

Die Fähigkeiten des Reglers Mensch sind vor allem hinsichtlich seiner Reaktionsgeschwindigkeit begrenzt. Reichen für bestimmte Vorgänge die Fähigkeiten des Menschen nicht mehr aus, dann muß seine Funktion durch technische Regler ersetzt werden. Wie schwierig das ist, zeigen die Versuche mit vollautomatisierten Ackerschleppern [18]. Um diesen Schritt tun zu können, fehlen vor allem geeignete Meß- und Regelsysteme. Im Institut für landtechnische Grundlagenforschung laufen deshalb zur Zeit Forschungsarbeiten, um diese Lücke zu schließen und um zunächst wenigstens eine Teilautomatisierung der Regelfunktionen des Menschen zu ermöglichen.

Schrifttum

Bei der Zusammenstellung des Schrifttums war die Dokumentationsstelle Landtechnik der FAL Braunschweig-Völkenrode behilflich.

- [1] *Schmidlein, H.*: Über den Wissensstand auf dem Forschungsgebiet „Regler“ Mensch. Jb. 1963 d. Wiss. Ges. f. Luft- und Raumfahrt, S. 484/99.
- [2] *Morgan, C. T., J. S. Cook; Chapanis und M. W. Lund*: Human engineering guide to equipment design. New York: McGraw-Hill 1963.
- [3] *Birmingham, H. P. und F. V. Taylor*: A design philosophy for man-machine control systems. Proc. IRE **42** (1954), S. 1748/58.
- [4] *Effertz, F. H. und F. Kolberg*: Einführung in die Dynamik selbsttätiger Regelungssysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag 1963.
- [5] *McRuer, D. T. und E. S. Krendel*: The human operator as a servo system element. J. Franklin Inst. **267** (1959), S. 381/403 und S. 511/36.
- [6] *North, J. D.*: The human transfer function in servo systems. Automatic and manual control. New York: Academic Press Inc. 1952, S. 473/501.

- [7] *Trustin, A.*: The nature of the operator's response in manual control, and its implications for controller-design. J. Inst. Electrical Engrs. **94**, Part II A (1947), S. 190/202.
- [8] *Küpfmüller, K.*: Informationsverarbeitung durch den Menschen. Nachricht.-techn. Z. (1959) H. 2, S. 68/74.
- [9] *Bekey, G. A.*: Discrete models of the human operator in a control system. Automatic and remote control (Applications and Components) 2nd Congress of the Int. Fed. Autom. Control Basel 1963, S. 430/38.
- [10] *Kersting, E.*: Über die Ein-Mann-Arbeit bei der Schlepperlängshacke in Rüben. Landtechn. Forsch. **15** (1965) H. 6, S. 178/82.
- [11] *Schünke, U.*: Fahrgeschwindigkeit und Beanspruchung des Menschen bei Ein- und Zweimannarbeit mit Schlepperanbaugeräten. Grundl. Landtechn. Heft 19 (1964), S. 11/18.
- [12] *Heller, C.*: Sichtbare Verluste in der Zuckerrübenerte durch die Rodeorgane. Landtechn. Forsch. **10** (1960) H. 5, S. 117/21.
- [13] *Wolfe, J. S.; F. K. Daynes und D. A. Bull*: Tractor steering in rowcrop cultivations. J. Agric. Engng. Res. **5** (1960) Nr. 2, S. 141/52; Nr. 3, S. 316/35 und Nr. 4, S. 406/17.
- [14] *Bronstein, Ja. L.*: Statistische Analyse der Arbeit einer automatischen Steuerung von Schleppern. Mechanizacija i Elektrifikacija **22** (1964) H. 2, S. 14/19, russ.
- [15] *Zimdahl, W.*: Führungsverhalten des vierrädrigen Straßenzugs bei Regelung des Kurses auf festgelegter Bahn. Regelungstechn. **13** (1965) H. 5, S. 221/26.
- [16] *Lehmann, A. und F. Stier*: Mensch und Gerät. Handbuch der Arbeitsmedizin I. Berlin, Wien, München: Verlag Urban und Schwarzenberg 1961, S. 718/87.
- [17] *Fiala, E.*: Lenken von Kraftfahrzeugen als kybernetische Aufgabe. Automob.-techn. Z. **68** (1966) Nr. 5, S. 156/62.
- [18] *Gilmour, W. D.*: An automatic control system for farm tractors. J. Agric. Engng. Res. **5** (1960) Nr. 4, S. 418/32.

DK 631.364.5:633.004.12/635.004.12

Über den Verdichtungs Vorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern und die dabei auftretende Wandreibung

Von **Hans Otto Sacht**, Braunschweig¹⁾

Es wird über neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Verdichtung von Halmgut anhand experimenteller und theoretischer Untersuchungen berichtet. Behandelt wurde der Druckbereich der Ballen- und der Brikettierpressen, der sich von etwa 1 kp/cm² bis über 1000 kp/cm² erstreckt. Aufgezeigt werden die Zusammenhänge zwischen aufgewendetem Preßdruck, erreichbarer Dichte des Halmgutes sowie der Verdichtungsarbeit. Der Seitendruck und das Reibungsverhalten des verdichteten Halmgutes beim Gleiten an einer Stahlwand werden unter besonderer Berücksichtigung des bedeutenden Einflusses der Halmgutfuchte untersucht.

Die Halmgutbergung nimmt in der Landwirtschaft einen bedeutenden Platz ein. In den immer nur kurzen Erntezzeiten müssen große Heu-, Stroh- und Grüngutmassen, die zumeist außerordentlich voluminös anfallen, verarbeitet und geborgen werden. Dabei werden in erheblichem Maße Maschinen eingesetzt, die die notwendigen Arbeitsgänge verrichten, wie Feldhäcksler, Ladewagen, Ballenpressen und in Zukunft vielleicht auch Brikettierpressen. Bei einigen dieser Halmgut-

erntemaschinen treten neben den Aufnahme-, Arbeits- und Fördervorgängen Verdichtungs- und Reibungsvorgänge auf, die die Leistungsfähigkeit der Maschinen, die erzielte Arbeitsqualität sowie die Betriebssicherheit beeinflussen und daher für die Konstruktion und Entwicklung dieser Maschinen in vielen Fällen von grundlegender Bedeutung sind. Im folgenden werden neuere Ergebnisse und Erkenntnisse über das Verhalten des Halmgutes beim Verdichtungs- und Reibungsvorgang aufgrund experimenteller und theoretischer Untersuchungen wieder gegeben.

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen dem aufgewendeten Preßdruck und der damit erreichbaren Dichte behandelt. In enger Verbindung hiermit steht der zweite Punkt, die Verdichtungsarbeit. Um den bei einer Halmgutverdichtung auftretenden Seitendruck abschätzen zu können, werden anschließend gemessene Querdrukkzahlen angegeben. An letzter Stelle werden dann die Eigenschaften des Halmgutes beim Reiben auf einer Stahlwand erörtert.

Preßdruck und Preßdichte

Stellt man sich in einem Preßtopf eine bestimmte Halmgutmenge vor, die durch einen Kolben langsam zusammengedrückt wird, so steigt die Dichte des Materials wegen des kleiner werdenden Volumens an. Der aufzuwendende Kolbendruck nimmt mit steigender Dichte progressiv zu. Wird Preßgut mit verschiedenen Feuchtegehalten verdichtet, so ergeben sich unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten zwischen dem Kolbendruck und

¹⁾ Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 25. Oktober 1966.

Dr.-Ing. Hans Otto Sacht ist Konstrukteur in der Firma Gebr. Welger, Wolfenbüttel. Die vorstehende Arbeit ist während seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H. J. Matthies) der Technischen Hochschule Braunschweig entstanden.

der Preßdichte. Um über diese Zusammenhänge Klarheit zu bekommen, wurde eine große Anzahl von Preßtopfversuchen durchgeführt: eine Versuchsreihe im Druckbereich der Brikettierpressen und eine im anschließenden unteren Druckbereich der Ballenpressen. Beide Arbeiten sind nunmehr abgeschlossen [1 bis 3]; sie werden z. Z. im Gebiet noch geringerer Drücke, dem Druckbereich lagernder Haufwerke, fortgesetzt.

Ein Beispiel für die Abhängigkeit des Preßdruckes von der Preßdichte, wie sie sich bei trockenem Wiesenheu einstellt, zeigt **Bild 1**. Der Preßtopf, in dem das eingefüllte Halmgut verdichtet wird, ist oben im Bild schematisch dargestellt. Bei jeder Kolbenstellung besteht ein bestimmter Zusammenhang zwischen dem aufgebracht Kolbendruck und der mittleren Dichte des Materials, der sogenannten Preßdichte ρ . Diese Gesetzmäßigkeit zeigt das Diagramm mit der Preßdichte als Abszisse und dem Kolbendruck als Ordinate. Da bei hohen Dichtewerten der Kolbendruck stark progressiv ansteigt, wird er zweckmäßig in logarithmischem Maßstab aufgetragen und die Dichte in linearem belassen.

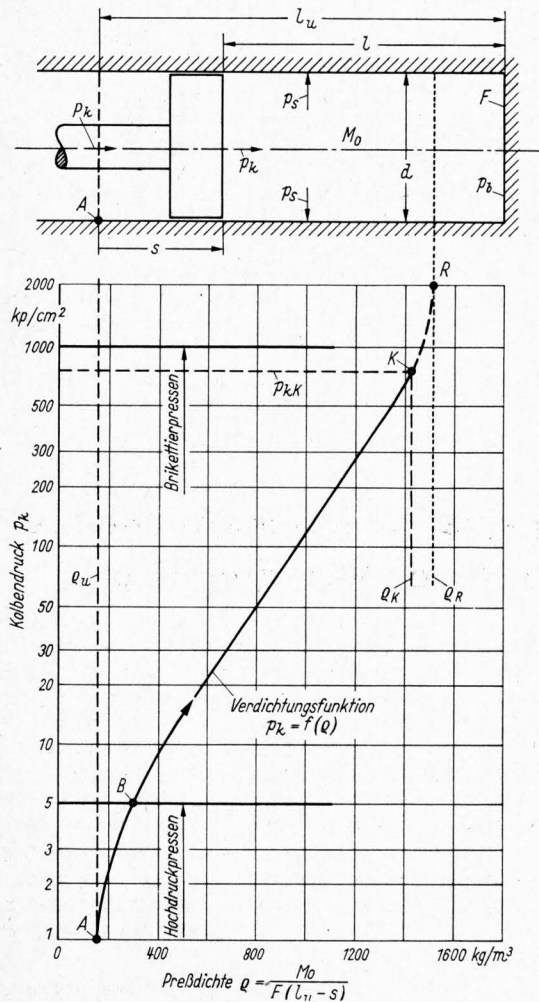


Bild 1. Schema einer Preßtopf-Versuchseinrichtung und allgemeiner Verlauf der Verdichtungsfunktion im gesamten Druckbereich für Ballen- und Brikettierpressen nach Busse [1].

Bei Beginn der Verdichtung bei einem Druck, der hier zu 1 kp/cm^2 angenommen wird, hat das Material bereits eine endliche Preßdichte. Die Verdichtungsfunktion beginnt also nicht im Koordinatenanfangspunkt, sondern bei dem endlichen Wert ρ_u . Andererseits kann die Dichte des Halmgutes aber auch nur so lange zunehmen, bis sämtliche Luft ausgepreßt ist. Dieser Höchstwert ist als Reindichte ρ_R in das Diagramm eingetragen. Die Verdichtungsfunktion muß also zwischen diesen beiden Grenzen verlaufen. Wie die Versuche zeigen, ist die Verdichtungskurve zunächst rechts- und dann linksgekrümmt; dazwischen verläuft sie etwa geradlinig.

Die dargestellte Verdichtungsfunktion gilt, wie schon erwähnt, nur für trockenes Wiesenheu. Bei feuchtem Material

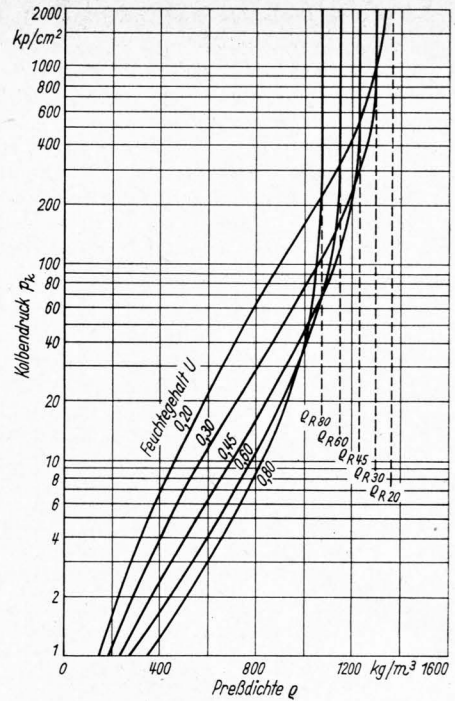


Bild 2. Verlauf der Verdichtungsfunktion bei verschiedenen Feuchtegehalten des Halmgutes im Druckbereich für Ballen- und Brikettierpressen.

Preßgut: Wiesen gras
Druckbereich über 20 kp/cm^2 nach Busse [1]
Druckbereich unter 20 kp/cm^2 nach Verfasser

haben die Kurven sowohl eine andere Lage als auch eine andere Richtung. Im unteren Druckbereich steigt die Dichte mit zunehmendem Feuchtegehalt an, da das Wasser die Halmgutmasse und damit die Dichte vergrößert. Im oberen Druckbereich ergibt sich jedoch gerade eine umgekehrte Tendenz. Hier ist sämtliche Luft aus dem Halmgut herausgepreßt, so daß es nur noch aus Trockensubstanz und Wasser besteht. Die Dichte dieses Zweistoffgemisches, die Reindichte ρ_R , ist aber um so größer, je mehr Trockensubstanz das Preßgut enthält, d. h., je geringer der Feuchtegehalt ist. Denn die Reindichte der Trockensubstanz ist mit rd. 1500 kg/m^3 höher als die Dichte des Wassers mit 1000 kg/m^3 . Faßt man diese von Busse [1] analytisch gefundenen Zusammenhänge mit den Ergebnissen der Preßversuche zusammen, so ergeben sich die in **Bild 2** dargestellten Verdichtungs-funktionen für verschiedene Feuchtegehalte. Im unteren Druckbereich treten bei den hohen Feuchtegehalten die größeren Dichtewerte auf; im oberen Druckbereich werden die großen Dichtewerte nur bei den trockenen Preßgütern erreicht.

In **Bild 2** sind nur die Verdichtungskurven für die Feuchtegehalte 20%, 30% usw. enthalten. Sollen aber Zwischenwerte

Verwendete Formelzeichen

| | |
|------------------|---|
| A_V | Verdichtungsarbeit |
| $B_{0,1}$ | Stoffkonstanten für Gl. (4) |
| C | Stoffkonstante für Gl. (2) |
| C' | Stoffkonstante für Gl. (3) |
| $c_{0, 1, 2, 3}$ | Stoffkonstanten für Gl. (1) |
| m | Stoffkonstante für Gl. (2) und (3) |
| M_0 | Einfüllmenge (Masse des eingefüllten Halmgutes) |
| p_b | Bodendruck |
| p_k | Kolbendruck |
| p_s | Seitendruck |
| p_x | Längsdruck |
| U | Feuchtegehalt, auf die Gesamtmasse bezogen |
| μ | Gleitreibbeiwert |
| v_d | Querdruhzahl |
| ρ | mittlere Preßdichte des Halmgutes, aus der Gesamtmasse (Trockensubstanz + Wasser) und dem jeweiligen Volumen errechnet |
| ρ_{Tr} | mittlere Trockensubstanzdichte, aus der Trockenmasse (bei gleichem Volumen wie ρ) errechnete Dichte des gepreßten Halmgutes |
| ρ_R | aus der Gesamtmasse (Trockensubstanz + Wasser) und dem Volumen (ohne Luft) errechnete Reindichte des Halmgutes |
| ρ_{RT} | aus der Trockenmasse (bei gleichem Volumen wie ρ_R) errechnete Reindichte des Halmgutes |
| ρ_u | Dichte des Halmgutes im ungepreßten Zustand |

wie z. B. 27% untersucht werden, so ist es zweckmäßig, die Meßwerte in einer anderen Form darzustellen. Dazu entnimmt man für jeweils gleiche Drücke die bei den verschiedenen Feuchtegehalten erzielten Preßdichten und trägt diese in Abhängigkeit von den Feuchtegehalten auf; dabei ergeben sich die in Bild 3 wiedergegebenen Linien gleicher Drücke. Man kann diesem Diagramm einfach und anschaulich entnehmen, welche

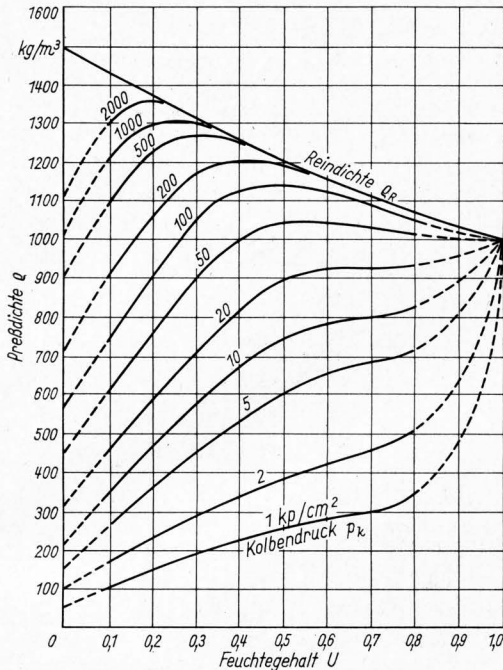


Bild 3. Die in einem Preßtopf erreichbare, aus der Gesamtmasse des Halmgutes errechnete Preßdichte q in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für verschiedene hohe Kolbendrucke (nach Werten in Bild 2).

Preßgut: Wiesengras

Preßdichte bei verschiedenen Feuchtegehalten mit einem bestimmten Preßdruck (beispielsweise 10 kp/cm^2) erreicht werden kann. Auffallend ist, daß alle Kurven für den Feuchtegehalt $U = 1,0$ in den Punkt $q = 1000 \text{ kg/m}^3$ einlaufen. Hier wird reines Wasser verdichtet, das bei den vorliegenden Drücken als inkompressibel angesehen werden kann. Als obere Begrenzung enthält das Diagramm den Verlauf der Reindichte q_R , der mit Hilfe einer einfachen Gleichung [3] zu berechnen ist. Bei hohen Preßdrücken werden diese Werte fast erreicht, deshalb laufen die entsprechenden Drucklinien tangential an die Kurve der Reindichte heran. Der Verlauf der Reindichte zeigt die schon erwähnte Tatsache, daß die höchsten Dichtewerte selbst bei noch so großen Drücken nur bei geringen Feuchtegehalten des Halmgutes erreicht werden können.

Die hier dargestellten Preßdichten werden zu einem erheblichen Teil durch die Masse des je nach Feuchtegehalt mehr oder weniger hohen Wasseranteils bestimmt. Da aber im Grunde bei der Beurteilung von Verdichtungs Vorgängen nicht so sehr die Wassermasse als vielmehr die in dem Preßgut enthaltene Trockenmasse interessiert, bringt es Vorteile, die Preßdichte nicht wie in Bild 3 aus der Gesamtmasse, sondern aus der Trockenmasse zu errechnen. Die mit Hilfe der Beziehung $q_{Tr} = q(1 - U)$ umgerechneten Meßwertkurven für Wiesengras zeigt Bild 4. Die dargestellte, aus der Trockenmasse errechnete Preßdichte gibt an, welche Dichte das Halmgut noch haben würde, wenn es bei konstant bleibendem Volumen völlig, d. h. bis auf den Feuchtegehalt $U = 0$, herabgetrocknet würde. Die obere Grenze der aus der Trockenmasse errechneten Reindichten, die Linie q_{RTr} verläuft in dieser reduzierten Form schwach gekrümmt von der Reindichte der Trockensubstanz 1500 kg/m^3 bis zur Trockensubstanzdichte Null bei dem Feuchtegehalt $U = 1,0$. Dieser stark abfallende Verlauf der Grenzkurve q_{RTr} zeigt, daß mit zunehmenden Feuchtegehalten nur geringere Trockensubstanzdichten erreicht werden können. Wird beispielsweise Halmgut mit 50% Feuchtegehalt verdichtet, so kann keine größere Trockensubstanzdichte als 600 kg/m^3 erzielt

werden; bei $U = 15\%$ ist dagegen bei entsprechend hohem Preßdruck der doppelte Wert zu erreichen.

Diese Feststellung stimmt weitgehend mit den praktischen Erfahrungen überein. Ein bei großem Feuchtegehalt zusammengepreßter Ballen oder Preßling ist nach der Trocknung verhältnismäßig leicht und locker, denn das zunächst mitverdichtete Wasser wird dem Gut entzogen und hinterläßt entsprechend große Hohlräume. Dieser Zusammenhang dürfte einer der wesentlichen Gründe dafür sein, daß die nach dem Normaldruckverfahren arbeitenden Brikettiermaschinen trotz hoher Preßdrücke nur bei geringen Gutfeuchten haltbare Briketts liefern; denn zum Zusammenhalten der Briketts sind hohe Trockensubstanzdichten erforderlich, die nach Bild 4 grundsätzlich nur bei geringen Feuchten erzielt werden können.

Die einzelnen Kurvenverläufe unterhalb der Linie q_{RTr} lassen folgende Eigenarten des Halmgutes erkennen: Bei Preßdrücken zwischen 1 und 5 kp/cm^2 , also im Druckbereich der Ballenpressen, läßt sich das Wiesengras am leichtesten im sogen. Welkbereich bei Feuchtegehalten um 35% verdichten. Das Gut ist hier — wie auch die Erfahrung zeigt — besonders schlaff und hat damit eine geringe Druckfestigkeit. Die trockeneren Halme dagegen sind sperrig und spröde und bieten der Verdichtung einen größeren Widerstand, während sich beim feuchten Material das mitverdichtete Wasser und der höhere Zeldruck festigkeitserhöhend auswirkt. Ähnliche Tendenzen sind auch aus Untersuchungen über die Biegesteifigkeit von Einzelhalmen bekannt, die von Wieneke [4] im Rahmen umfangreicher Arbeiten über das Wickeln von Halmgütern festgestellt worden sind. Die Biegesteifigkeit welken Gutes ist gegenüber der von trockenem und feuchtem Material minimal, was auf dieselben Ursachen zurückzuführen ist.

Die gezeigten Kurven in Bild 4 gelten für das Preßgut Wiesengras. Bei Luzerne ergeben sich, insbesondere im unteren Druckbereich, abweichende Tendenzen, Bild 5. Während die Linien gleicher Drücke bei dem Wiesengras das beschriebene ausge-

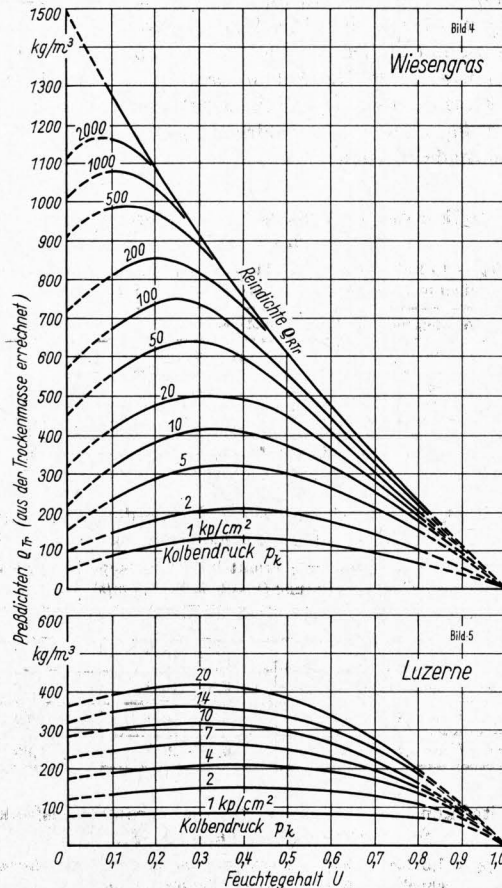


Bild 4 und 5. Die in einem Preßtopf erreichbare, aus der Trockenmasse des gepreßten Halmgutes errechnete Preßdichte q_{Tr} in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für verschiedene hohe Kolbendrucke (nach Werten in Bild 2).

Preßgut: Wiesengras und Luzerne

prägte Maximum aufweisen, zeigen sich bei Luzerne über dem breiten Feuchtegehaltsbereich von $U = 0,15$ bis $0,50$ flache Verläufe. Dieser Unterschied ist so zu erklären, daß die dicken Stengel der Luzerne gegenüber den feineren Halmen des Wiesen-grases im Welkbereich nicht so stark an Festigkeit verlieren, da der größere Aufbau festigkeitsmäßig günstiger ist.

Diese Gesetzmäßigkeiten sind nicht nur für die Beurteilung von Verdichtungsvorgängen von Interesse, sondern sie haben auch für die Belüftung bzw. Nachtrocknung verdichteten Halmgutes Bedeutung. Wird Wiesen-gras mit stark schwankendem Feuchte-gehalt gepreßt und gestapelt, so ergeben sich nach Bild 4 unterschiedliche Trockensubstanzdichten; diese haben aber auch unterschiedliche Belüftungswiderstände zur Folge, und zwar in der Weise, daß das feuchtere Gut dichter lagert. So streicht die Luft vor allem durch die trockeneren Partien, obwohl gerade die feuchteren Stellen stärker belüftet werden sollten. Um diese unerwünschten Erscheinungen zu vermeiden, muß beim Einbringen von Belüftungswiesenheu besonders genau auf eine möglichst gleichmäßige Gutfeuchte geachtet werden. Die flacheren Kurvenverläufe der Luzerne zeigen, daß diese Schwierigkeiten in dieser Hinsicht nicht in dem Maße auftreten.

Um mit den dargestellten Beziehungen zwischen aufgewendetem Preßdruck und erreichbarer Dichte auch rechnen zu können, lassen sie sich durch empirisch aufgestellte Formeln beschreiben. Es ist bisher nicht gelungen, für den gesamten Druckbereich der Halmgutverdichtung eine einfache Gleichung mit den dazugehörigen Stoffkonstanten zu entwickeln. Es ist daher notwendig, die Gesetzmäßigkeiten für verschiedene Druckbereiche aufzustellen.

Für den Druckbereich der Brikettierpressen (p_k größer als 15 kp/cm^2) hat Busse [1; 3] folgenden Exponentialansatz entwickelt:

$$p_k = e^{(c_0+c_1U) + (c_2+c_3U)\rho} \quad (1).$$

Die Stoffkonstanten c_0 bis c_3 der verschiedenen in Frage kommenden Halmgüter sowie die oberen Gültigkeitsgrenzen der Gleichung sind bereits in [3] ausführlich dargestellt; hier sollen auszugswise nur die Grenzen der Werte c_0 bis c_3 für die wichtigsten Halmgüter in **Tafel 1** wiedergegeben werden. Dabei sind der Feuchtegehalt U als Zahlenwert von 0 bis 1, die Preßdichte ρ in kg/m^3 und der Preßdruck p_k in der Einheit kp/cm^2 Gl. (1) zugrunde zu legen.

Tafel 1. Stoffkonstante c_0 bis c_3 für die Verdichtungsfunktion nach Gl. (1).

Gültig für $p_k > 15 \text{ kp/cm}^2$, $\rho < 1170$ bis 1460 kg/m^3 ; ermittelt im Preßtopf bei einmaliger, langsamer Verdichtung ($v \approx 4 \text{ mm/s}$).

| | Weidelgras | Rotklee | Luzerne |
|-------|---|---|---|
| c_0 | 1,0 bis 1,15 | 1,25 bis 1,35 | 1,60 bis 2,00 |
| c_1 | - 4,6 bis - 5,8 | - 5,0 bis - 6,5 | - 6,1 bis - 6,4 |
| c_2 | $4,0 \cdot 10^{-3}$ bis $4,4 \cdot 10^{-3}$ | $4,0 \cdot 10^{-3}$ bis $4,3 \cdot 10^{-3}$ | $3,3 \cdot 10^{-3}$ bis $4,2 \cdot 10^{-3}$ |
| c_3 | $1,3 \cdot 10^{-3}$ bis $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $2,3 \cdot 10^{-3}$ bis $3,9 \cdot 10^{-3}$ | $2,3 \cdot 10^{-3}$ bis $3,1 \cdot 10^{-3}$ |

Tafel 2. Stoffkonstante C und m für die Verdichtungsfunktion trockener Preßgüter nach Gl. (2).

Gültig für $p_k = 1,5$ bis 5 kp/cm^2 ; ermittelt im Preßkopf bei einmaliger, schneller Verdichtung ($v = 0,25$ bis $1,0 \text{ m/s}$)

| | C | m |
|------------------------|----------------------|------|
| Weizenstroh $U = 0,11$ | $2,53 \cdot 10^{-3}$ | 1,47 |
| Haferstroh $U = 0,11$ | $9,8 \cdot 10^{-4}$ | 1,59 |
| Luzerneheu $U = 0,16$ | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | 1,69 |
| Wiesenheu $U = 0,14$ | $6,75 \cdot 10^{-5}$ | 1,96 |

Tafel 3. Stoffkonstante C' und m für die Verdichtungsfunktion feuchter Preßgüter nach Gl. (3).

Gültig für $p_k = 1,5$ bis 15 kp/cm^2 ; ermittelt im Preßkopf bei einmaliger, schneller Verdichtung ($v = 0,25$ bis $1,0 \text{ m/s}$)

| | C' | m |
|-----------------------------------|--------------------|------|
| Wiesen-gras $U = 0,15$ bis $0,55$ | $5 \cdot 10^{-7}$ | 2,49 |
| Luzerne $U = 0,15$ bis $0,55$ | $75 \cdot 10^{-7}$ | 2,10 |

Im unteren Druckbereich, dem Bereich der Ballenpressen und etwas darüber (p_k kleiner als 15 kp/cm^2) ist es zweckmäßig, zwei Formeln in der Art des bekannten *Skalweitschen* Potenzansatzes zu verwenden — eine für die wichtigen trockenen Preßgüter und eine für feuchte Preßgüter. Für das Verdichten trockenen Preßgutes gilt mit guter Näherung die ursprüngliche *Skalweitsche* Gleichung [5]:

$$p_k = C \rho^m \quad (2).$$

In diese Zahlenwertgleichung ist wie oben der Wert der Preßdichte ρ in kg/m^3 und des Preßdruckes p_k in kp/cm^2 einzusetzen. Die Stoffkonstanten C und m sind in **Tafel 2** dargestellt, ebenso die Anwendungsgrenzen und die Versuchsdaten.

Um die Zusammenhänge zwischen Preßdruck und Preßdichte bei feuchtem Preßgut mathematisch zu beschreiben, kann die *Skalweitsche* Gleichung durch Einführung des Feuchtegehaltes U folgendermaßen erweitert werden:

$$p_k = \frac{C'}{U} \rho^m \quad (3).$$

Der Feuchtegehalt U ist als Zahlenwert von 0 bis 1 einzusetzen, für die Preßdichte ρ und den Preßdruck p_k sind wieder die bereits genannten Einheiten kg/m^3 und kp/cm^2 zu verwenden. Die Stoffkonstanten C' und m für Wiesen-gras und Luzerne, die Gültigkeitsgrenzen und ebenfalls die Versuchsdaten sind in **Tafel 3** zusammengefaßt.

Verdichtungsarbeit

Summiert man bei der Verdichtung des Halmgutes im Preßtopf die Kolbenkraft über dem Kolbenweg auf, so erhält man die zu leistende Verdichtungsarbeit. Sie ist aufgrund dieser Definition eng mit der Verdichtungsfunktion verbunden und hängt deshalb auch in erster Linie vom Kolbendruck und vom Feuchtegehalt des Preßgutes ab. **Bild 6** zeigt die bei den Preßtopf-Versuchen festgestellte spezifische, d. h. auf die Halmgutmasse bezogene Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Halmgutes; der Kolbendruck p_k ist als Parameter eingetragen. Die gesuchten Werte lassen sich entweder direkt aus dem Diagramm entnehmen oder mit Hilfe der von Busse aufgestellten empirischen Gleichung

$$\frac{A_v}{M_0} = e^{B_0 + B_1 U} \quad (4)$$

berechnen, für die die Stoffkonstanten B_0 und B_1 in **Bild 6** tabelliert sind. Die verhältnismäßig geringen Absolutwerte des Diagramms — selbst im Brikettierdruckbereich noch unter 6 PS je t/h — sind dadurch zu erklären, daß hier nur die reine Verdichtungsarbeit dargestellt ist. Verschiebe-, Ausschiebe- und

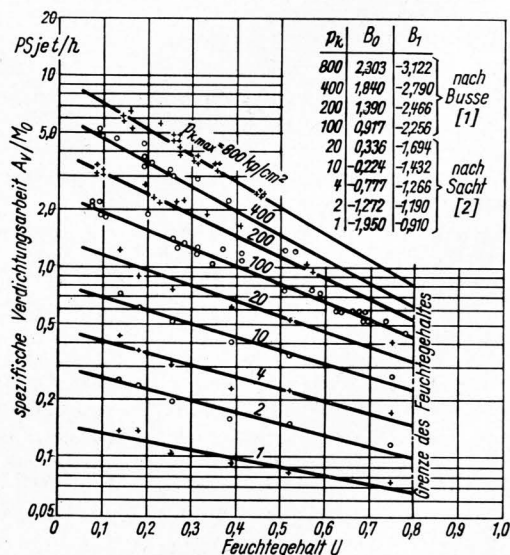


Bild 6. Spezifische Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Kolbendruck.

Preßgut: Wiesen-gras, Luzerne; ermittelt im Preßkopf bei einmaliger Verdichtung

sonstige Reibarbeiten sowie Übertragungsverluste in ausgeführten Maschinen vergrößern die angegebenen Werte zumeist noch um ein vielfaches und müssen gesondert abgeschätzt werden.

Seitendruck

In vielen Fällen interessiert neben den gezeigten Zusammenhängen zwischen Preßdruck, Preßdichte und Verdichtungsarbeit auch der bei der Halmgutverdichtung auftretende Seitendruck, zum Beispiel bei der festigkeitsmäßigen Auslegung des Preßkanals einer Ballenpresse. Diese Werte wurden bei den genannten Preßtopfversuchen ebenfalls ermittelt.

Der in einem Preßwerkzeug mit parallelen Wänden herrschende Seitendruck p_s läßt sich mit der aus der Mechanik bekannten Gleichung

$$p_s = \frac{\nu_d}{1 - \nu_d} p_x$$

aus dem Längsdruck p_x berechnen. Darin ist die sogenannte Querdru ckzahl ν_d eine Stoffgröße, die die Fähigkeit des Halmgutes kennzeichnet, Längsdrücke in Seitendrü cke zu übertragen. Sie hängt, wie die Meßwerte in Bild 7 zeigen, in erster Linie von der Preßdichte und vom Feuchtegehalt des Gutes ab. Die Meßwertkurven und -punkte lassen erkennen, daß zu Beginn einer angenommenen Verdichtung, d. h. bei kleinen Dichtewerten, die Halme in die noch reichlich vorhandenen Hohlräume ausweichen, ohne nennenswerte Querdru ckzahlen und damit Seitendrü cke hervorzurufen. Mit zunehmender Dichte werden die

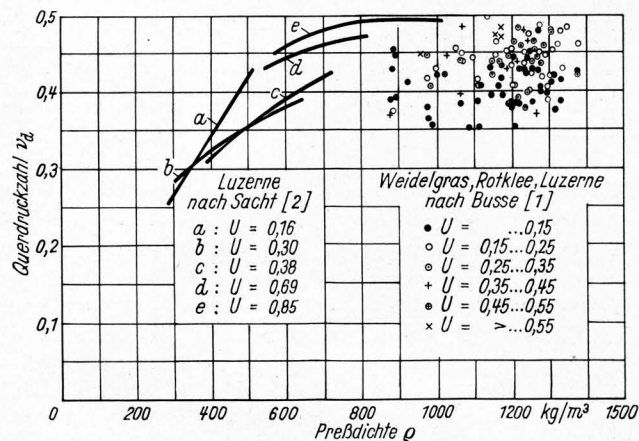


Bild 7. Querdru ckzahlen in Abhängigkeit von Preßdichte und Feuchtegehalt.

Werte im Dichtebereich oberhalb 800 kg/m³ für verschiedene Güter nach Busse [1], Meßwertkurven im unteren Dichtebereich für Luzerne nach Verfasser [2].

Hohlräume jedoch ständig geringer, so daß das Gut gezwungen ist, sich stärker seitlich auszudehnen, was sich in dem Anstieg der Querdru ckzahlen bemerkbar macht. Im Dichtebereich des Brikettierens über 800 kg/m³ verhält sich das Gut schon ähnlich wie ein elastischer Stoff, so daß die Querdru ckzahl hier etwa konstant bleibt. Der Feuchtegehalt des Preßgutes wirkt sich dahingehend aus, daß der größere Wasseranteil die Kurven bzw. Punkte in Richtung auf die Linie $\nu_d = 0,5$ verschiebt, d. h., die Seitendrü cke werden fast so groß wie die Längsdrücke.

Reibbeiwerte

Neben den bisher erläuterten Zusammenhängen beim Verdichtungsvorgang (Verdichtungsfunktion, Verdichtungsarbeit und Seitendruck) konnte bei den Preßtopfversuchen auch der Vorgang der Reibung des verdichteten Halmgutes an der Preßtopfwand untersucht werden. Ausgehend von dem bekannten Coulombschen Ansatz „Reibungskraft ist das Produkt aus Reibbeiwert und Normalkraft“ ist der Reibbeiwert μ eine Kennzahl, die die Reibungseigenschaften des Gutes beschreibt. Bekanntlich muß zwischen den Haft- und den zumeist etwas kleineren Gleitreibbeiwerten unterschieden werden. Hier soll vor allem nur auf die letzteren eingegangen werden — für die

Haftreibbeiwerte ergeben sich ähnliche Tendenzen [3]. Bild 8 zeigt die gemessenen Gleitreibbeiwerte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Es sind die Kurven a, b und c dargestellt; die Meßpunkte gehören zur Kurve a.

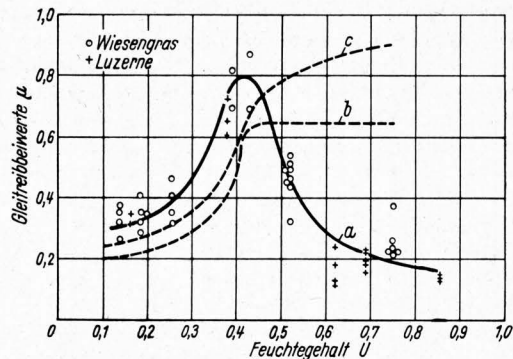


Bild 8. Abhängigkeit des Gleitreibbeiwertes vom Feuchtegehalt des Halmgutes beim Gleiten auf glatter Stahlfläche.

- a Wiesengras und Luzerne bei 10 bis 15 kp/cm² Normaldruck auf die Reibfläche nach Verfasser [2]
- b Luzerne bei nicht angegebenem Normaldruck nach Blevins und Hansen [7]
- c Graseinzelhalme bei Normaldrü cken unter 0,005 kp/cm² nach Wieneke [6]

Im Welkbereich mit $U = 0,40$ fällt das herausragende Maximum der Kurve a auf, das durch die große Oberflächenrau higkeit des sogenannten Halbheues hervorgerufen wird. Mit abnehmendem Feuchtegehalt gehen die Gleitreibbeiwerte auf die Hälfte und weniger zurück, da die Festigkeit der Härchen und Kanten auf den Halm- und Blattoberflächen mit wachsender Austrocknung abnimmt. Die Kurven a, b und c verlaufen in diesem unteren Feuchtebereich in ähnlicher Form, wobei die etwas voneinander abweichenden Absolutwerte wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Reibflächen bedingt sind. Bei Feuchtegehalten oberhalb 40% treten jedoch erhebliche und grundsätzliche Unterschiede zwischen den einzelnen Kurvenverläufen auf, die auf die stark voneinander abweichenden Normaldrü cke zurückzuführen sind. Die Meßwerte der Kurve a wurden bei einem Normaldruck von 10 bis 15 kp/cm² ermittelt, bei dem viele Halme und Zellen beschädigt wurden, so daß Zellsaft austrat, der die Reibfläche benetzte. Auf diese Weise bildete sich eine Art Schmierung, die den Reibbeiwert je nach Feuchtegehalt des Gutes mehr oder weniger stark herabsetzte.

Die Reibbeiwerte der Kurve c [6] nehmen demgegenüber mit ansteigendem Feuchtegehalt noch zu. Bei diesen Versuchen wurden Graseinzelhalme mit so geringen Auflagedrü cken verwendet, daß die Zellen keine Beschädigungen erlitten. Bei dem geringen Druck spielen die Härchen und Kanten eine entscheidende Rolle, die bei dem hohen Feuchtegehalt und damit Zelldruck fest und steif sind und damit verhältnismäßig große Reibkräfte übertragen. Über die Versuchsdaten der Kurve b [7] liegen leider keine Angaben vor; aufgrund des waagerechten Kurvenverlaufes ist jedoch anzunehmen, daß mit einem nur geringen Normaldruck gearbeitet wurde.

Neben den gezeigten Einflüssen von Feuchtegehalt und Normaldruck ist interessant, daß das Diagramm für die Gleitreibbeiwerte von Wiesengras und Luzerne keine wesentlichen Unterschiede aufweist. Auch die Reibbeiwerte von Weizen- und Haferstroh, die hier nicht angegeben sind, liegen in dem dargestellten Streubereich, so daß der Schluß zu ziehen ist, daß die Gutart von untergeordneter Bedeutung ist, während der Feuchtegehalt des Gutes und der Normaldruck den Reibbeiwert dadurch entscheidend beeinflussen, daß sie die Oberflächenrau higkeit und den durch Zellsaftaustritt hervorgerufenen Schmiereffekt bestimmen.

Zusammenfassung

Es wurde über Ergebnisse von Preßtopfversuchen berichtet, die einige Rückschlüsse auf das Verhalten des Halmgutes beim Verdichtungs- und Reibungsvorgang ermöglichen.

Trockenes Halmgut läßt sich nur schwer verdichten, da die Halme, Stengel und Blätter spröde, sperrig und damit besonders druckfest sind; entsprechend ist auch eine hohe Ver-

dichtungsarbeit aufzuwenden. Mit hohen Drücken, wie sie beispielsweise in Brikettierpressen verwendet werden, lassen sich jedoch gerade bei geringen Feuchtegehalten die höchsten Trockenmassendichten erzielen, da das mitverdichtete, inkompressible Wasser nur ein minimales Volumen einnimmt.

Die Oberflächenrauheit trockenen Gutes ist verhältnismäßig gering, so daß auch die beim Reiben auf einer Stahlfläche übertragenen Kräfte nur etwa ein Viertel der Normalkräfte betragen. Dabei ist es mit hinreichender Genauigkeit gleichgültig, ob es sich um Wiesensheu, Luzerneheu, Weizenstroh oder Haferstroh handelt.

Halbtrockenes Wiesengras mit rd. 35% Feuchtegehalt, wie es häufig zu Belüftungszwecken eingebracht wird, läßt sich im Druckbereich der Ballenpressen bereits mit geringem Druck- und Arbeitsaufwand auf hohe Trockensubstanzdichten bringen, da die feinen Halme des Wiesengrases in diesem Welkzustand besonders schlaff und biegeweich sind. Dieser Effekt tritt bei dem halmförmigen und verhältnismäßig feinen Wiesengras sehr viel stärker in Erscheinung als bei Luzernegut, da die Feuchtigkeit die dickeren Luzernestengel nicht so stark in ihrer Festigkeit beeinträchtigt.

Die Reibungskräfte die das halbtrockene Halmgut überträgt, sei es Wiesengras oder Luzerne, sind wegen der in diesem Zustand besonders anschiessamen und rauhen Oberfläche recht hoch — sie betragen rd. drei Viertel der Normalkräfte.

Bei mähfrischem Wiesengras oder frischer Luzerne mit Feuchtegehalten zwischen 70 und 80% bestimmt der große Wasseranteil weitgehend die Verdichtungs- und Reibungsvorgänge. Schon mit geringen Drücken läßt sich sämtliche Luft aus dem Halmgut herauspressen. Dabei ist jedoch nur wenig Trockensubstanz in der Preßmenge enthalten, so daß die Trockensubstanzdichte gering ist. Die spezifische Verdichtungsarbeit

ist minimal, da das Wasser bekanntlich keine Kompressionsarbeit aufnehmen kann. Die Seitendrücke beim Pressen feuchten Gutes sind hoch; — der große Wasseranteil verursacht schon fast ein hydraulisches Verhalten. Die Reibbeiwerte mähfrischen Halmgutes sind, solange keine Zellbeschädigungen auftreten, wegen der steifen Härchen und Kanten noch größer als im Welkbereich, fallen jedoch stark ab, wenn durch den Normaldruck Halmgutzellen zerstört werden, so daß Zellsaft austritt und die Reibfläche benetzt. Dadurch wird eine Schmiering hervorgerufen, die die übertragbaren Reibungskräfte erheblich herabsetzt.

Schrifttum

- [1] Busse, W.: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 1. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [2] Sacht, H. O.: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 4. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [3] Matthies, H. J., und W. Busse: Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut mit hohem Normaldruck. Grundl. Landtechn. 16 (1966) Nr. 3, S. 87/92.
- [4] Wieneke, F.: Wickel- und Reibungsuntersuchungen an Wellen und anderen umlaufenden Maschinenteilen. Diss. TH Braunschweig 1956. VDI-Forsch.-heft 463. Düsseldorf: VDI-Verlag 1957.
- [5] Skalweit, H.: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. In: 4. Konstrukteurkursus. RKTU-Schriften Heft 88. Berlin: Beuth-Vertrieb 1938, S. 30/35.
- [6] Wieneke, F.: Reibungswerte von Pflanzen und Faserstoffen. Landtechn. Forsch. 6 (1956) H. 5, S.146/51.
- [7] Blevins, F. Z., und H. J. Hansen: Analysis of forage harvester design. Agric. Engng. 37 (1956) Nr. 1, S. 21/26, 29.

DK 621-5:631.358.44:631.362:633.004.12

Über die Trennung von Kartoffeln und Steinen durch Lichtreflexion

Von Christian von Zabeltitz, Braunschweig-Völkenrode

Es wird die Frage untersucht, inwieweit eine Trennung von Kartoffeln und Steinen mit Hilfe von reflektiertem Licht durchzuführen ist. Dabei wird zunächst nur das Fühlersystem Beleuchtung-Meßelement betrachtet und festgestellt, ob für den Trennvorgang hinreichende Unterschiede der reflektierten Lichtmenge bei Kartoffeln und Steinen auftreten. Parameter der experimentellen Untersuchungen sind verschiedene Beleuchtungssysteme und verschiedene Empfindlichkeiten der als Meßglieder verwendeten Photoelemente, der Wellenlängenbereich des reflektierten Lichtes sowie der äußere Zustand der Kartoffeln (Sorten, anhaftender Boden) und der Steine. Von seiten des Fühlersystems sind günstige Trennergebnisse bei Verwendung von rot empfindlichen Photoelementen und Licht aus dem roten Spektralbereich zu erzielen.

Die Mechanisierung der trockenen Trennung von Kartoffeln und Beimengungen (Steine und Erdkluten) bei der Kartoffelsammelernte befindet sich noch in voller Entwicklung. Die nasse Trennung von Kartoffeln und Steinen nach dem Prinzip der Schwerflüssigkeitssortierung ist bei Ernteverfahren nicht günstig, da bei der anschließenden Lagerung sehr hohe Verluste auftreten. Bei den zur Zeit verwendeten Trennorganen für die trockene Trennung sind Verlesepersonen notwendig, um fehlergeleitete Kartoffeln und Steine auszulesen. Um diese Notwendigkeit auszuschalten, sind viele Lösungen vorgeschlagen worden, physikalische Merkmale von Kartoffeln und Beimengungen für die mechanische Trennung anzuwenden. Solche physikalischen Eigenschaften sind die geometrischen Ab-

messungen, die Dichte bzw. der spezifische Flächendruck, der Reibungskoeffizient und das Rollvermögen auf verschiedenen Flächen, die Elastizität, die Härte, der Luftwiderstand, die Absorption von Strahlen und die Schallintensität beim Aufprall auf Platten.

Eine Reihe von Trennmechanismen, die auf diesen Eigenschaften beruhen, wie z. B. die Trennung nach der Dichte aufgrund des spezifischen Flächendrucks mit Hilfe von Bürstenwalzen und durch Gummifingerbänder [1; 2], die Trennung durch unterschiedliches Rollvermögen [3; 4; 5], die Trennung im Luftstrom [6; 7], durch akustische Signale [8], durch Strahlungsabsorption [9] und durch verschiedenes Sinkvermögen im Fließbett [10], sind untersucht und erprobt worden, wobei sich in der Praxis die Trennung nach der Dichte bisher am besten bewährt hat.

Im Schrifttum werden Unterschiede von Kartoffeln, Steinen und Erdkluten hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit, der Ausbreitung von Ultraschall und der Lichtreflexion kaum erwähnt. In den UdSSR sind in letzter Zeit einige Versuche über die Unterschiede der trennenden Produkte hinsichtlich der Lichtreflexion durchgeführt worden [11; 12]. Die folgenden Untersuchungen stellen einen weiteren Beitrag zu der Frage dar, inwieweit eine Trennung von Kartoffeln und Steinen mit Hilfe der Lichtreflexion möglich ist. Um dieses Problem zu lösen, ist zunächst zu klären, ob bei der Messung der Lichtreflexion, die bei Beleuchtung der Trennkörper auftritt, hinreichende Unterschiede der Meßwerte im Hinblick auf einen Trennvorgang auftreten. Bei den folgenden Untersuchungen wird nur das Fühlersystem Beleuchtung-Meßelement betrachtet, ohne auf nachzuschaltende Übertragungs- und Trennsysteme näher einzugehen. Letztere sind als eine weitere, noch näher zu untersuchende regelungstechnische Aufgabe anzusehen.

Dr.-Ing. Christian von Zabeltitz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.