

Die Grundlagen der Halmgutverdichtung

DK 631.361.026.001.5

Beim Verdichten von Halmgut in Ballenpressen ist der Druck von der Dichte des Preßguts nach einem Potenzgesetz abhängig. Koeffizient und Exponent dieser Funktion enthalten außer einer bezogenen Verdichtungsgeschwindigkeit mehrere Stoffwerte. Das Gesetz gilt auch für das mehrfache Verdichten des Preßgutstrangs. Nach abgeschlossenem Verdichtungs Vorgang fällt der Druck bei konstanter Dichte im Verlauf der Zeit wieder ab. Dieser Vorgang läßt sich durch ein rheologisches Modell beschreiben.

Mit der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungen von *H.O. Sacht*³⁾ für den Bereich der Ballenpressen fortgeführt, und die Ergebnisse im Zusammenhang mit den Erkenntnissen für den unteren und den oberen Druckbereich dargestellt.

Die Verdichtungsfunktion $p_1 = f(Q)$ beschreibt den Zusammenhang zwischen dem aufzubringenden Preßdruck p_1 und der erreichten Preßdichte Q . Als Stoffgesetz für die untersuchten Halmgüter ist sie unabhängig von den Werkzeugabmessungen und der Guteinfüllmasse. Sie läßt sich im mittleren Druckbereich, ebenso wie im unteren Druckbereich, durch das von *H. Skalweit*⁴⁾ angegebene Potenzgesetz $p_1 = CQ^m$ beschreiben, wobei der Koeffizient C und der Exponent m außer durch die Gutart durch den Gutfeuchtegehalt U und C zusätzlich durch die bezogene Verdichtungsgeschwindigkeit v beeinflusst werden. Für den mittleren Druckbereich gilt die Zahlenwertgleichung

$$p_1 = [\alpha (1-U)^2 + \beta] (1+0,5 v) Q^{\gamma(1+0,5 U)} \quad (1)$$

mit p_1 in bar, Q in t/m³ und v in m/sm.

Darin sind α , β und γ die in **Tafel 1** angegebenen Stoffwerte des untersuchten Halmgutes.

Tafel 1. Stoffwerte α , β und γ für verschiedene Halmgüter.

Gut	α	β	γ	Gültigkeitsbereich
Weidelgras	80	5	2,2	$U = 0,1$ bis $0,8$
Luzerne 1969 1. Schnitt	40	2,5	1,9	$U = 0,1$ bis $0,8$
Luzerne 1969 2. Schnitt	100	15		
Luzerne 1970	60	10		
Gerste	180	10	2,3	$U = 0,08$ bis $0,22$
Weizen		20	2,0	
Roggen		30	2,0	
Hafer		80	2,0	

Durch Verdichten von Halmgut, wie Heu und Stroh, verringert man sein außerordentlich großes spezifisches Volumen. Dies führt zum Einsparen von Transport- und Lagerraum, erleichtert die Handhabung und senkt die Kosten. Die angewandten Drücke reichen von $p_1 = 0,01$ bar bis zu $p_1 = 1000$ bar. Man unterteilt diese Spanne in drei Bereiche, den unteren Bereich (Lagern) von 0,01 bis 1 bar, den mittleren Bereich (Ballenpressen) von 1 bis 20 bar und den oberen Bereich (Brikettieren) von 20 bis 1000 bar. Für den unteren und oberen Bereich liegen wichtige Ergebnisse zu den Stoffgesetzen, wie Verdichtungsfunktionen, Druckverhältnissfunktionen und Reibbeiwerte durch die Arbeiten von *H. Voß*¹⁾ und *W. Busse*²⁾ vor.

Zum Kennzeichnen des Geschwindigkeitseinflusses reicht die Vor-schubgeschwindigkeit des Preßkolbens nicht aus, weil dann Gl. (1) nicht auf andere Querschnittsabmessungen des Preßraumes und andere Guteinfüllmassen übertragbar ist. Deswegen wird die Verdichtungsgeschwindigkeit v eingeführt. Sie berechnet sich aus der Kolbengeschwindigkeit v_k und einer charakteristischen Länge l_u^* zu

$$v = \frac{v_k}{l_u^* (1-U)} \quad (2)$$

Darin ist l_u^* die Preßraumlänge, mit der sich bei den gegebenen Querschnittsabmessungen und der eingefüllten Gutmasse eine Dichte von $Q = 0,05$ t/m³ errechnet. Bei Ballenpressen unterscheiden sich die Zahlenwerte für die Verdichtungs- und Kolbengeschwindigkeit nur wenig. Die zum Erreichen einer bestimmten Preßdichte nötigen Preßdrücke nehmen also mit steigendem Gut-

1) *Voß, H.*: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut. Diss. TU Braunschweig 1970.

2) *Busse, W.*: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschr.-Ber. VDI-Z, Reihe 14 Nr. 1. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.

3) *Sacht, H.O.*: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14 Nr. 4. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.

4) *Skalweit, H.*: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. 4. Konstrukteur-Kursus, RKTLSchrift 88, Berlin: Beuth-Verlag 1938. S. 33/35.

Reihe 14 Nr. 16 der FORTSCHRITT-BERICHTS DER VDI-ZEITSCHRIFTEN gibt den vollen Wortlaut der Arbeit als Manuskript gedruckt wieder. 116 Seiten, 60 Bilder, Preis 48,- DM. Bestellungen an die VDI-Verlag GmbH, 4 Düsseldorf 1, Postfach 1139. Kein Artikel des Buchhandels.

feuchtegehalt ab und mit steigender Verdichtungsgeschwindigkeit zu.

Im Preßstrang von Ballenpressen wird das Halmgut bei jedem Kolbenvorlauf erneut verdichtet. Diese Mehrfachverdichtung läßt sich durch die Zahlenwertgleichung

$$p_n = C_n Q^{m_n} \quad (3)$$

mit n als Anzahl der Verdichtungen beschreiben. Erwartungsgemäß liegen die Preßdrücke der folgenden Verdichtungen unter denen der vorhergehenden, was auf größere Exponenten m_n zurückzuführen ist. Diese sind in **Bild 1** im Verhältnis zum Exponenten m der Erstverdichtung angegeben. Die Koeffizienten C_n lassen sich aus der bei der vorherigen Verdichtung erreichten Preßdichte nach der Zahlenwertgleichung (4) berechnen.

$$C_n = \left(1 - \frac{0,1}{n-1}\right) C_{n-1} (Q_{\max, n-1})^{m_{n-1} - m_n} \quad (4)$$

Von der bei der $(n-1)$ -ten Verdichtung erreichten Preßdichte an geht die n -te in die $(n-1)$ -te Verdichtungsfunktion über.

Durch die Kanalverengung wird das Halmgut im Preßstrang von Ballenpressen zusätzlich seitlich verdichtet. Dies führt zu einer Erhöhung des Seitendruckes, die sich ebenfalls berechnen läßt.

In Ballenpressen muß außer der Verdichtungsarbeit A_v zusätzliche Arbeit A_s zum Verschieben des Preßstranges geleistet werden. Die auf die Guteinfüllmasse M_0 bezogene spezifische Gesamtarbeit läßt sich durch Integration der Verdichtungsfunktion berechnen.

Es gilt als Zahlenwertgleichung

$$\frac{A_v + A_s}{M_0} = \frac{C}{m-1} (m Q^{m-1} - Q_a^{m-1}) \quad (5)$$

mit Q_a , Q als Anfangs- bzw. Enddichte in t/m^3 und $\frac{A_v + A_s}{M_0}$ als spezif. Gesamtarbeit in Nm/kg .

Außer den Verdichtungsdrücken und der zu leistenden Gesamtarbeit müssen die zwischen Halmgut und Preßkanalwand wirkenden Reibkräfte bekannt sein, da sie die beim Strangpressen erreichbare Dichte bestimmen. Sie berechnen sich aus dem Seitendruck p_s und den zwischen Halmgut und Preßkanalwand wirkenden Reibbeiwerten μ .

Der Zusammenhang zwischen dem Seiten- und dem Längsdruck wird durch die Druckverhältnisfunktion

$$\lambda = g(p_1) \quad (6)$$

mit $\lambda = p_s/p_1$ angegeben.

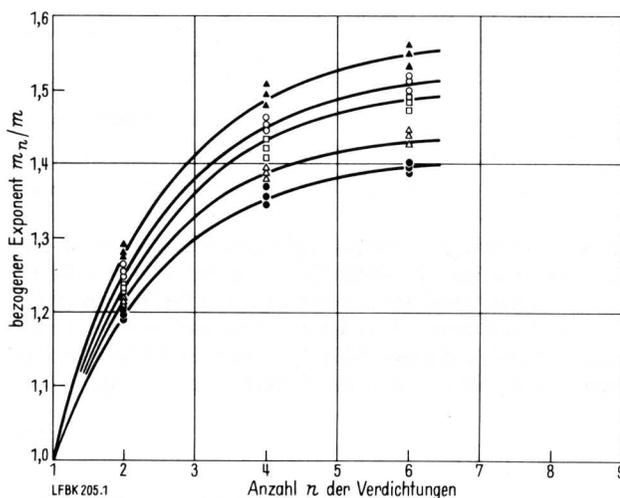
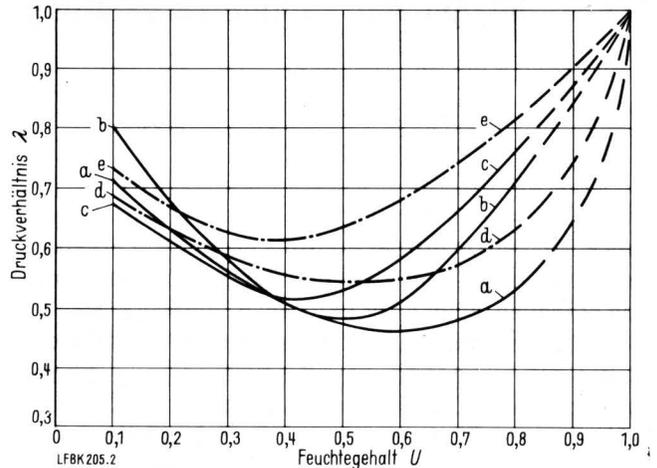


Bild 1. Abhängigkeit der auf den Exponenten m der Erstverdichtung bezogenen Exponenten m_n der Mehrfachverdichtung von der Anzahl n der Verdichtungen für verschiedene Halmgüter.

- ▲ Gerste
- Luzerne
- Roggen
- △ Hafer
- Weidelgras

Bild 2. Abhängigkeit der Druckverhältniswerte λ vom Feuchtegehalt U für Weidelgras und Luzerne.

- Verdichtungsgeschwindigkeit $v = 0,5$ m/sm
 Längsdruck $p_1 = 5$ bar
- a Weidelgras, 1. Schnitt
 - b Weidelgras, 2. Schnitt
 - c Weidelgras, 3. Schnitt
 - d Luzerne, 1. Schnitt
 - e Luzerne, 2. Schnitt



Obwohl die Meßwerte für λ größeren Streuungen unterworfen sind, zeigt es sich, daß die Druckverhältniswerte mit dem Längsdruck geringfügig zunehmen und von der Verdichtungsgeschwindigkeit unabhängig sind.

Sehr großen Einfluß hat der Gutfeuchtegehalt U , wie **Bild 2** veranschaulicht. Im mittleren Feuchtebereich von $U = 0,4$ bis $0,5$ sind die Werte für λ deutlich kleiner als im unteren und oberen Feuchtebereich, weil die einzelnen Halme welk und damit sehr biegeweich sind. Außerdem ist λ für spätere Schnitte infolge des höheren Stengelanteiles größer als für frühere Schnitte.

Die Gleitreibbeiwerte μ werden von der Gutart (Weidelgras, Luzerne, Stroh), dem Gutfeuchtegehalt ($U = 0,15$ bis $0,8$), dem Reibpartner (Stahl, Aluminium, Teflon, PVC, Polystyrol, Palatal, Hostalen G, Hostalit Z), dem Normaldruck ($p_N = 0,5$ bar bis 8 bar) und der Reibgeschwindigkeit ($v_R = 0,07$ m/s bis 1 m/s) beeinflusst (untersuchte Bereiche in Klammern). Während für die Reibpaarung Weidelgras/Stahl der Reibbeiwert im mittleren Feuchtebereich besonders stark zunimmt (von $\mu = 0,2$ auf $0,5$) steigt der Reibbeiwert bei Teflon und einigen weiteren Kunststoffen nahezu gleichmäßig mit dem Gutfeuchtegehalt an ($U = 0,1$, $\mu = 0,15$; $U = 0,8$, $\mu = 0,25$). Die Reibbeiwerte nehmen mit steigendem Normaldruck ab und mit steigender Reibgeschwindigkeit zu. Diese Einflüsse lassen sich in dem untersuchten Bereich durch auf die Geschwindigkeit v_R und den Druck p_N bezogenen Summanden $\Delta \mu_p$ und $\Delta \mu_v$ erfassen:

$$\mu(U, p_N, v_R) = \mu(p_N = 1, v_R = 0,07) + \Delta \mu_p(p_N) + \Delta \mu_v(v_R) \quad (6)$$

Für die Reibpaarung Weidelgras/Stahl, $p_N = 6$ bar und $v_R = 1,0$ m/s gilt beispielsweise $\Delta \mu_p = -0,1$ und $\Delta \mu_v = 0,03$.

Gl.(1) beschreibt den Zusammenhang zwischen dem aufzuwendenden Druck und der erreichten Preßdichte nur während des Verdichtungsvorganges. Nach Abschluß der Verdichtung nimmt der Druck trotz konstanter Dichte im Verlauf der Zeit wieder ab. Zum Beschreiben dieser mit Relaxation bezeichneten Eigenschaft wird ein rheologisches Modell entwickelt, das den Zeiteinfluß auf den Verdichtungsvorgang veranschaulicht. Es besteht aus einer Hintereinanderschaltung eines Kelvin- und eines Maxwell-Modells, deren einzelne Elemente nichtlinear sind. Mit diesem Modell lassen sich die am Halmgut gemessenen Verdichtungs- und Relaxationskurven nachbilden. Dadurch trägt es zu einem besseren Verständnis der Halmguteigenschaften bei.

Neuss

Dr.-Ing. Heinz Dieter Kutzbach