

Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut mit hohem Normaldruck

Von Hans Jürgen Matthies und Winfried Busse, Braunschweig

Professor Dr.-Ing. Georg Segler zum 60. Geburtstag

Die im Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig auf dem Gebiete des Brikettierens von Halmgut mit Normaldruck gewonnenen Ergebnisse werden ausführlich erörtert. Analytische Betrachtungen über die Zusammenhänge zwischen Kolbendruck und Preßdichte führen zur Entwicklung einer neuen Verdichtungs-funktion; sie gibt zusammen mit den durch Preßtopfversuche gewonnenen Erkenntnissen einen geschlossenen Überblick über einen weiten Druck- und Feuchtegehaltbereich. Die erörterten Verfahren für die Berechnung von Seitendruck, Querdruckzahl und Verdichtungsarbeit sowie die zugehörigen Stoffwerte stellen eine wesentliche Vervollkommnung der Kenntnisse auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut dar.

Das Brikettieren von Halmgut ist gerade im vergangenen Jahre auch in Deutschland viel diskutiert worden. Das besondere Interesse galt dabei dem sogenannten Wickel- oder Radialdruckverfahren [1], das im Gegensatz zum Normaldruckverfahren, **Bild 1**, erlaubt, Halmgut mit einem beliebig hohen Feuchtegehalt bei durchaus erträglichem Leistungsaufwand zu haltbaren

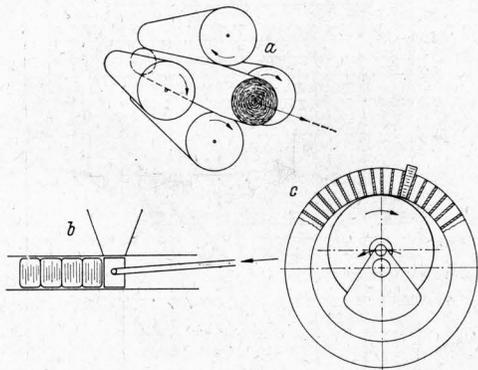


Bild 1. Vergleich der Arbeitswerkzeuge für Radial- und Normaldruckverfahren.

- a Radialdruckverfahren
- b Normaldruckverfahren: Preßkolben mit Zylinder
- c Normaldruckverfahren: Preßrolle mit am Umfang angeordneten Preßkanälen

Briketts zu verdichten. Während sich das Wickelverfahren jedoch noch in den Anfängen seiner Entwicklung befindet, sind die nach dem Normaldruckverfahren arbeitenden Aufsammlerbrikettiermaschinen schon in einer gewissen Stückzahl hergestellt und eingesetzt worden. Daher sind auch alle bisher veröffentlichten Untersuchungen und alle auf dem Gebiete des Brikettierens von Halmgut bisher gewonnenen Erfahrungen mit Maschinen und Vorrichtungen gemacht worden, die nach dem Prinzip des Normaldruckes arbeiten. Obwohl diesen Maschinen für die deutschen und europäischen Verhältnisse keine praktische Bedeutung zugemessen werden kann [2], sind die mit dem Normaldruckverfahren gewonnenen Versuchsergebnisse doch von großem Interesse, weil sie einen recht guten Einblick in das Verhalten von Halmgut unter hohem Druck geben und weil die mit Normaldruckbriketts erzielten Einsatzerfahrungen die

Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Matthies ist Ordinarius für Landmaschinen an der Technischen Hochschule Braunschweig und Direktor des dortigen Institutes für Landmaschinen. Dr.-Ing. Winfried Busse war wissenschaftlicher Assistent in diesem Institut und ist in der Entwicklungsabteilung der Maschinenfabrik Gebr. Claas GmbH, Harsewinkel, tätig.

praktischen Verwendungsmöglichkeiten auch der Wickelbriketts erkennen lassen. Es soll daher zunächst über die Ergebnisse neuerer Laborversuche mit im Normaldruckverfahren verdichtetem Halmgut berichtet werden, die überwiegend am Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig [3], aber auch in Amerika [4] erarbeitet worden sind. In einem anschließenden kurzen Beitrag wird ferner über die Ergebnisse von Versuchen berichtet, die im Rahmen eines größeren Einsatzes von Brikettiermaschinen in Amerika [5; 6] gewonnen wurden.

In dem genannten Institut werden als Schwerpunkt fünf in sich geschlossene Forschungsarbeiten durchgeführt, in denen in verschiedenen Druckbereichen die Zusammenhänge zwischen den aufzuwendenden Verdichtungskräften und den durch sie erzielbaren Preßdichten und eine Reihe damit zusammenhängender Stoffeigenschaften ermittelt werden sollen. Die erste, gerade abgeschlossene Arbeit über die Verdichtung von Halmgütern unter hohen Normaldrücken gibt erstmalig in einem sehr weiten Druckbereich Einblick in die Zusammenhänge zwischen Preßdruck und Preßdichte unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtegehaltes des Gutes. Sie bietet darüber hinaus neben den zugehörigen Stoffbeiwerten umfangreiche Unterlagen für die Berechnung und die Entwicklung von Verdichtungs Werkzeugen sowie für deren praktischen Einsatz. Die im folgenden wiedergegebenen Ergebnisse wurden aufgrund theoretischer Überlegungen und durch ergänzende Preßtopfversuche gewonnen.

Die Verdichtungsfunktion

Verdichtet man nach **Bild 2** eine bestimmte Menge getrockneten Halmgutes mit etwa 20% Feuchtegehalt in einem Preß-

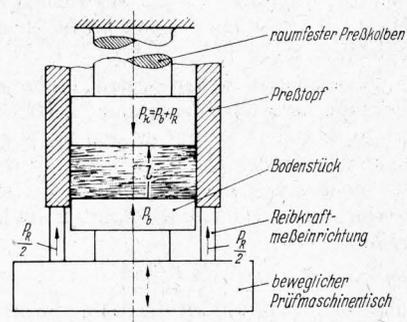


Bild 2. Schema der Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Verdichtungsfunktion.

P_b = Bodenkraft; P_R = Reibkraft; P_k = Kolbenkraft

topf, so folgt die Verdichtungsfunktion etwa dem in **Bild 3** angegebenen Verlauf A-B-D-K-R. Während der Verlauf A-B-D-K durch die neuentwickelte Gleichung

$$p_k = e^{b'_0} + b'_1/e + b'_2 e \quad (1)$$

ziemlich gut wiedergegeben werden kann, besteht keine Möglichkeit, eine Gleichung zu finden, die auch den Bereich K-R mit einschließt. Da Gl. (1) unter Berücksichtigung des Feuchtegehaltes später in Gl. (6) übergeführt werden wird, sollen hier und in den folgenden Gleichungen für die Faktoren b'_0 , b'_1 usw. noch keine Zahlenwerte angegeben werden. Für die praktische Rechnung empfiehlt es sich außerdem, den Bereich A-B-D-K in zwei Teilbereiche zu unterteilen und die Zusammenhänge

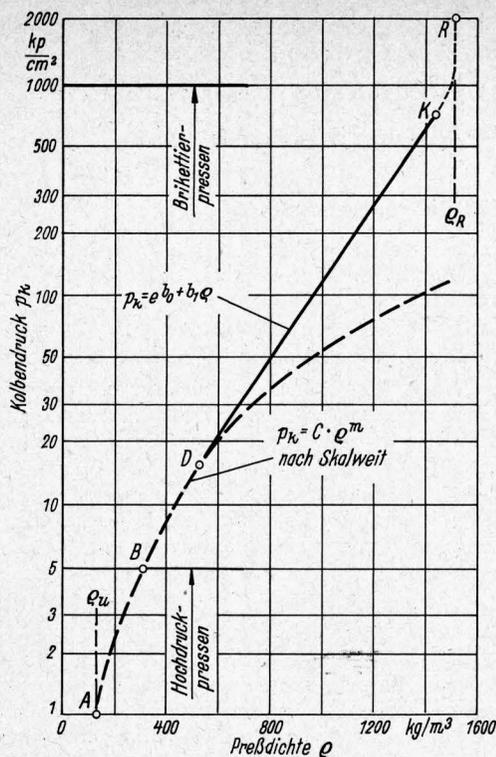


Bild 3. Analytisch ermittelte Verdichtungsfunktion und Vergleichsfunktion für den Bereich niedriger Drücke nach Skalweit [7].

zwischen dem Preßdruck und der Preßdichte für diese Bereiche mit zwei verschiedenen Gleichungen zu berechnen.

Für den Bereich A-B, d. h. also in dem für Hochdruckpressen gültigen Druckbereich bis zu einem Kolbendruck von etwa 5 kp/cm^2 , gilt zunächst das von Skalweit [7] schon 1938 entwickelte Potenzgesetz

$$p_k = C q^m \quad (2),$$

in dem C und m als Stoffkonstanten zu betrachten sind. In diesem Verdichtungsereich und noch etwas darüber hinaus bis zu einem Kolbendruck von etwa 15 kp/cm^2 (Punkt D) müssen im Preßtopf vorwiegend kleinere Biege- und Knickwiderstände im Halmgut, vor allem aber Reibungswiderstände zwischen Gut und Wand und innerhalb des Gutes, überwunden werden. Die Reibungswiderstände erfordern hier offensichtlich den größten Teil der Verdichtungskraft.

Wie die Untersuchungen weiter zeigten, lassen sich die Zusammenhänge zwischen Kolbendruck und Preßdichte etwa von einem Kolbendruck von 15 kp/cm^2 an und bei trockenem Gut (Feuchtegehalt aber größer als 15%) nicht mehr durch das Skalweitsche Potenzgesetz darstellen, sondern sie gehorchen bis zu Drücken von etwa 1000 kp/cm^2 (Knickpunkt K) der Exponentialgleichung

$$p_k = e^{b_0} + b_1 e \quad (3).$$

In diesem Bereich D-K werden die Halme nicht nur weiter geknickt und zerbrochen, sondern es treten auch elastische und plastische Verformungen, d. h. Ortsveränderungen von einzelnen Halmgutteilchen untereinander, auf. Die eigentlichen Verdichtungskräfte bilden dabei den größten Teil der aufzuwendenden Gesamtkraft, während verhältnismäßig geringere Reibkräfte vorhanden sind. Erst in diesem Brikettierbereich kann man das regellos eingefüllte Halmgut — wie in früheren Arbeiten vorausgesetzt — in guter Näherung als isotrop und homogen bezeichnen, und zwar um so mehr, je größer seine Dichte ist. Es bleiben aber auch in diesem Bereich vermutlich noch interzelluläre Hohlräume erhalten, aus der die Luft erst nach einer gewissen Zeit entweichen kann. Infolge dieses allmählichen Luftaustrittes und infolge der Tatsache, daß für die Deformation des Halmgutes bei höherer Verdichtungsgeschwindigkeit auch größere Kräfte notwendig sind, muß der Verlauf der Verdichtungskurve einem gewissen Geschwindigkeitseinfluß unterworfen sein, der in einer zur Zeit noch laufenden Arbeit genauer untersucht wird.

Von dem als Knickpunkt bezeichneten Punkt K (mit der entsprechenden Dichte q_k) ab lassen sich die in den Gln. (1) und (3) wiedergegebenen Exponentialgesetze nicht mehr anwenden. Dieser Bereich dürfte aber beim Brikettieren nicht mehr von Interesse sein, da eine Erhöhung der Preßkraft kaum noch eine Vergrößerung der Dichte zur Folge hat. Je mehr man sich der die Reindichte des Halmgutes darstellenden Geraden q_R nähert, um so mehr verwandelt sich das Dreistoffsystem Trockenmasse/Flüssigkeit/Luft in das praktisch inkompressible Zweistoffsystem Trockenmasse/Flüssigkeit. Zwischen den geschilderten einzelnen Verdichtungsphasen gibt es keine festen Grenzen; sie gehen anscheinend fließend ineinander über. Lediglich an der Übergangsstelle von der durch Gl. (3) wiedergegebenen Verdichtungskurve in die Gerade für die Reindichte q_R kann man für die untersuchten Güter nach den bisherigen Versuchsergebnissen einen je nach Feuchtegehalt mehr oder weniger deutlichen Knickpunkt erkennen. Die früher im Bereich unter 5 kp/cm^2 festgestellten Knickpunkte konnten jedoch durch die eigenen Versuche nicht bestätigt werden.

Besonders interessant ist der in seiner Gesamttendenz bisher noch nicht bekannte Einfluß, den der Feuchtegehalt des Halmgutes auf den Verlauf der Verdichtungskurve hat. Die in Bild 4 wiedergegebenen schematischen Kurven geben einen guten Einblick in die Verhältnisse. Wie sich auch mathematisch leicht zeigen läßt, wird die Verdichtungskurve bei niedrigen Drücken unter sonst gleichen Verhältnissen um so näher an der Linie für die Wasserdichte ($q_{F1} = 1000 \text{ kg/m}^3$) liegen, je höher der Feuchtegehalt des Gutes ist. Mit einem bestimmten Kolben-

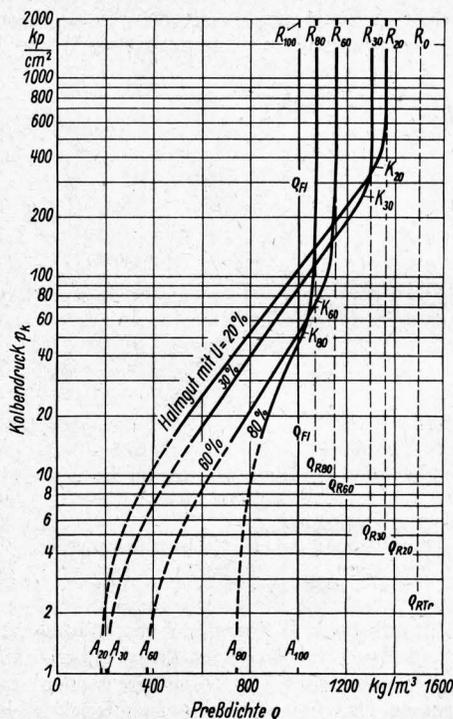


Bild 4. Schematische Darstellung der Verdichtungsfunktion für Halmgüter mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

q_{F1} = Wasserdichte; q_R = Reindichte des Halmgutes

druck wird man also eine um so höhere Preßdichte erzielen, je höher der Feuchtegehalt des Halmgutes ist. Es lag nicht im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen, diesen unteren Druckbereich zwischen 2 und 15 kp/cm^2 genauer zu beleuchten. Daher sollen hier weder die Lage der Anfangspunkte A_0 bis A_{80} noch der absolute Verlauf des gestrichelt gezeichneten Teils der Kurven als verbindlich angesehen werden, sondern nur die Tendenz des Feuchteinflusses. Es sei hier aber erwähnt, daß man für die praktische Rechnung auch in diesem Bereich den Einfluß des Feuchtegehaltes berücksichtigen kann, indem man Gl. (2) umwandelt zu

$$p_k = \frac{C'}{U} q^m \quad (4).$$

Darin bedeuten U den Feuchtegehalt (hier als Zahlenwerte zwischen 0 und 1 einzusetzen) und ρ die gewünschte Dichte in kg/m^3 . Für die Stoffkonstanten C' und m können nach *Sacht* [8] die folgenden Werte eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} \text{Wiesengras } C' &= 5 \cdot 10^{-7}; m = 2,49 \\ \text{Luzerne } C' &= 75 \cdot 10^{-7}; m = 2,10. \end{aligned}$$

Wie man in Bild 4 leicht erkennen kann, ergibt sich im oberen Druckbereich ein umgekehrtes Verhalten wie bei niedrigen Drücken. Bei einem bestimmten Preßdruck wird die erzielbare Preßdichte hier um so kleiner, je höher der Feuchtegehalt des Halmgutes ist. Die Dichte ist hier auf der einen Seite begrenzt durch die Dichte des als inkompressibel zu betrachtenden reinen Wassers ($\rho_{\text{Fl}} = 1000 \text{ kg/m}^3$) und durch die höhere Reindichte der ebenfalls als inkompressibel zu betrachtenden Trockenmasse des Halmgutes (hier angenommen $\rho_{\text{RTr}} = 1500 \text{ kg/m}^3$). Die Reindichte eines Halmgutes bei beliebigem Feuchtegehalt liegt also zwischen diesen beiden Geraden, und sie kann mit Hilfe der Gleichung

$$\rho_{\text{RU}} = \frac{\rho_{\text{RTr}}}{1 + U \left(\frac{\rho_{\text{RTr}}}{\rho_{\text{Fl}}} - 1 \right)} \quad (5)$$

bestimmt werden. Mit der Lage der Kurven im oberen und im unteren Druckbereich ist der Verlauf der Verdichtungsfunktion bei verschiedenem Feuchtegehalt festgelegt. Wie aus Bild 4 zu entnehmen ist, ist die im Preßtopf maximal zu erzielende Dichte im Brikettierbereich also um so höher, je niedriger der Feuchtegehalt des Gutes ist. Die Maximaldichte ist auch hier wieder durch die Lage des Knickpunktes (K_{20} , K_{30} usw.) gegeben, der — wie Bild 5 zeigt — im wesentlichen vom Kolbendruck und vom Feuchtegehalt bestimmt wird.

Berücksichtigt man den Feuchtegehalt, so kann man für den Bereich von 15 kp/cm^2 an (Bereich D-K in Bild 3) den Preßdruck in Abhängigkeit von der Dichte wie folgt berechnen:

$$p_{\text{K}} = e_1(c_0 + c_1 U) + (c_2 + c_3 U) e \quad (6)$$

Darin ist der Feuchtegehalt U wieder als Feuchtegehalt zwischen 0 und 1 und ρ in kg/m^3 einzusetzen. Die Stoffkonstanten c_0 , c_1 , c_2 und c_3 können für die untersuchten Güter nach **Tafel 1** eingesetzt werden. Bei der Rechnung mit dieser Gleichung ist zu

beachten, daß sie entsprechend dem oben Gesagten nur für Drücke über 15 kp/cm^2 und für die angegebenen Bereiche für Feuchtegehalt und Halmgutdichte gilt. Insbesondere darf sie nur für den Kurvenbereich bis zum Knickpunkt verwendet werden.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde eine Reihe weiterer Größen untersucht, um ihren eventuellen Einfluß auf die Verdichtungsfunktion zu ermitteln. Es zeigte sich, daß weder die Querschnittsgröße (im Bereich von 20 bis 100 cm^2) und die Querschnittsform der Preßwerkzeuge noch die Häcksellänge (im Bereich von über 20 bis 40 mm) einen merklichen Einfluß auf die Verdichtungsfunktion auszuüben vermögen. Unterschiedliche Füllmengen hatten im Bereich von $1,5 \text{ g/cm}^2$ bis 4 g/cm^2 Preßkanalquerschnitt ebensowenig einen Einfluß wie die vorherige Bearbeitung des Halmgutes mit einer Stengelquetschmaschine.

Tafel 1. Koeffizienten für die Verdichtungsfunktion nach Gleichung (6).
(gültig für $p_{\text{K}} > 15 \text{ kp/cm}^2$, $e < e_{\text{K}}$, $v \approx 0,004 \text{ m/s}$)

	c_0	c_1	c_2	c_3	Gültig bei			
1. Schnitt								
Weidelgras	0,98	-5,75	$4,05 \cdot 10^{-3}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$	U	0,15	0,25	0,45
Rotklee	1,25	-6,5	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$				
Luzerne	2,05	-6,4	$3,35 \cdot 10^{-3}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	bis e_{K}	1460	1380	1200
2. Schnitt								
Weidelgras	1,15	-4,6	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	U	0,15	0,25	0,45
Rotklee	1,35	-5,05	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$				
Luzerne	1,60	-6,15	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	bis e_{K}	1330	1280	1170

Die verbleibende Dichte

Für die Praxis des Brikettierens interessiert nun aber nicht so sehr die in den Preßwerkzeugen maximal zu erreichende Dichte des Halmgutes — wie sie durch die oben beschriebenen Verdichtungsfunktionen wiedergegeben wird — sondern vor allem die nach dem Ausstoßen und nach dem Expandieren der Briketts noch verbleibende Dichte. Wie die Versuche ergaben, ist sie leider sehr viel geringer als die Ausgangsdichte vor dem Ausstoßen. Bild 6 zeigt ein Beispiel für diesen Dichteabfall, der selbst bei einer sehr hohen Ausgangsdichte zu erwarten ist. Die Dichte nimmt schon unmittelbar nach dem Entlasten, also noch im Preßtopf, sehr stark ab, und sie kann schon kurze Zeit später, besonders bei sehr feuchtem Gut, Werte annehmen, die

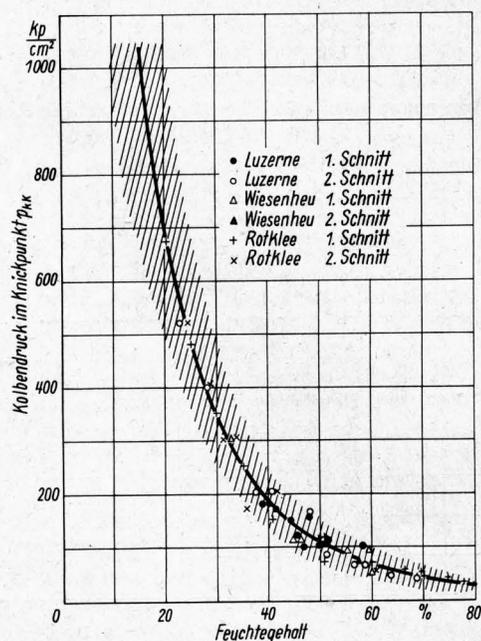


Bild 5. Kolbendruck im Knickpunkt K in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

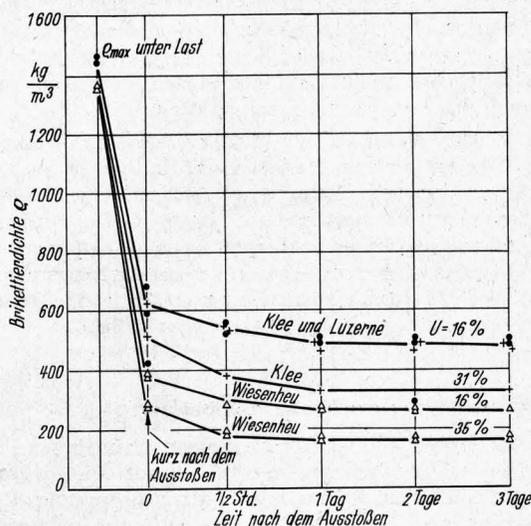


Bild 6. Dichteabnahme von Briketts nach der Entlastung durch die Preßwerkzeuge.

Füllmenge $M_0/F = 1,5 \text{ g/cm}^2$ konstantes Klima nach der Entlastung:
Häcksellänge 5 cm rel. Luftfeuchte 70%
 $p_{\text{Kmax}} = 800 \text{ kp/cm}^2$ Temperatur 25°C

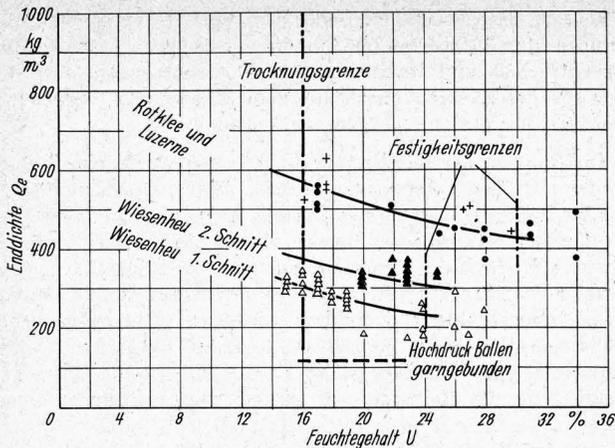


Bild 7. Grenzbereiche für das Brikettieren von Halmgut mit Normaldruck-Werkzeugen.
 $p_{\text{max}} = 450 \text{ kp/cm}^2$; $F = 100 \text{ cm}^2$

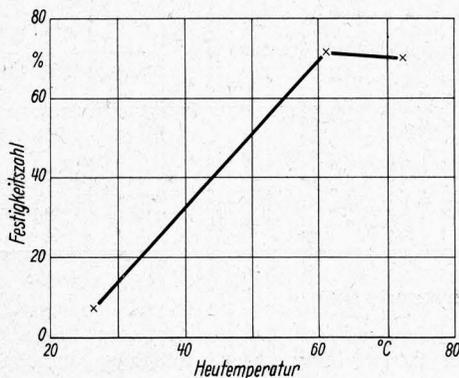


Bild 8. Erhöhung der Brikettfestigkeit durch Erwärmen des Preßzylinders nach Reece [4].
 Luzerneheu, Feuchtegehalt 13 bis 16%, Dichte 500 bis 550 kg/m^3

nicht mehr ausreichen, um den Briketts die für ihre weitere Verwendung nötige Festigkeit zu erhalten. Daraus ergeben sich für die verschiedenen Güter obere Grenzwerte für den Feuchtegehalt, bei deren Überschreiten keine haltbaren Briketts mehr zu erzielen sind. **Bild 7** zeigt diese Grenzwerte zusammen mit der unteren Grenzlinie, bis zu der das Gut unter unseren klimatischen Verhältnissen überhaupt herabgetrocknet werden kann. Man erkennt aus dieser Darstellung besonders deutlich den sehr engen Bereich des Feuchtegehaltes, in dem das Normaldruckverfahren angewendet werden kann. Er ist mitentscheidend für die geringen Aussichten auf eine weitere Verbreitung dieses Verfahrens unter europäischen Verhältnissen.

Alle eigenen Versuche, mit Hilfe verbesserter Werkzeugformen oder mit anderen Methoden die Haltbarkeit auch von Briketts aus feuchtem Halmgut zu erhöhen, brachten keine bemerkenswerten Erfolge. Es können in diesem Zusammenhang jedoch neuere amerikanische Versuche von Reece [4] erwähnt werden, der bei trockenem Gut eine wesentliche Steigerung der Brikettfestigkeit erzielen konnte, wenn er den letzten Teil des Preßzylinders auf etwa 60 bis 70°C erwärmte, **Bild 8**.

Seitendruck, Querdruckzahl, Reibbeiwerte

Für die Entwicklung und für die Dimensionierung von Preßwerkzeugen ist die Kenntnis der seitlich auf den Preßkanal wirkenden Kräfte und der mit ihnen zusammenhängenden Reibbeiwerte von besonderem Interesse. Für homogene und isotrope Werkstoffe berechnet man in der Mechanik den Seitendruck p_s unter Verwendung der Querzahl

$$\nu = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_l} = \frac{\text{Querdehnung}}{\text{Längsdehnung}}$$

mit Hilfe folgender Gleichung aus dem Längsdruck:

$$p_s = \frac{\nu}{1 - \nu} p_l$$

Da man beim Verdichten von Halmgut aber keine konstante Querzahl voraussetzen kann und da Querzahlbetrachtungen hier nur möglich sind, wenn man es mit Druckspannungen zu tun hat, soll hier mit einer sogenannten Querdruckzahl ν_d gerechnet werden. Schon aus analytischen Überlegungen kann man folgern, daß die Querdruckzahl — ausgehend vom Bereich niedriger Drücke — mit zunehmender Dichte ansteigen und dabei mit zunehmendem Feuchtegehalt asymptotisch den Wert 0,5 erreichen muß, der für Wasser von der Dichte $\rho_{\text{FI}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ gilt. Der Anstieg der Querdruckzahl wird infolge der Fähigkeit der Halme, Druckspannungen zu übertragen, schon bei geringen Seitendrücken, d. h. links der Linie für $\rho_{\text{FI}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, erfolgen und um so steiler verlaufen, je höher der Feuchtegehalt des Halmgutes liegt, **Bild 9**. Ferner wird der Höchstwert für die Querdruckzahl sich um so mehr dem Wert 0,5 nähern, je höher der Feuchtegehalt des Gutes ist. Auch die in **Bild 10** wiedergegebenen Versuchsergebnisse zeigen diese Zusammenhänge für den Dichtebereich von etwa 300 kg/m^3 an. Man erkennt deutlich den Anstieg der Querdruckzahl mit zunehmender Dichte und auch den geschilderten Einfluß des Feuchtegehaltes.

Mit der aus **Bild 10** zu entnehmenden Querdruckzahl kann nun der im Preßzylinder wirkende Seitendruck in Abhängigkeit vom Längsdruck, d. h. vom Kolbendruck p_k , mit der Gleichung

$$p_s = \frac{\nu_d}{1 - \nu_d} p_k \quad (7)$$

errechnet werden. Wenn man berücksichtigt, daß Halmgut nur bis zu einem Feuchtegehalt von 25% brikettiert werden kann, so ergibt sich für den Brikettierbereich eine Querdruckzahl, die zwischen etwa 0,35 und 0,50 liegt. Für den Bereich $\rho > 800 \text{ kg/m}^3$ und $U < 0,7$ kann man sie überschlägig auch mit Hilfe der Formel

$$\nu_d = 0,38 + 0,17 U \quad (8)$$

bestimmen.

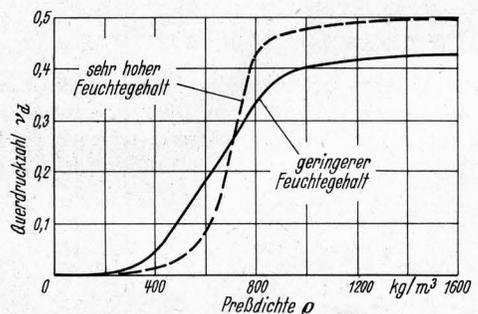


Bild 9. Angenommener Verlauf der Querdruckzahl in Abhängigkeit von der Preßdichte.

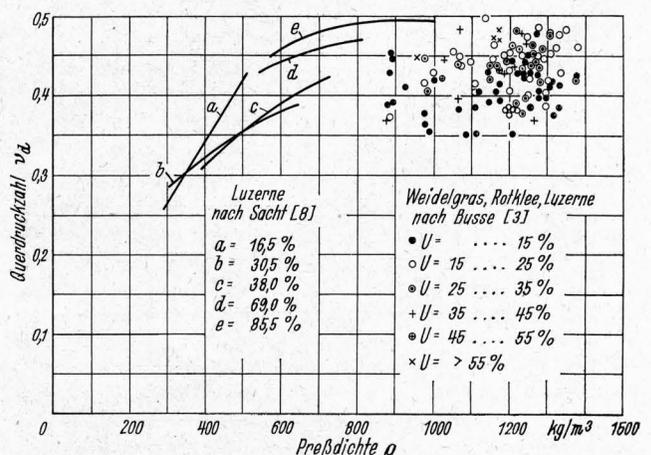


Bild 10. Querdruckzahlen ν_d in Abhängigkeit von Preßdichte und Feuchtegehalt.

Verlauf und Größe der Reibbeiwerte sind in **Bild 11** dargestellt. Man erkennt aus der Lage der stark streuenden Meßpunkte, daß der Haftreibbeiwert bei sehr geringem Feuchtegehalt nahezu unabhängig vom Seitendruck ist, lediglich bei sehr hohen Seitendrücken tritt ein plötzliches Absinken des Haftreibbeiwertes ein, sobald der austretende Zellsaft eine Schmierung bewirkt. Bei höherem Feuchtegehalt ist dagegen eine stark abfallende Tendenz des Haftreibbeiwertes schon bei geringerem Seitendruck sichtbar.

Wenn auch für die technische Anwendung des Brikettierverfahrens die größten Reibbeiwerte, also die Haftreibbeiwerte, zugrunde gelegt werden müssen, so ist für die Beurteilung des gesamten Verdichtungsvorganges doch auch die Kenntnis der Gleitreibbeiwerte erforderlich. Schon bei verhältnismäßig geringen Seitendrücken und besonders bei hohen Feuchtegehalten erkennt man in **Bild 12** einen recht steilen Abfall der Kurven für den Gleitreibbeiwert. Er ist auch hier wieder mit dem Saftaustritt aus den Zellen der Halme zu erklären. Bei trockenem Gut reicht der aus den Zellen austretende Saft für eine Schmierung nicht mehr aus, so daß hier kein nennenswertes Absinken des Gleitreibbeiwertes mehr eintritt. Da bei der Ermittlung der Reibbeiwerte alle für die Brikettierung in Frage kommenden Halmgüter und auch deren wichtigste Zustände erfaßt wurden, stellen die in **Bild 11** und **12** wiedergegebenen Werte ausreichende Unterlagen für alle praktischen Berechnungsfälle dar.

Die Verdichtungsarbeit

Im Gegensatz zu Feldmaschinen, bei denen bekanntlich ein sehr hoher Arbeitsanteil für das Verschieben bzw. das Ausschieben der Preßlinge gebraucht wird, handelt es sich bei den in Preßtopfversuchen ermittelten Energiebeiträgen im wesentlichen um die reine Verdichtungsarbeit. Die auf die Füllmenge bezogene Verdichtungsarbeit im Brikettierbereich läßt sich errechnen nach der Gleichung

$$\frac{A_v}{M_0} = e^{b_0} b_1 \int_{b_1 \rho_u}^{b_1 \rho_{\max}} \frac{e^{b_1 \rho}}{b_1^2 \rho^2} d\rho \quad (9)$$

darin ist $b_0 = c_0 + c_1 U$
 $b_1 = c_2 + c_3 U$.

Zur Berechnung der Verdichtungsarbeit aus dieser Gleichung benutzt man zweckmäßigerweise eine in [3] angegebene Tafel, in der die Werte für den Integralausdruck mit der Abkürzung $b_1 \rho = z$ in Abhängigkeit von der Dichte dargestellt sind. Noch einfacher kann man den voraussichtlichen Betrag für die Verdichtungsarbeit dem Diagramm in **Bild 13** entnehmen, in dem die Verdichtungsarbeit für die untersuchten Güter in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und vom maximalen Preßdruck $p_{k \max}$ dargestellt ist und dessen Werte durch Versuche bestimmt wurden. In dieses Diagramm sind auch die Kurven für den Bereich der Hochdruckpressen (1 bis 4 kp/cm^2) mit aufgenommen worden.

Es muß beachtet werden, daß in diesen Betrachtungen keine Aussagen über die Ausschiebbarkeit enthalten sind, die erfahrungsgemäß etwa das 1,5- bis 3fache der reinen Verdichtungsarbeit ausmacht [9]. Alle Versuche, die Ausschiebbarkeit in Normaldruckpressen durch die Wahl günstigerer Verdichtungswerkzeuge oder durch andere Methoden zu verringern oder zu vermeiden, sind bisher ohne Erfolg gewesen. Das ist vermutlich vor allem auf die Tatsache zurückzuführen, daß das Halmgutvolumen von der Aufgabe bis zum Brikett etwa um das 20fache verkleinert werden muß, im Gegensatz z. B. zu Kohle, wo man mit einer Volumenverkleinerung von etwa 2:1 rechnet. Bei der Kohlebrikettierung benötigt man bei der Benutzung von Walzenpressen infolge des Einsparens der Ausschiebbarkeit etwa 4- bis 5 mal weniger Energie als beim Strangpressen.

Zusammenfassung

Obwohl das Brikettieren von Halmgut mit Normaldruck für europäische Verhältnisse — anders als in Amerika — kaum Bedeutung erlangen wird, geben die mit diesem Verfahren gewonnenen Versuchsergebnisse doch einen recht interessanten Einblick in das Verhalten des Halmgutes unter hohem Druck.

Daher werden die im Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig gewonnenen Erkenntnisse auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut ausführlich erörtert.

Die analytischen Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Kolbendruck und Preßdichte führen zur Entwicklung einer neuen Verdichtungsfunktion, und sie geben zusammen mit den im Rahmen von Preßtopfversuchen gewonnenen Erkenntnissen einen geschlossenen Überblick über einen weiten Druckbereich. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Einfügung auch des Feuchtegehaltes in die Betrachtungen und in die Verdichtungsfunktion.

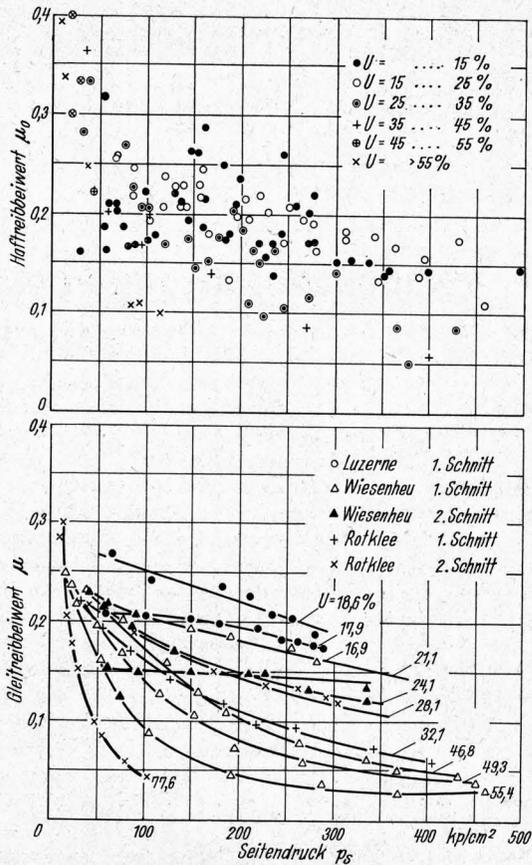


Bild 11 und 12. Haft- und Gleitreibbeiwerte in Abhängigkeit von Seitendruck und Feuchtegehalt (Reibpaarung Stahl/Halmgut).

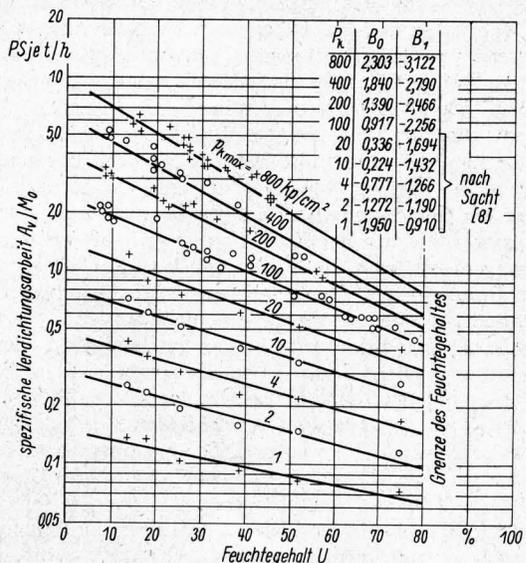


Bild 13. Spezifische Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Preßdruck, gemessen im Preßtopf für Luzerne, Rotklee und Wiesenheu (jeweils erster und zweiter Schnitt).

Die sehr große Spanne zwischen der im Preßtopf erzielbaren Preßdichte und der nach Ausstoß und Expansion der Briketts verbleibenden Dichte läßt die Schwierigkeiten erkennen, die das Normaldruckverfahren in der Praxis mit sich bringt. Die erörterten Methoden für die Berechnung von Seitendruck, Querdruckzahl und Verdichtungsarbeit und die Angaben der hierfür notwendigen Stoffwerte stellen eine wesentliche Ergänzung der auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut bisher noch sehr lückenhaften Unterlagen dar.

Schrifttum

- [1] *Matthies, H. J.*: Heubrikettieren — Stand und Aussichten. Landtechn. **20** (1965) H. 19, S. 662/68.
 [2] *Schoedder, F.*, und *W. Busse*: Einsatzversuche mit einer Aufsammler-Brikettierpresse. Landtechn. **19** (1964) H. 3, S. 57/62.

- [3] *Busse, W.*: Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschr. Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 1. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
 [4] *Reece, F. N.*: Temperature, pressure and time relationships in forming dense hay wafers. ASAE-Paper Nr. 65-638.
 [5] *Dobie, J. B., Curley, R. G., Ronning, M.* und *P. S. Parsons*: Feeding and economic value of wafered hay for dairies. ASAE-Paper Nr. 65-640.
 [6] *Gustafson, B. W.*, und *H. E. deBuhr*: John Deere "400" hay cuber. ASAE-Paper Nr. 65-639.
 [7] *Skalweit, H.*: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. In: 4. Konstrukteur-Kursus. RKTl Schriften Heft 88. Berlin: Beuth-Vertrieb 1938, S. 30/35.
 [8] *Sacht, H. O.*: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Bisher unveröffentl. Diss. Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig, 1966.
 [9] *Busse, W.*: Die Theorie auf dem Gebiet des Verdichtens landwirtschaftlicher Halmgüter. Landtechn. Forsch. **14** (1964) H. 1, S. 6/15.

DK 631.364.5

Einsatzerfahrungen beim Brikettieren von Halmgut mit Normaldruck

Von **Hans Jürgen Matthies** Braunschweig

Professor Dr.-Ing. Georg Segler zum 60. Geburtstag

Für das Brikettieren von Halmgut wird in Amerika das für europäische Verhältnisse weniger geeignete Normaldruck-Verfahren schon in größerem Umfange angewendet. Unter Verwendung der eigenen Einsatzerfahrungen mit einer amerikanischen Aufsammlerbrikettierpresse werden insbesondere die im vergangenen Jahre in Amerika gewonnenen Erfahrungen geschildert. Die Entwicklung einer neuen amerikanischen Aufsammlerbrikettiermaschine, die Ergebnisse von Fütterungsversuchen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen geben einen guten Einblick in die Vor- und Nachteile des Brikettierverfahrens im allgemeinen und des Normaldruckverfahrens im besonderen; die Betrachtungen lassen Rückschlüsse auf das für europäische Verhältnisse besser geeignete Wickelverfahren zu.

Während wir bereits vor mehreren Jahren über die praktischen Einsatzerfahrungen mit einer amerikanischen Aufsammlerbrikettierpresse hier in Deutschland berichtet haben [1] und dabei zu dem Schluß kamen, daß diese nach dem Normaldruckprinzip arbeitenden Maschinen für unsere Klimagebiete kaum Bedeutung haben werden, haben amerikanische Firmen doch sehr intensiv an deren Weiterentwicklung gearbeitet. Die Einsatzmöglichkeiten für diese Brikettiermaschinen, besonders in den westlichen Staaten Nordamerikas, sind vor allem durch die recht günstigen klimatischen Verhältnisse und durch die Tatsache zu erklären, daß hier fast ausschließlich Luzerne verarbeitet wird. Darüber hinaus begünstigen die dortigen Verhältnisse die Entwicklung des Heubrikettierverfahrens insofern, als ein großer Teil der Heuproduktion in weit entfernt liegende Gebiete verkauft wird (beispielsweise von Kalifornien nach Hawaii). Obwohl die Stückzahl der in der Landwirtschaft eingesetzten Aufsammlerbrikettiermaschinen auch in den USA noch relativ gering sein dürfte, wurden im Jahre 1965 allein in den Weststaaten nach *Dobie* [2] bereits Heubriketts im Werte von 2 bis 3 Millionen Dollar hergestellt, davon etwa 75% für die Milchvieh- und 25% für die Mastviehfütterung. Der folgende kurze Beitrag behandelt im wesentlichen die recht interessanten Versuchsergebnisse, die in Amerika von *Dobie, Curley, Ronning* und *Parsons* [2; 3] und von *Gustafson* und *deBuhr* [4] beim Einsatz solcher Maschinen gewonnen wurden. Er ist im Zusammenhang mit dem vorstehenden Aufsatz zu sehen.

Ein Teil der oben erwähnten Brikettmenge wurde bereits mit den 1965 herausgebrachten, neuen selbstfahrenden Aufsammlerbrikettiermaschinen einer großen amerikanischen Firma hergestellt. Nachdem man zu Beginn der Entwicklung auch in Amerika Briketts von 75 bis 100 mm Durchmesser und darüber hergestellt hatte, führte die Entwicklung aus Gründen der höheren Schüttdichte und der besseren Handhabung der Briketts allmählich zu immer kleineren Brikettgrößen, so daß für die oben erwähnte Maschine, **Bild 1**, ein quadratischer Brikettquerschnitt von etwa 32 mm (1¼") bei einer Brikethöhe von etwa 50 bis 75 mm (2" bis 3") verwendet wird. Diese Maschine ist — wie von *Gustafson* [4] beschrieben — mit einer über dem Bandaufsammler angebrachten Spritzvorrichtung versehen, durch die das Luzerneheu unmittelbar vor dem Erfassen durch den Aufsammler mit Wasser besprüht und so in einen für das Verdichten günstigen Zustand gebracht wird. Durch die rotierenden Zubringer wird das Halmgut einer Trommelhäckselvorrichtung übergeben, die es auf eine theoretische Häcksellänge von 35 mm zerkleinert und die außerdem für eine gute Durchmischung des unter Umständen verschieden feuchten Gutes sorgt. Über eine größere Förderschnecke wird das gehäckselte

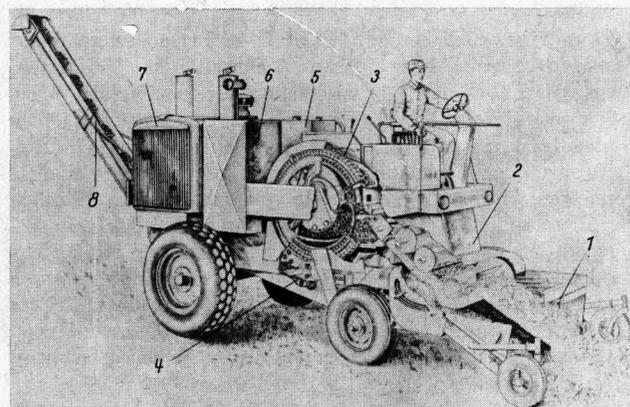


Bild 1. Selbstfahrende amerikanische Aufsammlerbrikettiermaschine.

(Werkbild John Deere)

- | | |
|---|----------------------|
| 1 Wassersprühröhr | 5 Wasserbehälter |
| 2 Zubringer und Häckselvorrichtung
(theor. Häcksellänge 35 mm) | 6 Öltank |
| 3 Preßrolle mit Ringmatrizen | 7 Aufbaumotor 216 PS |
| 4 Förderband | 8 Förderbänder |

Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Matthies ist Ordinarius für Landmaschinen an der Technischen Hochschule Braunschweig und Direktor des dortigen Institutes für Landmaschinen.