

# Verdichtungsgesetzmäßigkeiten nach Preßtopfversuchen

Institut für landtechnische Grundlagenforschung, Braunschweig-Völkenrode

Nach Messungen bei systematischen Versuchen mit landwirtschaftlichen Gütern in Preßtöpfen unter der hydraulischen Presse können für diese Stoffe die Verdichtungsgesetzmäßigkeiten ermittelt werden, nach denen der Zusammenhang zwischen dem erzielten (mittleren) Raumgewicht des Preßgutes einerseits und dem Kolbendruck sowie den unvermeidbaren Arbeitsaufwänden infolge Kompression und Verschiebung oder den Arbeitsaufwänden infolge Kompression allein andererseits angegeben werden kann. Allerdings sind Veränderungen infolge schneller Zusammenrückung dabei nicht berücksichtigt.

Es sind schon verschiedene solche Versuche durchgeführt und Gesetzmäßigkeiten für verschiedenes Stroh angegeben worden, zum Beispiel in [1, 2, 3]. In [1] war bereits gesagt, daß die Feuchtigkeit des Strohs einen bedeutenden Einfluß auf die Kompressibilität hat. Man sollte nun aber nicht für jede einzelne Feuchtigkeit nur eine feste Gesetzmäßigkeit zwischen dem Kolbendruck und dem Raumgewicht angeben, wie es in [2, 4] geschehen ist. Denn es treten auch bei gleichen Feuchtigkeiten beträchtliche Streuungen auf [3].

## Einige graphische Darstellungen der Verdichtungsgesetzmäßigkeiten

Es werden zunächst die Ergebnisse für verschiedene Preßversuche mit Gersten-Krummstroh von etwa 23% Feuchtigkeit erörtert. In einen Topf mit einer Querschnittsfläche von 225 × 225 mm<sup>2</sup> und einer Höhe von 177 mm sind zunächst nacheinander 10 verschiedene Proben von 200 g eingelagert und gepreßt worden. Mit Rücksicht auf das verschiedenartige Einführen des Strohs durch verschiedene Förder- und Füllrichtungen in Krummstropressen wurden verschiedenartige Einlagerungen vorgenommen. Ein Hängenbleiben im Verlauf der Belastung, wie in [3] in Bild 11 vermerkt ist, trat bei diesen Versuchen nicht mehr auf. Die Registrierung des Verlaufs von der Kolbenkraft *K* mit dem Kolbenwege ist für einen Versuch in Bild 1 wiedergegeben. Nach solchen

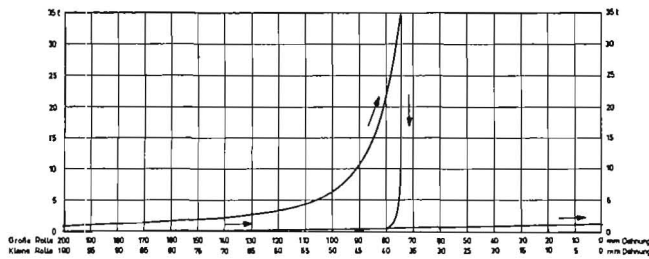


Bild 1: Registrierdiagramm von der hydraulischen Presse

Diagrammen wurde je 100 kg Belastungsstufe der Weg abgegriffen und damit die Preßraumhöhe *l* berechnet. Das Bild 2 zeigt die Streuungen in den *K-l*-Verläufen für die 10 Versuche. Nach Berechnung der Raumgewichte  $\gamma$  aus den Preßraumabmessungen wurde in Bild 3 für jeden Versuch *K* über  $\gamma$  in linearen Maßstäben aufgetragen. Die Verschiedenheiten zeigen sich bei dieser Darstellungsweise sehr groß. Vier weitere Versuche wurden mit 400 g von dem Gersten-Krummstroh durchgeführt. Die Ergebnisse hinsichtlich der Raumgewichte fallen in den von den Kurven von Bild 3 überdeckten Bereich. In Bild 4 sind für die extremen Fälle die Verläufe der Kraft beziehungsweise des Druckes *p* über dem spezifischen Volumen  $1/\gamma$  aufgetragen, wodurch nochmals der Streubereich der Versuche festgehalten wird. In Bild 5 sind dann noch für einige der obigen Versuche, insbesondere auch die, die die größten Abweichungen voneinander zeigten, die Werte  $\gamma = f(p)$  oder  $p = f(\gamma)$  im doppelt logarithmischen Maßstab aufgetragen.

Es wurde dann noch eine statistische Prüfung der Zuverlässigkeit der einzelnen Werte vorgenommen. Die Grenzwerte (zum Beispiel 1 und 3 in Bild 3) sind ja Zufälligkeitwerte. Ihre Lagen sind

Bild 5: Kolbendruck-Raumgewichts-Diagramm (mit beidseits logarithmischer Skaleneinteilung) für verschiedene Versuche mit Gersten-Krummstroh von etwa 23% Feuchtigkeit

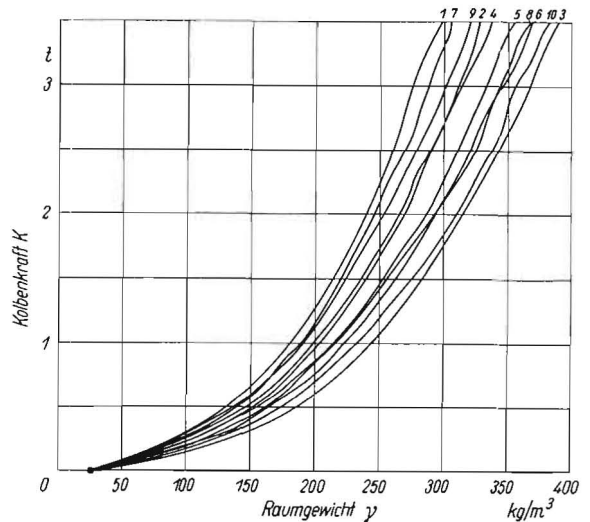


Bild 3: Auftragung der Ergebnisse von Bild 2 über den Raumgewichten Kolbenfläche 506 cm<sup>2</sup>

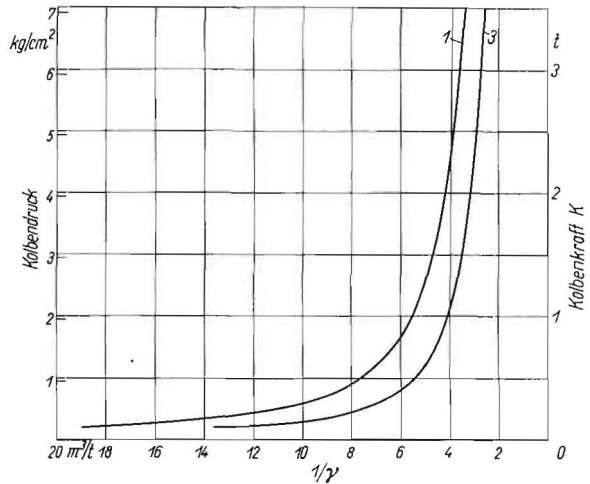


Bild 4: Auftragung der extremen Ergebnisse für Gersten-Krummstroh über dem spezifischen Volumen (reziproken Wert des Raumgewichtes)

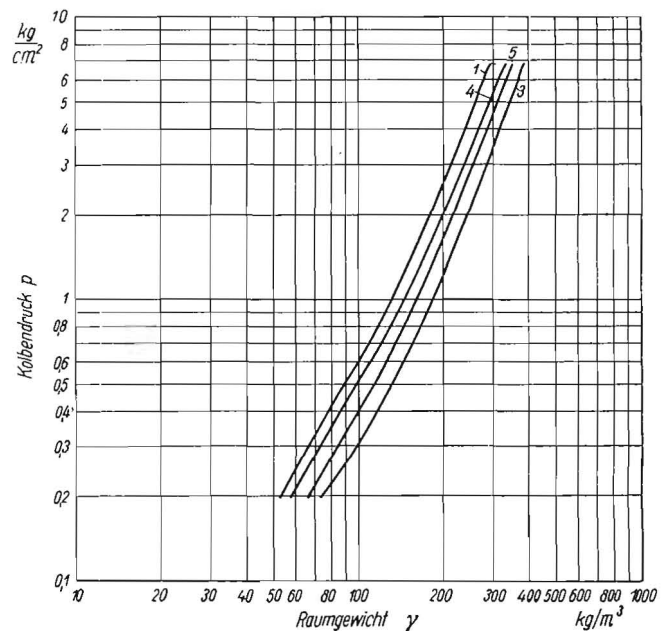
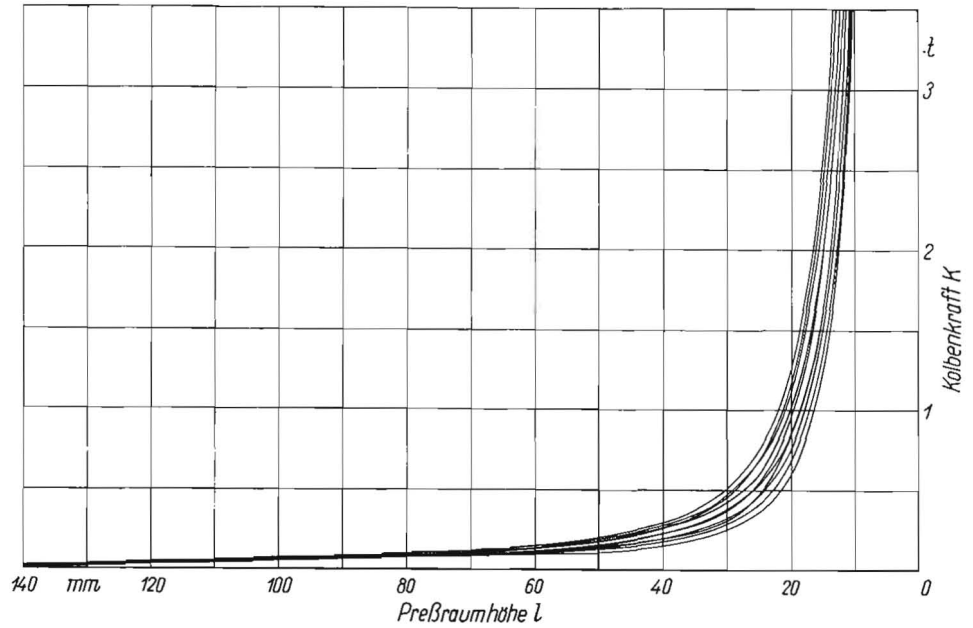


Bild 2: Änderungen der Kolbenkraft mit der Preßraumhöhe für zehn Versuche mit Gerstenstroh (Krummstroh)  
 Kolbenfläche 506 cm<sup>2</sup>,  
 Preßgutmengen 0,2 kg



auch durch die Anzahl der durchgeführten Versuche bedingt. Es ist daher einmal nach den Methoden der statistischen Analysis [5, 6] nicht nur der Mittelwert, sondern auch der Zufallsbereich für die verschiedenen Laststufen festgestellt worden. In Bild 6 ist nach [5] der Zusammenhang zwischen dem Vielfachen  $t$  der „Streuung“, dem Freiheitsgrad  $n_f$  des Kollektivs und der Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P$  dargestellt. Die Streuung in  $\gamma$

für ein bestimmtes  $K$  ergibt sich nach statistischen Verfahren aus

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\gamma - \gamma_m)^2}{n_f}} = \sqrt{\frac{\sum(\gamma - \gamma_D)^2 - \frac{1}{n} [\sum(\gamma - \gamma_D)]^2}{n_f}} \quad (1)$$

mit einem beliebigen „vorläufigen Durchschnitt“  $\gamma_D$  bei einem Freiheitsgrad  $n_f = n - 1$ , wenn  $n$  die Anzahl der Werte  $\gamma$  für

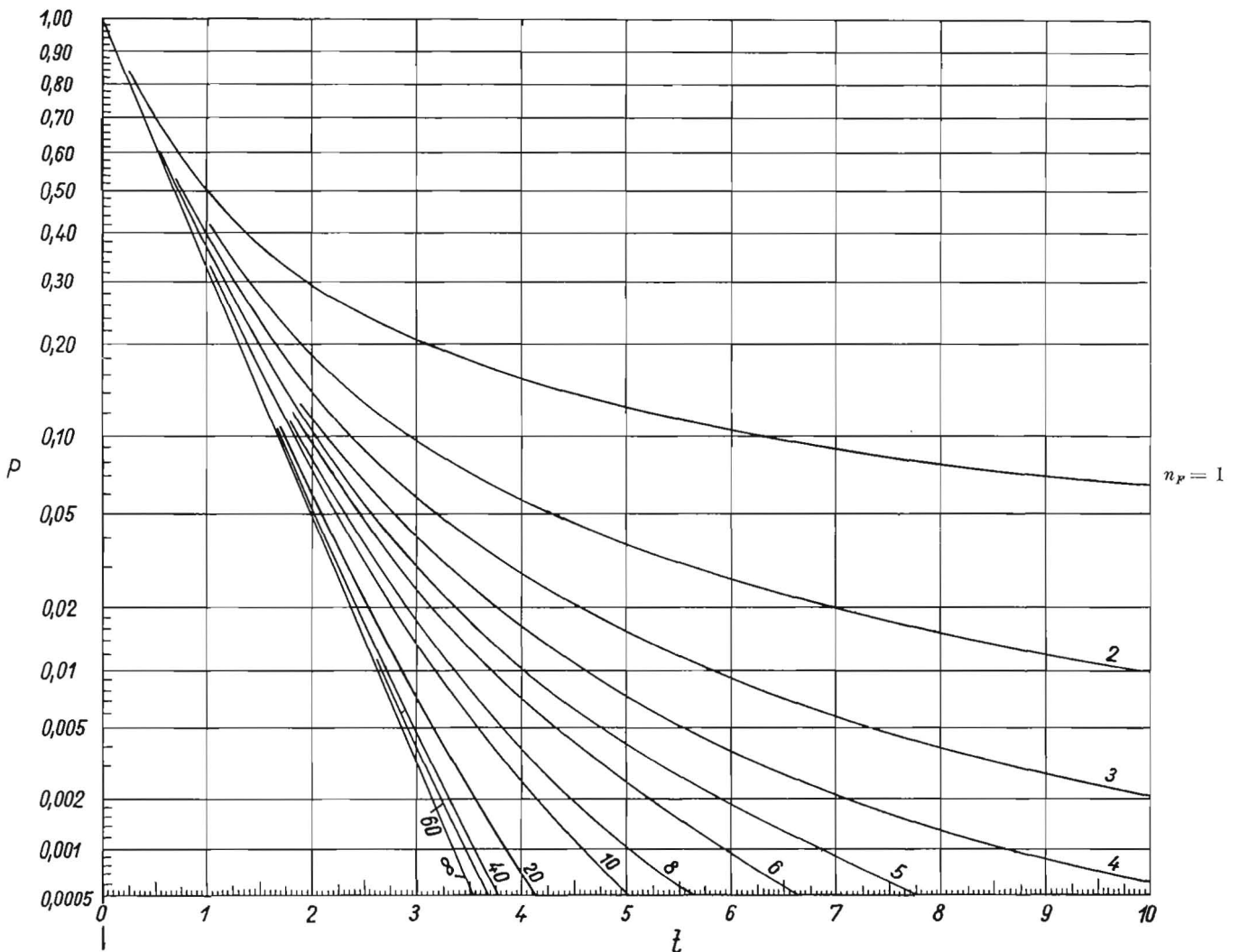


Bild 6: Zusammenhang zwischen aus Proben festgestellter Streuung, Freiheitsgrad und Überschreitungswahrscheinlichkeit (nach Student)

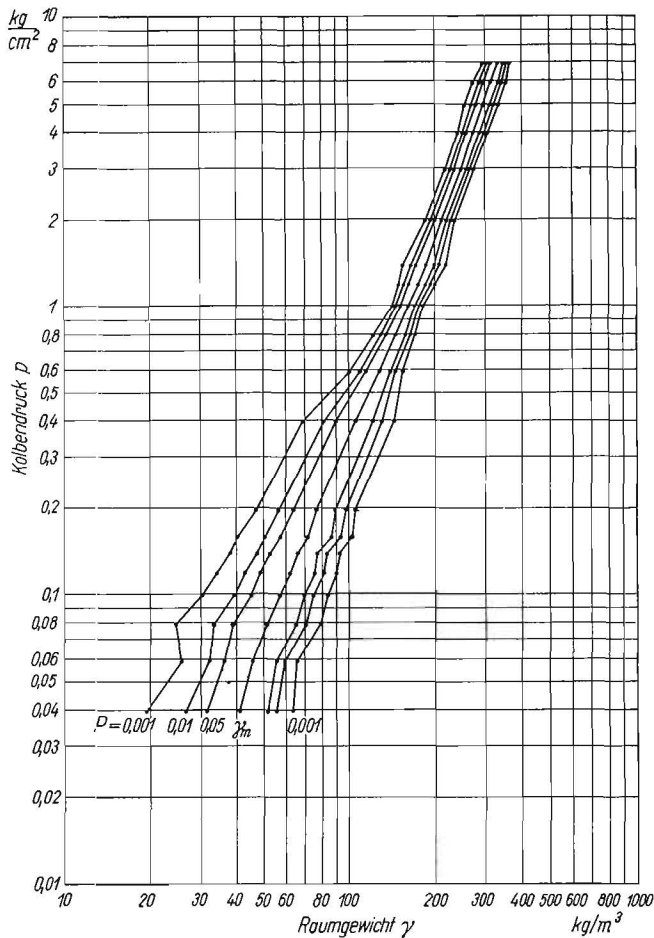


Bild 7: Streuungsuntersuchungen im Kolbendruck-Raumgewichts-Diagramm (mit beidseits logarithmischer Skaleneinteilung) bei verschiedenen „Überschreitungswahrscheinlichkeiten“, nach der aus zehn Proben für Heu von 8% Feuchtigkeit festgestellten Streuung statistisch ausgewertet

das jeweilige  $K$  ist. Für die Ergebnisse aus 10 Versuchen mit Heu von 8% Feuchtigkeit (siehe auch die Bilder 15 bis 17) — wobei die Streuungen nicht so groß sind wie bei dem Krummstroh — sind außer dem Mittelwert  $\gamma_m$  in Bild 7 nach beiden Seiten die Grenzwerte für  $P = 0,05; 0,01$  und  $0,001$ , das heißt für die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 5%, 1% und 1‰ eingetragen. Man sieht, die Bereiche sind ziemlich breit im Vergleich zu den tatsächlichen Streuungen bei  $n = 10$ . Ein Ausgleich zwischen den Werten für die verschiedenen Drücke ist nicht erfolgt. Im weiteren Verlauf dieses Berichtes sind solche statistischen Feststellungen nicht mehr getroffen worden.

### Ergebnisse für Grünfütter

Von fünf Proben Stoppelklee von 82,5% Feuchtigkeit sind die arithmetischen Mittel und Streubereiche der Werte vom Raumgewicht mit dem Kolbendruck im rechten Teil des doppelt-logarithmischen Diagramms in Bild 8 aufgetragen. Es interessiert noch, was von den Gewichten bleibt, wenn das Wasser abgerechnet wird. Ist die Feuchtigkeit  $w$  (= Gewicht des Wasseranteils: Gewicht der feuchten Probe), dann ist das Verhältnis vom Trockenraumgewicht zum gesamten Raumbedarf, das heißt das Trockenraumgewicht:

$$\gamma_t = \gamma(1 - w). \quad (2)$$

Diese Werte, hier  $\gamma_t = 0,175 \gamma$ , sind auch in Bild 8 eingetragen. Raps von zwei verschiedenen Sorten mit stärkeren und schwächeren Stengeln wies bei 85 und 87% Feuchtigkeit sehr wenig Verschiedenheit in der Verdichtbarkeit auf. Schließlich ist auch von Zuckerrübenblatt mit 87% Feuchtigkeit der Verlauf der Raumgewichte bei der Verdichtung festgestellt worden, Bild 9. Die  $p$ - $\gamma$ -Gesetzmäßigkeiten stimmen für Rübenblatt, Raps und Klee (im Feuchtraumgewicht!) ungefähr überein. In den Trockenraumgewichten, die sich bei bestimmten Drücken für die verschiedenen

genannten Stoffe ergeben, sind die Werte verschieden (Unterschiede in  $\gamma_t$  auf den Bildern 8 und 9).

Dann sind auch die für die Verdichtung auf ein bestimmtes Raumgewicht erforderlichen Arbeiten je kg Preßgut bei den genannten Stoffen ungefähr gleich, unterschiedlich dagegen die je kg feste Masse sich ergebenden Arbeitsgrößen und auch die für verschiedene Trockenraumgewichte erforderlichen Arbeitswerte bei den Verdichtungen verschieden feuchter Stoffe.

Die Einheitsarbeit für die reine Kompression im Preßtopf wird nach [3] bestimmt aus

$$A_{k|G} = \int_{\gamma_u}^{\gamma} p d \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

( $\gamma_u$  = Raumgewicht vor der Verdichtung) und die Einheitsarbeit für die Strangpresse (unter Einbeziehung der in dieser auftretenden

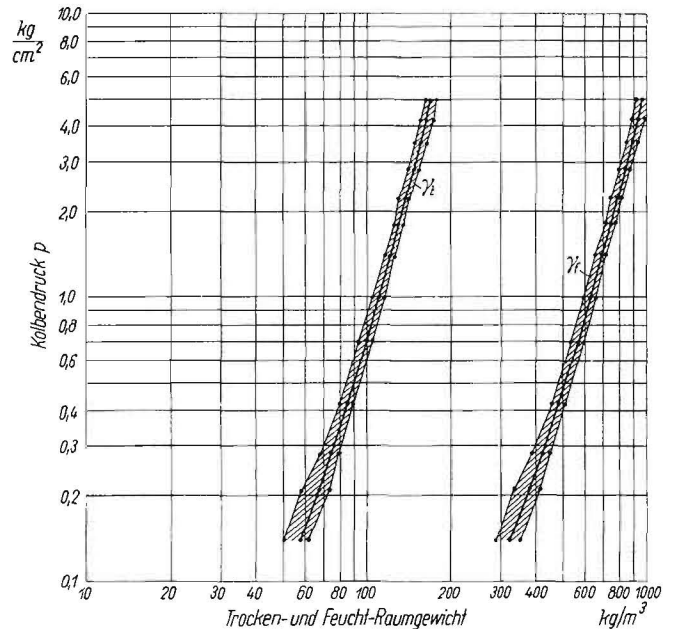


Bild 8: Mittelwerte und Streubereiche in den Zusammenhängen zwischen Kolbendruck einerseits und Raumgewicht beziehungsweise Trockenraumgewicht andererseits nach Preßversuchen mit fünf Proben Stoppelklee von 82,5% Feuchtigkeit  
Raumgewicht  $\gamma = \gamma_f$  = Feuchtraumgewicht,  $\gamma_t$  = Trockenraumgewicht

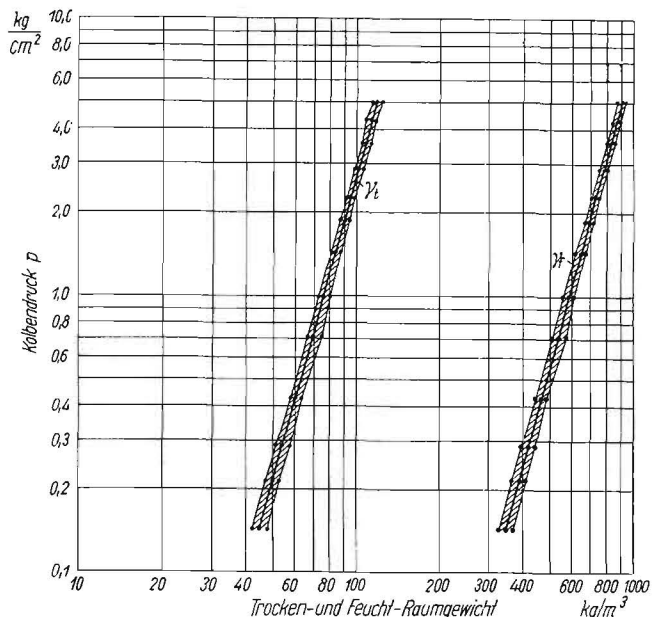


Bild 9: Mittelwerte und Streubereiche in den Zusammenhängen zwischen Kolbendruck einerseits und Raumgewicht beziehungsweise Trockenraumgewicht andererseits nach Preßversuchen mit fünf Proben Zuckerrübenblatt von 87% Feuchtigkeit

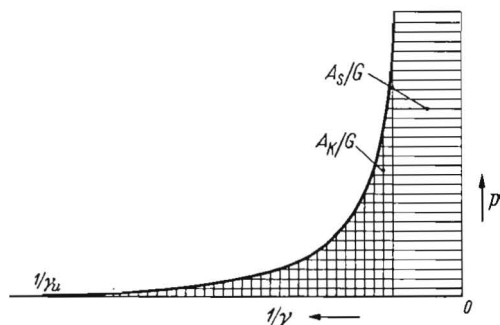


Bild 10: Ermittlung der unvermeidbaren Einheitsarbeiten beim Verdichten in Preßtopfen (Kompressionsarbeit  $A_K$ ) und in Strangpressen (Arbeit  $A_S$ ) nach [3] durch graphische Integrationen (Flächenbestimmungen)

den Verschiebearbeit) nach den Ergebnissen der Preßtopfversuche aus

$$A_S/G = \int_0^p \frac{1}{\gamma} dp, \quad (4)$$

unabhängig von dem Reibungsbeiwert, den Abmessungen der Seitenwände und anderem. Beide Arbeitsgrößen werden aus Auftragungen der Beziehungen zwischen  $p$  und  $1/\gamma$  bei linearen Maßstäben zeichnerisch gemäß Bild 10 ermittelt. (In [3] ist  $A_S$  bezeichnet mit  $A = A_K + A_V$ . In der Thermodynamik tritt für das Komprimieren und Ausstoßen die gleiche Beziehung auf wie oben für  $A_S/G$ .)

Von den Mittelwerten der Ergebnisse für Rübenblatt sind die Werte  $1/\gamma$  und  $p$  in Bild 11 zusammengetragen. Danach sind die Arbeitsgrößen von Bild 12 erhalten worden. Als erforderlich wurde erhalten

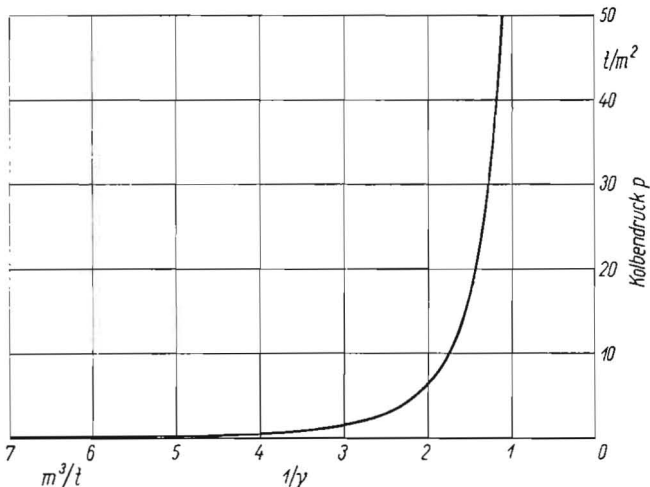


Bild 11: Auftragung des Kolbendruckes  $p$  über dem Mittelwert der  $1/\gamma$ -Werte der Preßversuche mit Zuckerrübenblatt von 87% Feuchtigkeit

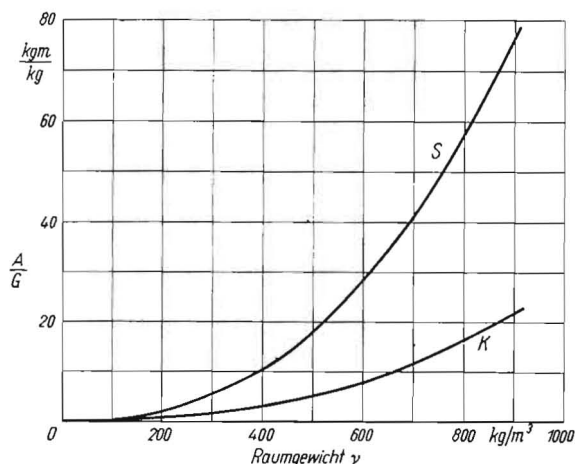


Bild 12: Mittlere Einheitsarbeiten über dem Raumbelastung für Zuckerrübenblatt von 87% Feuchtigkeit

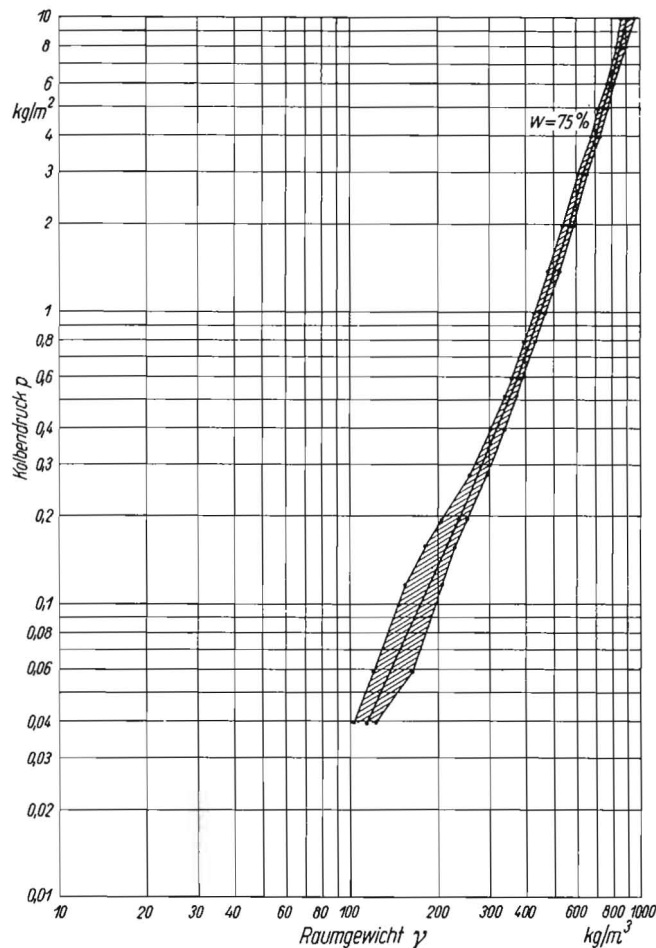


Bild 13: Mittelwerte und Streubereiche im Kolbendruck-Raumbelastungs-Diagramm für Gras von 75% Feuchtigkeit nach zehn Versuchen

für $\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_K/G$ [m]	$A_S/G$ [m]
200	0,7	1,9
400	3,1	10,4
600	7,9	27,8
800	16,2	57,7

Das sind sehr kleine Werte verglichen mit denen von Stroh nach [3].

Weiterhin ist von einer Serie von fünf Versuchen mit Gras von 75% Feuchtigkeit die  $p$ - $\gamma$ -Gesetzmäßigkeit mit Mittelwerten und Streubereich in doppelt-logarithmischem Diagramm in Bild 13 eingetragen. Austritt von Wasser war etwa von 5 kg/cm<sup>2</sup> ab festzustellen. Sodann wurden in Bild 14 die Ergebnisse von vorgewelktem Gras mit 64% Feuchtigkeit, das für die Einsilierung bestimmt war, angegeben. Jede der beiden Linien stellt den Mittelwert einer Reihe von drei Versuchen dar. Die Unterschiede zwischen den beiden Linien für gehäckseltes und nicht gehäckseltes Gut sind nicht groß [7, 8]. Ein Vergleich der Bilder 8 und 9 mit 13 und 14 zeigt, daß das Gras von 75% Feuchtigkeit nicht so leicht verdichtbar ist wie die anderen zur Einsilierung gewonnenen, untersuchten Stoffe.

#### Ergebnisse für Heu

Es folgen Angaben von Preßversuchen mit Heu im gleichen Preßtopf. Von Heu einer bestimmten Feuchtigkeit wurden jeweils mit 10 Proben Preßversuche durchgeführt. Von fünf Proben mit 8% Feuchtigkeit werden (wie in Bild 3) in Bild 15 die Kolbenkräfte  $K$  (von der 506 cm<sup>2</sup> großen Kolbenfläche) über dem Raumbelastung  $\gamma$  in linearen Maßstäben aufgetragen. Durch den Vergleich mit Bild 3 sieht man schon, daß die Streuungen bei den Versuchen mit Heu erheblich kleiner sind als bei den Versuchen mit Krummstroh. Aus den Ergebnissen von Bild 15 ist (wie in Bild 5 ff) in Bild 16 der Kolbendruck  $p$  über  $\gamma$  bei beidseits logarithmischen Maßstäben eingetragen.

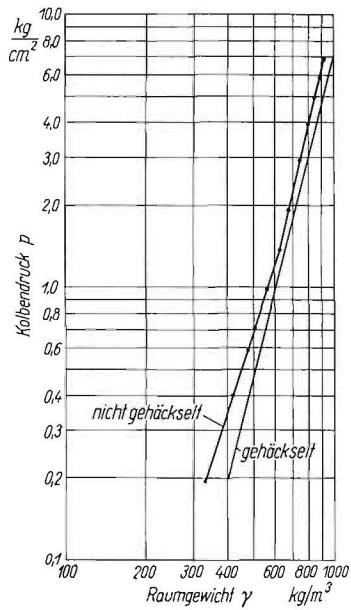


Bild 14: Mittelwerte im Kolbendruck-Raumgewichts-Diagramm für vorgewelktes Gras von 64% Feuchtigkeit  
 a) nicht gehäcksel,  
 b) gehäcksel  
 nach je drei Versuchen

Mittel- und Grenzwerte der 10 Versuche für Heu von 8% Feuchtigkeit sind in Bild 17 übertragen, wobei die gleichen Werte für je 10 Proben Heu von 16 und 23% Feuchtigkeit sowie das Ergebnis einer Probe mit 36% Feuchtigkeit hinzugefügt wurden. Man sieht, daß die Streuungen bei einer bestimmten Feuchtigkeit nicht so groß sind wie die Unterschiedlichkeiten bei den untersuchten verschiedenen Feuchtegehalten. Das Material mit höherer Feuchtigkeit ist mit kleineren Drücken auf die gleichen Endverdichtungen zu bringen, beziehungsweise erreicht bei gleichen Drücken größere Raumgewichte. Die aus den Mittellinien von Bild 17 errechneten Trockenraumgewichte sind in Bild 18 in Abhängig-

Bild 16 (unten): Kolbendruck-Raumgewichts-Diagramm nach den Versuchen von Bild 15

Bild 17 (rechts): Mittelwerte und Streubereiche beim Pressen von je zehn Proben von Heu von 8, 16 und 23% Feuchtigkeit und einer Probe von 36% Feuchtigkeit

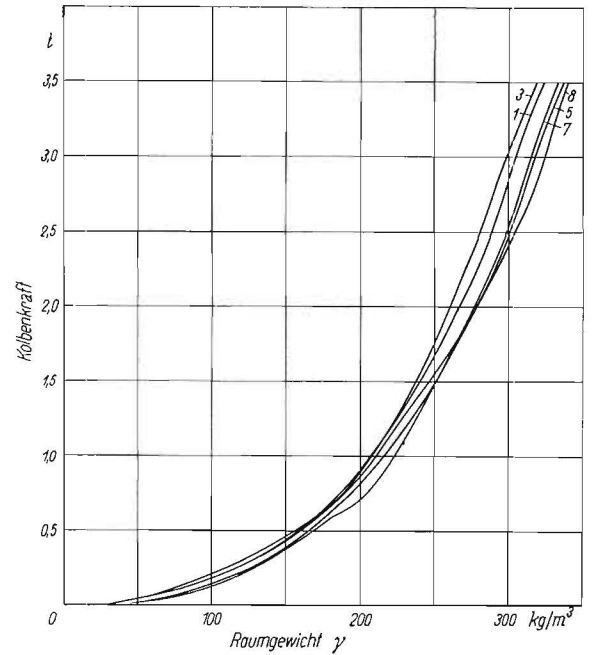
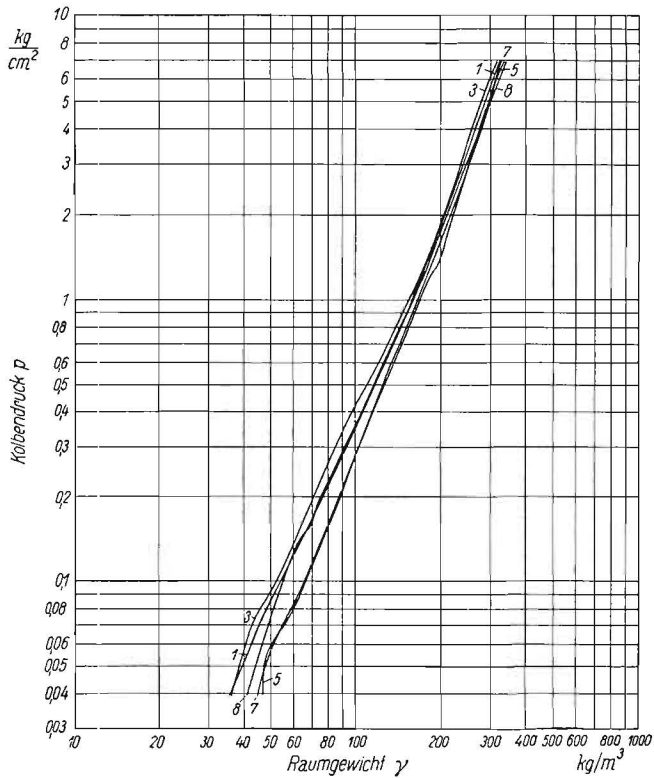
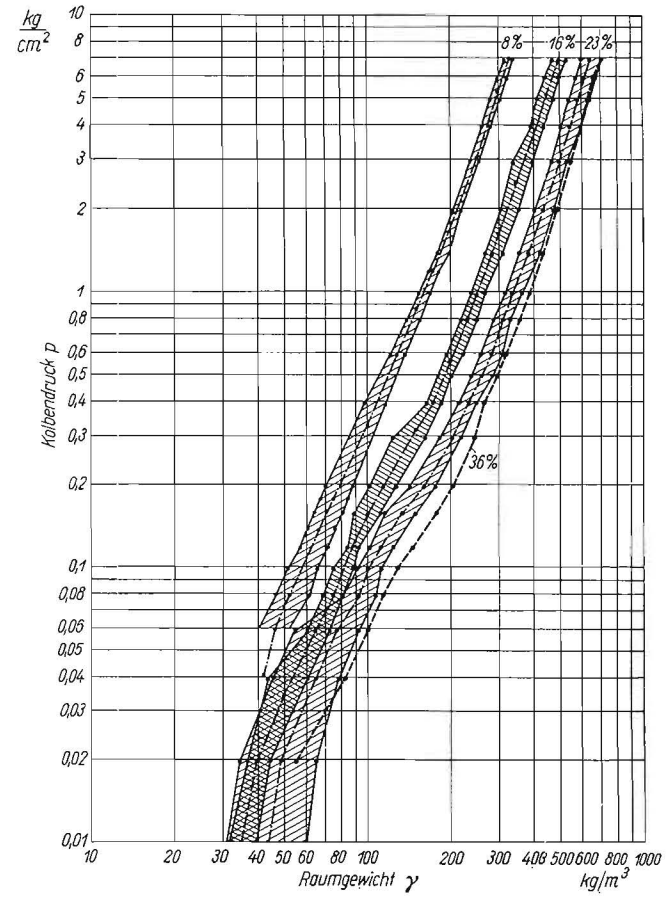


Bild 15: Änderungen der Kolbenkräfte mit dem Raumgewicht bei fünf Versuchen mit Heu von 8% Feuchtigkeit

keit von den Kolbendrücken (diese als Ordinaten) aufgetragen. Man ersieht aus diesem Schaubild, daß — im Gegensatz zu der Tendenz bei den Silagestoffen, die bei den Untersuchungen Feuchtigkeiten zwischen 64 und 88% aufwiesen, — beim Pressen von Heu verschiedener Feuchtigkeit das bei größerer Feuchtigkeit gepreßte Material bei bestimmten Drücken die größere Menge an Trockenmaterial in einem bestimmten Volumen enthält. Selbst bei Einbeziehung der Streuungen ist dieses Ergebnis statistisch gesichert, wenn auch die Bereiche für die verschiedenen Feuchtigkeiten näher beieinander liegen als in Bild 17.

Dann werden auch die für die Verdichtung auf ein bestimmtes Raumgewicht (und auf ein bestimmtes Trockengewicht) erforder-



lichen Arbeiten bei feuchterem Heu erheblich kleiner als bei trockenerem. Ergebnisse für die Arbeiten für die Verläufe der Mittellinien von Bild 17 sind in Bild 19 über dem Raumgewicht dargestellt.

### Seitendrucke

Es werden jetzt noch die Ergebnisse von einigen Versuchen mit Seitendruckmessungen mitgeteilt. Die Seitendrucke wurden mit der in [9] (dort Bild 3 und 4) angegebenen Versuchseinrichtung gemessen. Die  $p_s$  sind Mittelwerte der Seitendrucke auf einer 1 cm hohen Leiste an der Seitenwand direkt über dem Boden des Preßtopfes. Die Streuungen sind, wie die Ergebnisse der verschiedenen für Heu in Bild 20 eingetragenen Versuche zeigen, erheblich. Systematische Einflüsse der Feuchtigkeit darauf sind nach diesen Versuchen nicht zu erkennen. Bei Krummstroh waren die Streuungen noch größer, da durch die größeren örtlichen Steifigkeiten der Halme keine gleichmäßige Verteilung der Seitendrucke auftrat. Aus Bild 20 ist zu entnehmen, daß für Drücke von 2 bis 7 kg/cm<sup>2</sup> auf die verschiedenen Heuproben das Verhältnis  $p_s/p$  zwischen 0,1 und 0,3 lag, für kleinere Kolbendrucke ging  $p_s/p$  bis 0,5. Mit Zunahme des Kolbendruckes wird das Seitendruckverhältnis bei den Heuproben kleiner.

### Formelmäßige Darstellungen der Verdichtungsgesetzmäßigkeiten

Nach [2] hat M. A. PUSTYGIN 1937 für den Verlauf des Drucks mit dem Weg  $s$  bei ungedroschenen Strohhalmen die Formel:

$$p = A e^{Bs} \quad (5)$$

und 1948 die andere Formel

$$p = A e^{D \frac{l_u}{l_u - s}} \quad (6)$$

mit  $l_u$  als Preßtopfhöhe = Höhe des Preßgutes beim ersten Berühren des Kolbens ( $A, B, D$  = Konstante des Preßguts) angegeben. Die jeweilige Preßguthöhe ist

$$l = l_u - s. \quad (7)$$

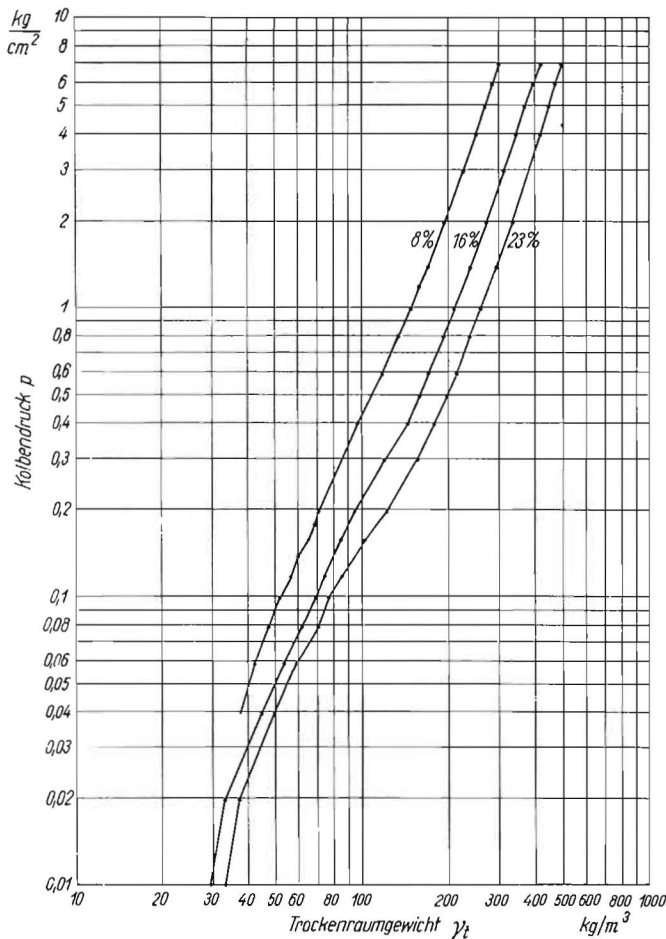


Bild 18: Kolbendruck-Trockenraumgewichts-Diagramm (mit beidseits logarithmischer Skaleneinteilung) aus den Mittelwerten der Preßversuche mit Heu verschiedener Feuchtigkeit

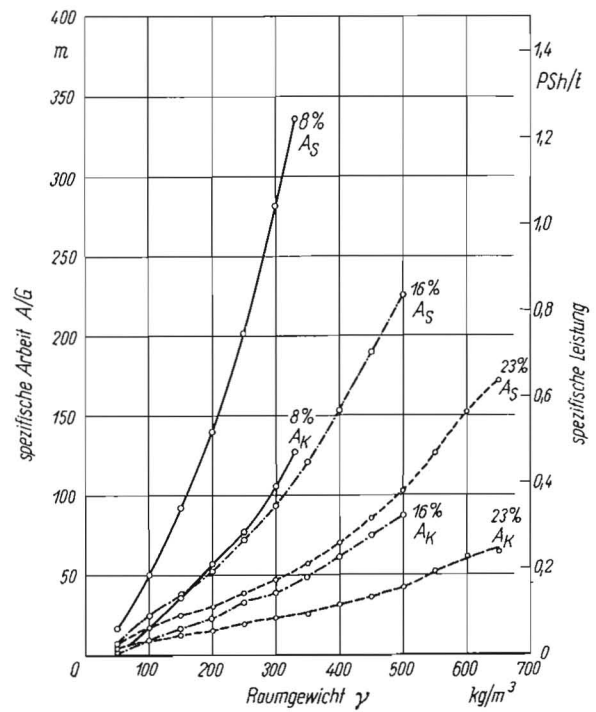


Bild 19: Einheitsarbeiten  $A_K/G$  für die Kompression in Preßtöpfen und  $A_S/G$  für das Verdichten in Strangpressen für Heu verschiedener Feuchtigkeit

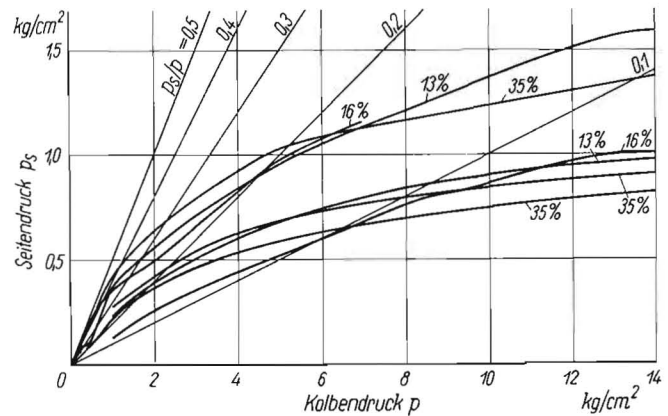


Bild 20: Änderung der Seitendrucke mit Zunahme der Kolbendrucke bei verschiedenen Versuchen mit Heu. An die Kurven angeschrieben sind die Feuchtigkeiten des Heus. Die eingezeichneten Geraden stellen verschiedene feste Verhältnisse  $p_s/p$  dar

Führen wir als Anfangsraumgewicht  $\gamma_u$  ein, dann gilt für jeden Preßtopfversuch (Bild 21):

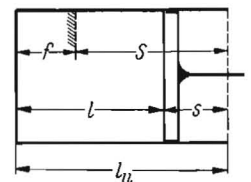


Bild 21: Preßtopf  
 $f$  = Anteil der festen Substanz (übertrieben groß gezeichnet)

$$\gamma_u l_u = \gamma l \quad (8)$$

$$\frac{l_u}{l_u - s} = \frac{l_u}{l} = \frac{\gamma}{\gamma_u}, \quad (9)$$

also wird aus der zweiten Angabe von PUSTYGIN (6):

$$p = A e^{D \gamma / \gamma_u} \quad (10)$$

oder 
$$p = A e^{E \gamma} \quad (11)$$

und 
$$\gamma = \frac{1}{E} \ln \frac{p}{A} \quad (12)$$

oder 
$$\gamma = \frac{1}{E} \ln p - F. \quad (13)$$



Die Bedeutungen von  $E$  und  $F$  ergeben sich aus einem Vergleich der aufgeschriebenen Gleichungen.

Zum Vergleich sollen für die Verdichtung von Erdboden angegebene Gesetze herangezogen werden. Angesetzt ist von SÖHNE für den Porenanteil, das ist der Anteil von Luft- und Wasservolumen am Gesamtvolumen nach [10]:

$$n = -G \ln p + H \quad (14)$$

und sodann nach [11]:

$$n = -G \ln (p + p_c) + H \quad (15)$$

mit  $G, H$  und  $p_c$  als Konstante des Stoffes. Wird für den Volumenanteil der festen Substanz eingeführt  $f/l$  (Bild 21), dann ist

$$n = \frac{l-f}{l} = 1 - \frac{f}{l} \quad (16)$$

und unter Benutzung von (8):

$$n = 1 - \frac{f}{l_u} \frac{\gamma}{\gamma_u} \quad (17)$$

Bei einem Preßvorgang sind davon  $\gamma_u$  und

$$\frac{f}{l_u} = \frac{\gamma_u}{\gamma_e} \quad (18)$$

konstant, wenn die (elastische) Feststoffnachgiebigkeit nicht in Betracht gezogen wird, was bei den in Frage kommenden Drücken angemessen ist.

Aus (14) ergibt sich damit

$$\frac{\gamma}{\gamma_e} = G \ln p - H + 1. \quad (19)$$

Diese Formel ist mit der aus (6) abgeleiteten Beziehung (13) vergleichbar. Diese Beziehungen können nicht von  $p = 0$  ab gelten, wo ein endliches Raumgewicht  $\gamma_u$  auftritt. Aus (15) ergibt sich:

$$\frac{\gamma}{\gamma_e} = G \ln (p + p_c) - H + 1 \quad (20)$$

oder

$$p = A e^{\varepsilon \gamma} - p_c. \quad (21)$$

Hierbei kann

$$p_c = A e^{\varepsilon \gamma_u} \quad (22)$$

angesetzt werden, so daß für  $\gamma = \gamma_u$  der Wert  $p = 0$  sich ergibt. Die Exponentialgesetze (10) ff. werden zweckmäßig in Diagrammen aufgetragen, in denen in logarithmischem Maßstab  $p$  (beziehungsweise für (15):  $p + p_c$ ) dem Pressungsgrad (Raumgewicht, Raumgewichtsverhältnis, Porenanteil) in linearem Maßstab gegenübergestellt ist. In solchen Diagrammen geben die aufgestellten Gesetzmäßigkeiten gerade Linien.

In Bild 22 sind die Ergebnisse einer Reihe von vier Versuchen mit Heu von 10 bis 13% Feuchtigkeit in dieser Weise aufgetragen. Man sieht, daß die Kurven im ganzen durchgemessenen Bereich nach unten hohl sind. Die Drücke steigen nicht so schnell mit den

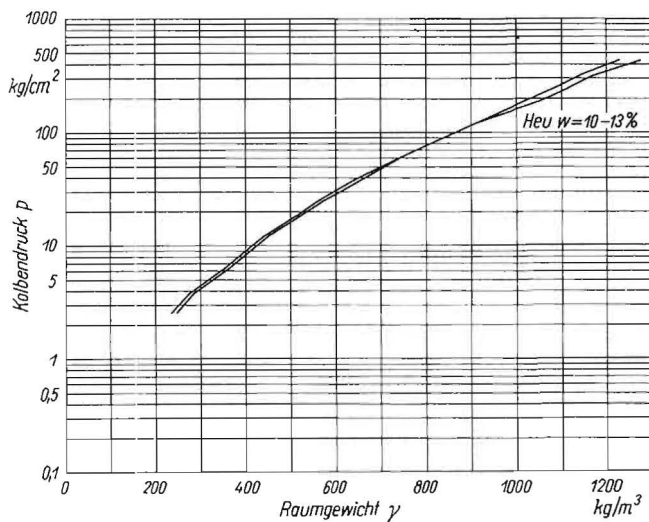


Bild 22: Verlauf des Kolbendrucks (in logarithmischem Maßstab) mit dem Raumgewicht (in linearem Maßstab) bei vier Brikettversuchen mit Heu von 10 bis 13% Feuchtigkeit

Raumgewichten wie bei Exponentialgesetzen. Dieselben Ergebnisse sind in Bild 23 mit beidseits logarithmischen Skalenteilungen aufgetragen. Hierin lassen sich die Ergebnisse besser durch eine Gerade annähern, wenn auch — mit Ausnahme des unteren Bereichs — die Kurven nach oben hohl sind. Die Drücke steigen im oberen Bereich etwas schneller als nach Potenzgesetzen. Mit besserer Übereinstimmung als die Exponentialgesetze ist für Heu und dergleichen anzusetzen:

$$p = C \gamma^m, \quad (23)$$

wie es zuerst von SKALWEIT [1] angegeben worden ist. Dieses Gesetz auf Bild 9 angewandt, ergibt für nasse Rübenblätter:  $m \approx 3,75$  und für  $\gamma = 500 \text{ kg/m}^3$ : im Mittel:  $p = 0,54 \text{ kg/cm}^2$ . Die Streubreite ist für  $p = \text{const. etwa } 50 \text{ kg/m}^3$ , also prozentual mit der Höhe der Raumgewichtswerte abnehmend.

Da auch (23) nicht bis  $p = 0$  hinab gelten kann, sind folgende Ansätze untersucht worden:

$$p = C (\gamma^m - \gamma_u^m) \quad (24)$$

und

$$p = C (\gamma - \gamma_u)^m. \quad (25)$$

Mit Versuchsergebnissen ergibt besonders (24) gute Übereinstimmung. Der Ansatz (25) zeigte sich für analytische Untersuchungen in [9] gut geeignet.

Zum Vergleich werden jetzt noch bei Braunkohlenverdichtungen (Brikettierung) aufgestellte Gesetzmäßigkeiten herangezogen. Für den Kolbendruck beim Pressen von Braunkohle in Zylinder-Matrizen in einer hydraulischen Presse hat 1951 HOCK [12] nach Untersuchungen von ROENNEKE in Abhängigkeit vom Kolbenweg  $s$  die Beziehung angegeben:

$$p = \frac{1}{b} \frac{s}{S-s}, \quad (26)$$

worin  $b$  und  $S$  Konstante beim Preßvorgang sind. In der Dissertation von ROENNEKE ist die Gesetzmäßigkeit korrigiert [13] zu

$$p = \frac{1}{b} \frac{s}{(S-s)^m}. \quad (27)$$

Wir wollen weiter noch besprechen die Formel

$$p = \frac{1}{b} \left( \frac{s}{S-s} \right)^m. \quad (28)$$

Die Beziehung (26) ergibt sich als Spezialfall für  $m = 1$  sowohl aus (27) als auch aus (28). Deshalb werden jetzt diese beiden Gesetzmäßigkeiten verfolgt. Ist das Ausgangsraumgewicht (Schüttraumgewicht)  $\gamma_u$  und die Preßraumhöhe dabei  $l_u$ , dann gilt auch hier die Beziehung (8). Mit dem Raumgewicht für dichteste Packung der festen Teile  $\gamma_e$  bei  $s = S$ , wobei nach obigen Formeln  $p \rightarrow \infty$  wird, ergibt sich dann aus (27):

$$p = \frac{1}{b l_u^{m-1}} \frac{1 - \frac{\gamma_u}{\gamma}}{\left( \frac{\gamma_u - \gamma_u}{\gamma - \gamma_e} \right)^m}, \quad (29)$$

während aus (28) folgt:

$$p = \frac{1}{b} \left( \frac{1 - \frac{\gamma_u}{\gamma}}{\frac{\gamma_u - \gamma_u}{\gamma - \gamma_e}} \right)^m. \quad (30)$$

Für Heu genügt im allgemeinen  $\gamma_u/\gamma_e \approx 0$  einzusetzen. Damit wird aus (27) beziehungsweise (29):

$$p = \frac{1}{b l_u^{m-1}} \left( 1 - \frac{\gamma_u}{\gamma} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma_u} \right)^m, \quad (31)$$

womit für  $m = 1$  [12] aus (26)

$$p = \frac{1}{b} \left( \frac{\gamma}{\gamma_u} - 1 \right) \quad (32)$$

wird. Aus (28) beziehungsweise (30) wird erhalten:

$$p = \frac{1}{b} \left( \frac{\gamma}{\gamma_u} - 1 \right)^m \quad (33)$$

und mit  $1/C = b \gamma_u^m$ :

$$p = C (\gamma - \gamma_u)^m, \quad (25)$$

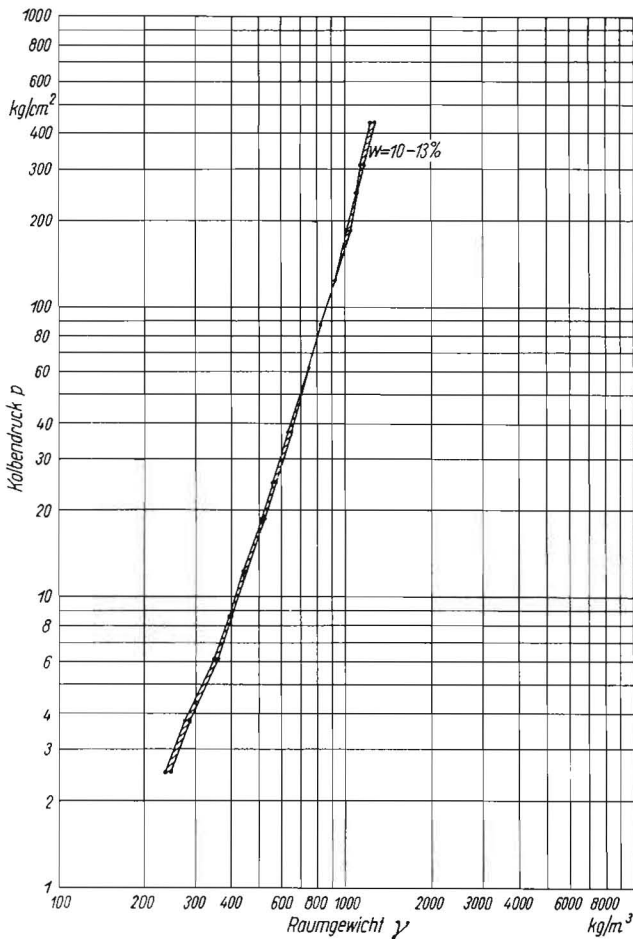


Bild 23: Dieselben Ergebnisse wie in Bild 22 bei beidseits logarithmischer Skaleneinteilung

was schon in [9] benutzt wurde. Allgemein ist zu bemerken, daß das  $\gamma_u$  für Stroh, Heu, Silage und dergleichen nicht leicht genau bestimmbar ist. Daher wird für hinreichend große  $p$  überhaupt nur mit

$$p \approx C \gamma^m \quad (23)$$

gerechnet. Für Arbeitsermittlungen ist aber diese Formel nicht geeignet im Gegensatz zu den für  $\gamma = \gamma_u$  den Wert  $p = 0$  ergebenden Formeln.

In dem Bestreben, eine einheitliche Formel für die Verdichtungs-gesetzmäßigkeiten der verschiedenen Materialien anzugeben, ist aufgestellt worden:

$$p = B \frac{\left(1 - \frac{\gamma_u}{\gamma}\right)^m}{\left(\frac{\gamma_u}{\gamma} - \frac{\gamma_u}{\gamma_e}\right)^n} \quad (34)$$

mit den Stoffkonstanten  $B$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\gamma_e$  und  $\gamma_u$ . Für  $m = 1$  ergibt sich daraus die Roennekesche Beziehung. Für  $m = n$  wird (30) und für  $1/\gamma_e = 0$  die Beziehung (25) damit erhalten, die für Heu in [9] aufgestellt war, woraus für  $\gamma_u \approx 0$  die Skalweitsche Beziehung (23) entsteht. So sind die Gesetzmäßigkeiten sowohl (27) von ROENNEKE als auch (23) von SKALWEIT und (25) vom Verfasser — aber nicht die Exponentialgesetzmäßigkeiten (5) bis (22) — nur Sonderfälle der einen allgemeineren Gesetzmäßigkeit (34).

#### Zusammenfassung

Bei systematischen Versuchen mit landwirtschaftlichen Gütern in Preßtöpfen unter der hydraulischen Presse können für diese Stoffe sich ähnelnde Gesetzmäßigkeiten ermittelt werden. Danach sind die Zusammenhänge zwischen den Drücken an Preßkolben und den erzielten mittleren Raumgewichten, in Diagrammen mit beidseits logarithmischen Skaleneinteilungen aufgetragen, ziemlich gerade. Verschieden sind nur bestimmte Stoffbeiwerte, zum

Beispiel über die absolute Höhe der erzielten Raumgewichte bei bestimmten Drücken.

Entscheidend für das Verhalten der Stoffe sind deren Feuchtigkeitsgehalte. Zum Pressen von Heu verschiedener Feuchtigkeit enthält das bei größerer Feuchtigkeit gepreßte Material bei bestimmten Drücken die größeren Mengen an Trockenmaterial in einem bestimmten Volumen. Damit werden auch die für die Verdichtung auf ein bestimmtes Raumgewicht erforderlichen Arbeiten bei feuchterem Heu erheblich kleiner als bei trockenerem. Bei Versuchen mit Grünfutter ergab sich, daß das Gras von 75% Feuchtigkeit nicht so leicht verdichtbar ist wie andere zur Einsilierung gewonnene, untersuchte Stoffe (Raps, Stoppelklee und Zuckerrübenblatt). Die für die Verdichtung auf ein bestimmtes Raumgewicht erforderlichen Arbeiten je kg Preßgut bei den genannten Stoffen bleiben ungefähr gleich, unterschiedlich dagegen sind die je kg feste Masse sich ergebenden Arbeitsgrößen und die für bestimmte Trockenraumgewichte erforderlichen Arbeitswerte. Einige Versuche mit Seitendruckmessungen ergaben erheblich streuende Ergebnisse, so daß sich keine systematischen Einflüsse der Feuchtigkeit auf die Seitendrücke ableiten lassen.

#### Schrifttum

- [1] SKALWEIT, H.: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. In: 4. Konstrukteur-Kursus. Berlin 1938, Beuth-Vertrieb, S. 30—35, (RKTL-Schriften, Heft 88)
- [2] ALFEROW, S. A.: Gesetzmäßigkeiten beim Strohpressen (russisch). Selchozmašina 1957, Nr. 3, S. 6—10
- [3] MEWES, E.: Kraftmessungen an Strohpressen. In: 15. Konstrukteurheft. Düsseldorf, VDI-Verlag 1958. (Grundlagen der Landtechnik, Heft 10) S. 13—35
- [4] CHRAPATSCHE, E. J.: Festigkeitsberechnung der Preßkammer von Heupressen (russisch). Traktory i Selchozmašiny 1958, Nr. 1, S. 19—22
- [5] LINDER, A.: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Verlag Birkhäuser, Basel 1945 ff. Insbesondere Tafel III
- [6] WEBER, E.: Grundriß der biologischen Statistik. Verlag G. Fischer, Jena 1948. Insbesondere Tabelle 38
- [7] SEGLER, G., u. B. WINKLER: Der Einfluß der Zerkleinerung von grünem Halmfutter auf die Silolagerung. Landtechnische Forschung 5 (1955), S. 42—48
- [8] KRAUSE-BERGEMANN, P. mit W. KREPELA u. J. WAXENEGGER: Versuche zur Erhöhung des Stapelraumgewichtes von gepreßtem Stroh. Landtechnische Forschung 8 (1958), Nr. 4, S. 106—107 und 9 (1959), Nr. 1, S. 27: Berichtigung
- [9] MEWES, E.: Zum Verhalten von Preßgütern in Preßtöpfen. Landtechnische Forschung 8 (1958), Nr. 6, S. 158—164
- [10] SÖHNE, W.: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. In: 10. Konstrukteurheft. Düsseldorf, VDI-Verlag 1952 (Grundlagen der Landtechnik, Heft 3), S. 55
- [11] SÖHNE, W.: Druckverteilung im Ackerboden und Verformbarkeit des Ackerbodens. Kolloid-Z. 131 (1953), Heft 2, S. 89—96
- [12] HOCK, H.: Neuere Forschungsergebnisse auf dem Gebiete der Braunkohlen-Brikettierung. Z. Braunkohle, Wärme und Energie 50 (1951), Heft 3/4, S. 48—58
- [13] HOCK, H., u. H. ROENNEKE: Über die Verdichtung und Verfestigung körniger Haulwerke in einer einfachen Stempelpresse. Z. Braunkohle, Wärme und Energie 54 (1955), Heft 1/2, S. 1—12

#### Résumé

Ernst Mewes: "On the Conformity of the Results of Pressure Experiments to the Laws of Compression."

Systematic experiments made in connection with the compression of various agricultural products in pressure vessels of hydraulic presses showed that the results attained obeyed similar laws for each of the products under notice. The relations between the pressures on the piston of the press and the average weight per unit volume obtained were plotted on logarithmic paper and were found to be fairly linear. The only differences were certain factors such as the maximum weight per unit volume at certain determined pressures for certain products.

The decisive factor in the behaviour of these products under pressure is their moisture content. When compressing hay of varying moisture content it was found that at certain definite pressures the hay having the higher moisture content then had the greater quantity of dry material per unit volume. As a result, the work necessary for the compression of the hay to a certain weight per unit volume was appreciably less with moist hay than was the case with drier hay. Experiments made with green fodder showed that grass having a moisture content of 75% is not so easily compressed as were other agricultural products such as rape, stubble clover and sugar beet leaves. The work required to compress 1 kg. of the previously mentioned products to a pre-determined weight per unit volume is approximately the same. However, the work required to obtain definite "dry" weights varied for each product. Some measurements of side-wall pressures on the pressure container showed such great variation that it was not found possible to determine with any degree of accuracy the effects of moisture on the side-wall pressures.



*Ernst Mewes: Les lois de densification déduites des essais avec les pots de compression*

*Les essais systématiques de densification de produits agricoles dans des pots de compression soumises à l'action de presses hydrauliques ont permis d'en déduire certaines lois analogues auxquelles obéissent les produits. On a pu constater que les rapports entre les pressions développées sur les pistons de compression et les densités moyennes obtenues qui ont été enregistrées sur des papiers pourvus des deux côtés de divisions logarithmiques, évoluent d'une façon à peu près continue. Seuls certains coefficients des produits diffèrent comme par exemple la valeur absolue des densités obtenues sous l'action de pressions déterminées.*

*Le comportement des produits dépend de leur teneur en humidité. La compression de foin à différents degrés d'humidité montre qu'un produit donne des quantités de produits secs en un volume déterminé d'autant plus élevées que son degré d'humidité est plus élevé au moment de la densification. C'est pourquoi un foin plus humide exige, pour sa compression jusqu'à une densité déterminée, un effort beaucoup inférieur à celui nécessaire à la compression d'un foin plus sec. Les essais entrepris avec du fourrage vert ont montré que l'herbe fraîche contenant 75 degré d'humidité ne peut être comprimée aussi facilement qu'un autre produit d'ensilage (par exemple du colza, du trèfle cultivé sur chaumes et des feuilles de betteraves). L'effort nécessaire par kg de produit à comprimer à une densité déterminée est environ équivalent pour les produits mentionnés. Par contre différent les efforts nécessaires par kg de produit densifié et pour la compression à des densités déterminées. Quelques essais pendant lesquels on a mesuré les pressions latérales, ont donné des résultats très dispersés de sorte que l'on ne peut en déduire des règles sur l'influence que l'humidité exerce sur les pressions latérales.*

*Ernst Mewes: «Regularidad de los valores de compresión en pruebas efectuadas en cilindro de compresión.»*

*Se han podido apreciar ciertas regularidades en los valores conseguidos en ensayos de compresión de productos agrícolas en cilindros de compresión bajo la prensa hidráulica. Las relaciones que existen entre la presión que ejerce el pistón y los pesos/volumen medios conseguidos se han recogido en diagramas con escalas logarítmicas en ambos lados presentando líneas casi rectas. Varían tan sólo ciertos valores secundarios, p. e. el valor absoluto del peso/volumen conseguido con presiones determinadas.*

*El comportamiento de los materiales depende de modo decisivo del grado higrométrico. Comprimiéndose henos de un grado higrométrico distinto, el material que tenga el grado más elevado da, a presiones determinadas, la mayor cantidad de material seco en un volumen dado. Con esto el trabajo necesario para la compresión de heno más húmedo a un peso cúbico determinado, resulta bastante más reducido en comparación con henos más secos. En ensayos hechos con diferentes pastos verdes se encontró que la grama con el 75% de humedad no podía comprimirse con la misma facilidad que otros productos cosechados para su ensilamiento (colza, trébol, hojas de remolacha azucarera etc.). El trabajo por kilo de material, necesario para la compresión a un peso cúbico determinado, es aproximadamente igual en los productos ensayados, variando sin embargo el trabajo invertido por kilogramo de material comprimido y los valores que se necesitan para pesos cúbicos determinados. Algunas pruebas hechas para medir las presiones laterales dieron resultados de discrepancia sorprendente, no pudiendo deducirse influencias sistemáticas de la humedad sobre las presiones laterales.*

**Wolfgang Brinkmann:**

## Kalibrierung von Monogermersaatgut

*Institut für Landtechnik, Bonn*

Die Einzelkornsaat von Monogermersaatgut mit Zellenradgeräten erforderte bisher ein genaues wechselseitiges Anpassen von Knäuelgrößen und Zellenmaßen, da sonst übermäßige Fehl- oder Doppelstellen zu erwarten waren. Hohe Ansprüche an eine Größenbegrenzung des Saatgutes mußten daher gefordert werden. Die deutsche Entwicklung ging zunächst von den amerikanischen Erfahrungen aus, nach denen eine Kalibrierung des Saatgutes zwischen Rundlochsieben mit einer Differenz von  $\frac{2}{64}$ '' oder  $\frac{3}{64}$ '' (0,8 oder 1,2 mm) notwendig ist. Die hierzu empfohlene Zellenform hat einen Durchmesser, der um 10% größer als das obere Rundlochmaß ist und dadurch ein leichteres Einschlüpfen der Knäule in die Zelle gewährleistet. Die Tiefe der Zellen, bis zur Spitze des Bohrloches gemessen, ist gleich dem oberen Rundlochmaß. So werden beispielsweise für ein Saatgut, das zwischen  $\frac{19}{64}$  und  $\frac{8}{64}$ '' Rundloch (4,0 und 3,2 mm) abgeseiht wurde, Zellen mit 4,4 mm Durchmesser und 4,0 mm Tiefe benutzt.

Diese, bei den amerikanischen Einzelkornsägeräten üblichen Zellenabmessungen und Kalibrierbereiche brachten jedoch in Deutschland nur bei dem Monogermersaatgut „Verfahren Kleinwanzleben“ den gewünschten Erfolg. Für das segmentierte Monogermersaatgut „Verfahren Prof. Knolle“ erwies es sich als notwendig, einen weiteren Siebvorgang mit einem Schlitzlochsieb nachzuschalten, um die noch im Saatgut gebliebenen flachen Knäule auszuscheiden, die andernfalls zu vermehrten Doppelbelegungen führen. Hierüber ist bereits früher an dieser Stelle ausführlich berichtet worden [1].

Während der letzten zwei Jahre wurde infolgedessen das segmentierte Monogermersaatgut zwischen 4,0 und 3,2 mm Rundloch sowie über 2,6 mm Schlitzloch abgeseiht und in dieser Form als Spezialsaatgut benutzt. Damit waren zwar die Voraussetzungen für eine exakte Einzelkornsaat geschaffen, jedoch mußte man bei der Herstellung dieses Spezialsaatgutes zwei Nachteile in Kauf nehmen:

1. Es wird bei der Herstellung dieses Spezialsaatgutes in der Praxis eine zu geringe Ausbeute von nur 25–30% des als Ausgangsprodukt benutzten Monogermersaatgutes erreicht.
2. Die enge und dazu doppelte Kalibrierung erfordert einen hohen zusätzlichen Aufwand an technischen Einrichtungen und Arbeitsstunden.

Beide Nachteile mußten in Zukunft eine große Verteuerung des Spezialsaatgutes zur Folge haben.

Um die weitere Entwicklung und allgemeine Verbreitung der Einzelkornsägeräte nicht unnötig durch diese offensichtlichen Nachteile zu hemmen, mußte gefordert werden, die Zellenabmessungen und Saatgutgrößen möglichst so einander anzupassen, daß für das segmentierte Monogermersaatgut keinerlei Rundlochkalibrierung und nur noch höchstens eine Schlitzlochsiebung notwendig wird. Gelingt dies, so könnte die Größenbegrenzung des Saatgutes ohne jeglichen zusätzlichen Arbeitsaufwand erreicht werden, da der Aufbereitungsprozeß als Endstufe ohnehin eine Schlitzlochsiebung vorsieht, die dann nur auf ein bestimmtes Maß einzustellen wäre. Gleichzeitig könnte durch den Fortfall zweier Kalibrierungsgrenzen die Ausbeute erheblich gesteigert werden. Damit wären die mit der bisherigen Kalibrierungsmethode verbundenen Nachteile behoben.

### Form und Größe des deutschen Monogermersaatgutes

Zur Erfüllung dieser Forderungen sind grundsätzliche Kenntnisse über die äußere Beschaffenheit des Saatgutes erforderlich. Erst dann kann untersucht werden, mit welchen Zellenmaßen oder mit welcher neuen Zellenform die obengenannten Forderungen erfüllt werden können. Während die amerikanischen Zellenmaße und engen Kalibrierbereiche sehr wahrscheinlich für überwiegend kugelige Knäuelformen gedacht sind, zeigte die bisherige deutsche Kalibrierungsmethode mittels zweier Rundlochsiebe und einem Schlitzlochsieb, daß das Monogermersaatgut sich aus Knäuelteilen verschiedenster äußerer Grundformen zusammensetzt. Als Grundform soll in diesem Zusammenhang diejenige regelmäßige Körperform — wie etwa eine Kugel oder Linse — verstanden sein, die der äußeren Form eines Knäuels oder segmentierten Knäuelteiles am ähnlichsten ist.

Unterstellt man, daß jede solche Grundform zwei senkrecht zueinander stehende Hauptachsen besitzt, so könnte man bei gleich langen Hauptachsen, die gleichzeitig Hauptdurchmesser sind, von einer kugelförmigen Grundform sprechen. Sind die Achsen jedoch verschieden lang und nur die größere ein Durchmessermaß, so liegt eine linsenförmige Grundform vor mit einer Dicke, die dem kleineren Achsenmaß entspricht. Ein aus solchen Grundformen zusammengesetztes Saatgut in seine verschiedenen Anteile gleicher Durchmesser aufzuteilen, gestattet bekanntlich eine Rundlochklassierung, während eine Schlitzlochsiebung dieses Saatgut entsprechend seiner kleineren Hauptachsen klassiert.