
 $\varrho_{\text{Str}} = 200 \text{ kg/m}^3$ ;  $X_A = 100 \%$ ,  $X_E = 7,5 \%$ ,

so ergeben sich die in Bild 10 angegebenen Abhängigkeiten.

Es zeigt sich, daß das Niveau der Trocknungskosten um so höher liegt, je größer die Zone ist, die die Trocknungsluft durchströmen muß, um mit Wasser gesättigt zu sein. Bei den langsam trocknenden Wickelbriketts und dem anzuwendenden spezifischen Luftdurchsatz von  $w = 0,6 \text{ m/s}$  beträgt

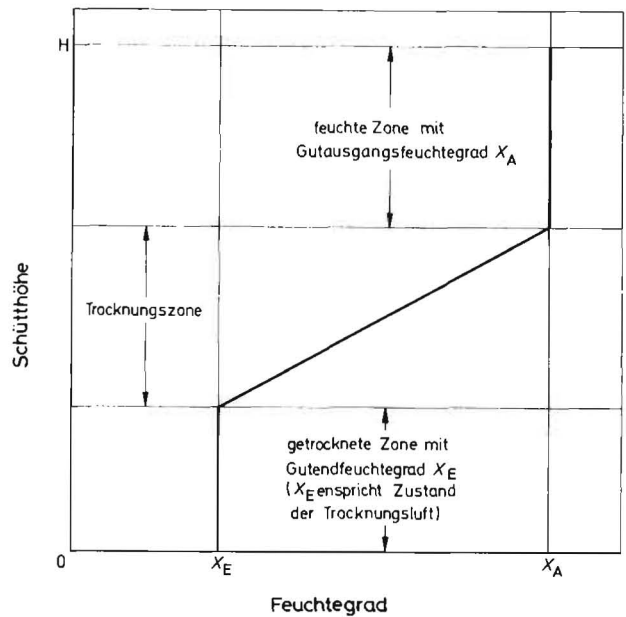


Bild 9: Feuchtegradverteilung in einer Schüttung während der Trocknung

die Trocknungszonehöhe, wie die Lage von Meßpunkten aus praktischen Versuchen in Bild 10 veranschaulicht, ca. 8 m.

Bei dieser großen Trocknungszonehöhe sinken die bezogenen Trocknungskosten mit zunehmender Schütthöhe bis zu Schütthöhen von 2 m sehr stark ab. Bei größeren Schütthöhen wird die Verringerung der Trocknungskosten immer kleiner, und bei Höhen über 3 m ist sie schließlich kaum noch feststellbar. Für die Trocknung von Brikettschüttungen folgt daraus, daß aus Kostengründen die Schütthöhe mindestens 2 m betragen sollte. Die Begrenzung der zulässigen Schütthöhe nach oben erfolgt durch die Qualitätsgrenze, das heißt die maximale zulässige Trocknungszeit. Sie beträgt 50 bis 60 Stunden und erlaubt maximale Schütthöhen von etwa 3 m.

Da also die Schichthöhen bei der Brikett-Trocknung mit 2... 3 m sehr groß gewählt werden müssen, kann nicht — wie bei der Welkheutrocknung und Belüftungstrocknung üblich — der gesamte Lagerraum gleichzeitig als Trockner verwendet werden. Die anfallenden Briketteinzelmengen er-

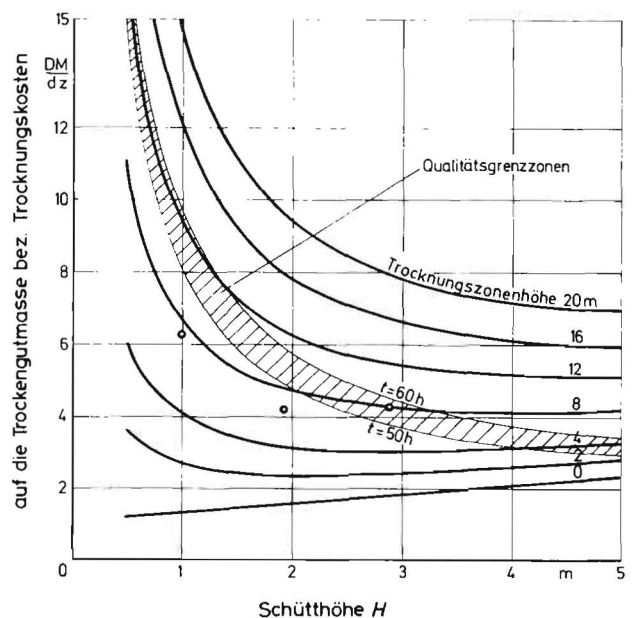


Bild 10: Trocknungskosten in Abhängigkeit von der Trocknungszone- und Schütthöhe

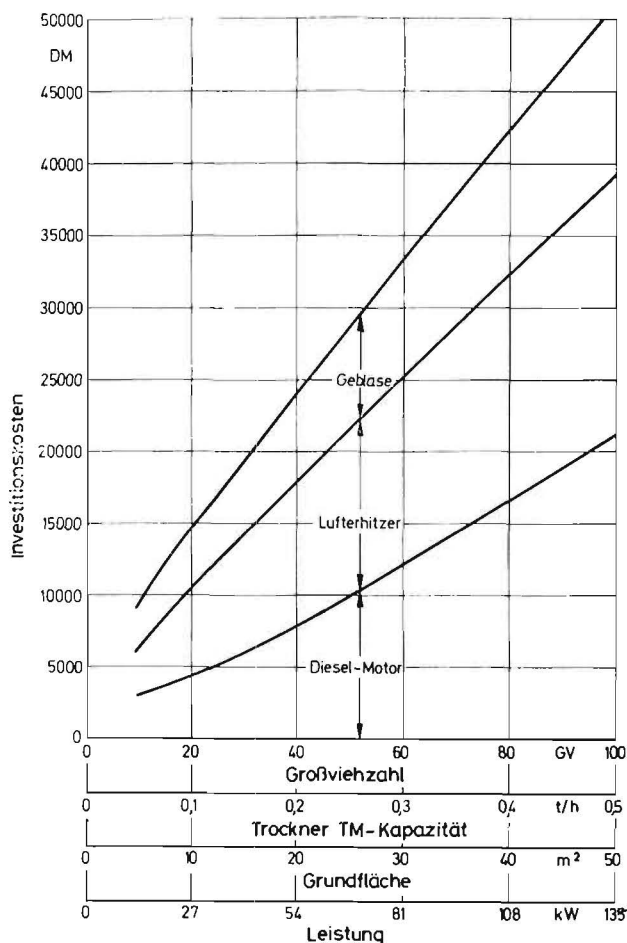


Bild 11: Investitionskosten für Gebläse, Motor und Lufterhitzer bei Satz-trocknern für Wickelbriketts

gäben über die Lagerfläche ausgebreitet zu niedrige Schichten und würden damit sehr hohe Trocknungskosten verursachen. Für die Brikett-Trocknung müssen deshalb kleine Trocknereinheiten geschaffen werden, in die die Briketts in einer 2 . . . 3 m hohen Schicht eingelagert werden. Es erscheint sinnvoll, dazu den für die Briketts vorgesehenen Lagerraum in Trocknungszellen aufzuteilen, die nacheinander befüllt und getrocknet werden. Die Kapazität dieser Zellen und des erforderlichen Lüfters und Lufterhitzers muß dabei der maximalen, anfallenden Briketteinzelmenge angepaßt sein. Diese wäre etwa 0,30 t TM/GV, wenn man 210 Tage ausschließlich Brikettfütterung mit täglich 13,5 kg TM-Aufnahme durch eine Milchkuh beziehungsweise 1,2 GV voraussetzt und annimmt, daß 63 % der gesamten Brikettmenge im ersten Schnitt in fünf gleichen Einzelmengen eingebracht werden. Die Grundflächenkapazität der Zelle müßte dann 0,5 m<sup>2</sup>/GV bei 3 m Schütthöhe und 200 kg/m<sup>3</sup> Lagerdichte betragen. Ausgehend von diesen Zahlen sind in Bild 11 die voraussichtlich notwendigen Investitionskosten für die technischen Aggregate (Gebläse, Lufterhitzer, Dieselmotor) dargestellt.

Geht man von praktischen Verhältnissen aus und nimmt an, daß täglich nur 2,5 kg TM Heu je Kuh verfüttert werden, so ergibt sich für einen 40 ha Betrieb mit 80 Milchkühen eine erforderliche Heumenge von 42 t TM. Bei der gleichen Brikettmenge müßte die Trocknerzelle eine Grundfläche von etwa 8,8 m<sup>2</sup> beziehungsweise eine Kapazität von etwa 88 kg/h haben. Die Trocknungsaggregate für diese Zelle würden rd. 13 000 DM kosten. Der Lagerraum für die gesamte Brikettmenge müßte bei 3 m hoher Einlagerung eine Grundfläche von etwa 70 m<sup>2</sup> haben und würde schätzungsweise 8 500 DM kosten, so daß Gesamtinvestitionen von rd. 21 500 DM aufgebracht werden müßten.

Im Vergleich dazu sind nach Angaben von HELL [8] für die oben angegebene Heumenge bei herkömmlichen Verfahren, wenn Häckselheu verarbeitet wird und die Lagehöhe 5 m beträgt, folgende Lagerflächen und Investitionen erforderlich:

für Bodenheulagerung: rd. 105 m<sup>2</sup> und 13 500 DM,

für Unterdachtrocknung mit Kaltluft: rd. 85 m<sup>2</sup> und 16 500 DM,

für Unterdachtrocknung mit + 6° vorgewärmter Luft: rd. 85 m<sup>2</sup> und 20 500 DM.

So ist festzustellen, daß die Investitionen für neu zu erstellende Brikett-Trocknungsanlagen ungefähr genau so hoch sein werden wie bei Unterdach-Trocknungsanlagen mit Warmbelüftung. Hinsichtlich der reinen Betriebskosten ist die Brikett-Trocknung allerdings teurer als die Belüftungstrocknung. Während man bei der Belüftungstrocknung je nach Luftvorwärmung mit 2,00 bis 3,00 DM/dz TM rechnet, betragen sie bei der Brikett-Trocknung voraussichtlich 4,50 DM/dz TM. Diesen Mehrkosten stehen jedoch Einsparungen bei den Transportkosten und sehr wahrscheinlich eine höhere Futterqualität gegenüber.

## 6. Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß die Trocknung von brikettiertem Welkgut wirtschaftlich durchgeführt werden kann.

Es wurde festgestellt, daß Brikettschüttungen wichtige belüftungstechnische Vorteile besitzen: sie werden leichter und gleichmäßiger von der Trocknungsluft durchströmt und bilden keine „Feuchtenester“. Die Trocknungsdauer von Brikettschüttungen läßt sich durch Steigerung der Trocknungsluftmenge und der Trocknungslufttemperatur verkürzen. Dabei führt die Luftmengensteigerung zu erhöhten und die Temperaturerhöhung zu niedrigeren Trocknungskosten. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Lufttemperatur auf den für die Futterqualität maximal zulässigen Wert von 50°C zu steigern und die Luftmenge so niedrig wie möglich zu wählen. Schüttungen aus Briketts mit einem Anfangsfeuchtegrad von 100 % (U = 50 %) und einer Trockenmassendichte von 360 kg/m<sup>3</sup> müssen mit einer Luftmenge von mindestens 0,6 m/s belüftet werden, wenn Schimmelbildung ausgeschlossen sein soll.

Einen großen Einfluß auf die Trocknungskosten pro Doppelzentner Trockengut hat die Schütthöhe. Die Versuche ergaben, daß die Trocknung von Brikettschüttungen unter den oben genannten Voraussetzungen ohne Risiko und wirtschaftlich möglich ist, wenn die Schütthöhe 2 bis 3 m beträgt.

## Schrifttum

- [1] WIENEKE, F.: Die Halmfüttertrocknung — Stand und Aussichten. Mitteilungen der DLG 85 (1970) S. 886—890
- [2] WIENEKE, F.: Untersuchungen zur Erklärung und Beseitigung von Wickelerscheinungen an umlaufenden Maschinenteilen. Landtechnische Forschung 7 (1957) S. 1—8
- [3] HOLZE, H.: Untersuchungen über den Strömungswiderstand landwirtschaftlicher Halmgüter. Diss. TU Braunschweig 1969
- [4] SEGLER, G.; SCHEUERMANN, A. und G. ULREICH: Untersuchungen zur Entwicklung der Welkheutrocknung. Landtechnische Forschung 18 (1970) S. 76—83
- [5] TÜRK, E.: Zur Belüftungstrocknung von Welkgutbriketts. Deutsche Agrartechnik 18 (1968) S. 438—439
- [6] SCHEFFLER, E.: Grundsätzliche Gesichtspunkte zur Gestaltung von Wickelbrikettiermaschinen. Grundlagen der Landtechnik 20 (1970) S. 8—10, S. 47—49 und S. 77—81
- [7] ULREICH, G.: Der Luftbedarf bei der Belüftungstrocknung von Heu unter Berücksichtigung der Atmungs vorwärme und der Nährstoffverluste. Diss. Landwirtschaftliche Hochschule Hohenheim 19
- [8] HANF, C. H.; HELL, K. W. und H. HONIG: Produktionsverfahren in der Grünlandbewirtschaftung und ihre betriebstechnische Einordnung. Landbauforschung Volkenrode, Sonderheft Nr. 5, 1970