

der letztgenannten an die Kapitalbeschaffung (Finanzierung), geistige Leistungsfähigkeit und fachliche Kenntnisse ist. Umgekehrt können technische Neuerungen nur sehr langsam dort Eingang finden, wo wenig technische Verbesserungen erfolgen, die wirtschaftliche Nutzungsdauer durch Teilreparaturen über Jahrzehnte ausgedehnt werden kann und überdies die jährliche Einsatzzeit evtl. nur gering ist.

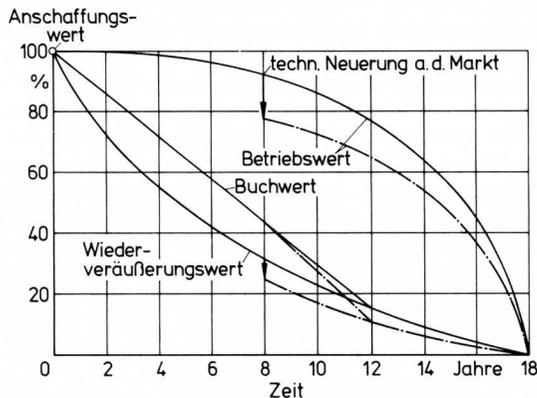


Bild 4. Verlauf von Maschinenwerten.

Will man diese Zusammenhänge kalkulatorisch erfassen und neben der Wirtschaftlichkeit der Einführung einer technischen Neuerung den optimalen Einsatzzeitpunkt oder die Einführungsschwelle ermitteln, dann kann man von zwei verschiedenen Annahmen ausgehen:

Einmal kann man von einer gegebenen Leistung ausgehen, für die die relative Vorzüglichkeit eines neuen gegenüber einem alten Verfahren zu prüfen ist. Unter dieser Bedingung kann man durch Ermittlung der Kostenverläufe mit den bekannten Rechenmethoden die Schwelle ermitteln, bei der der Einsatz oder Eintausch eines neuen Verfahrens vorteilhaft wird. Das kostenminimale Verfahren ist hier das optimale Verfahren; denn sobald die neue Technik im Durchschnitt eine gegebene Leistung billiger erbringt als die alte, ist deren wirtschaftliche Nutzungsdauer beendet; d.h. wenn ihre Grenzkosten höher liegen als die Durchschnittskosten der neuen Technik.

Es liegt auf der Hand, daß in einer solchen Berechnung alle Probleme auftreten, die bereits früher bei den vergleichenden Verfahren genannt wurden, insbesondere wiederum die Schwierigkeit, knappe Faktoren wie die Arbeitszeit in bestimmten Zeitspannen betriebsgerecht zu bewerten. Ferner ist es geradezu ein Merkmal vieler technischer Neuerungen, daß sie Rückwirkungen auf das Produktionsprogramm haben, was hier nicht berücksichtigt wird. Dies trifft auch zu, wenn man mit den Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung von Investitionen wie der Kapitalwert-, Annuitäts- oder Pay-off-Methode die Rentabilität technischer Neuerungen untersucht. Ferner hat man es immer mit ungewissen Erwartungswerten in einer sich wandelnden wirtschaftlichen und technischen Umwelt zu tun.

Diesen Mängeln kann zumindest teilweise wiederum durch die Verwendung von Optimierungsmethoden, nun allerdings mit mehrperiodischem Modellansatz, begegnet werden. Da aber durch die Berücksichtigung der Zeit als Variable der Kalkulationsumfang stark ansteigt, liegt es nahe, mit einem iterativen oder sequentiellen Kalkulationsverfahren die optimale Investitionspolitik in Bezug auf die Einführung technischer Neuerungen zu untersuchen.

3. Zusammenfassung

Zur betriebswirtschaftlichen Bewertung technischer Neuerungen stehen als einfachstes Hilfsmittel vergleichende Verfahren auf der Basis von Kostenkalkulationen zur Verfügung. Sie werden am häufigsten verwendet und ergeben bei sachgemäßer Anwendung und unter Berücksichtigung der darin enthaltenen Angaben wertvolle Beurteilungsmaßstäbe. Sie können als Entscheidungsgrundlage jedoch irreführend sein wie alle Kostenrechnungen. Ihre Unzulänglichkeit liegt in der externen Bewertung der nur betriebsintern korrekt zu bewertenden knappen Produktionsfaktoren, vor allem des Arbeitseinsatzes.

Für die betriebsinterne Faktorbewertung werden Optimierungsmethoden benötigt. Ihre Schwäche liegt in der Unterstellung der Linearität und beliebigen Teilbarkeit der Produktionsprozesse. Um diese zu überwinden, werden sehr umfangreiche Kalkulationsmodelle benötigt, so daß in Verbindung mit der großen Anzahl technischer Alternativen rasch die Grenzen der sinnvollen Anwendung überschritten werden. Hier verspricht die Kombination von Simulations- und/oder Netzplantechnik mit Optimierungsmodellen eine brauchbare Lösung zu werden.

Mehrkomponentenmeßeinrichtung zur direkten Messung von Druck- und Schubbelastungen an Silos

Von Dipl.-Ing. Th. Hesse und Dipl.-Ing. J. Paul, Braunschweig*)

DK 531.787:531.223:621.642.3.04

Zum Messen von Belastungen an Schüttgut-Silos können zwei Verfahren eingesetzt werden: die Kompensationsmessung und die direkte Messung.

Durch eine systematische Untersuchung konnte nachgewiesen werden, daß die direkte Belastungsmessung besonders geeignet ist, gleichzeitig drei orthogonal an einer Meßfläche wirkende Kräfte, eine Druckkraft und zwei

an derselben Fläche angreifende, senkrecht zueinanderstehende Schubkräfte, zu messen.

Durch Einbau dieser 3-Komponenten-Meßeinrichtungen können die beim Silobetrieb maximal auftretenden Belastungen an Wand und Boden kontinuierlich ermittelt werden.

1. Einleitung

Für die Berechnung von Silos steht heute die DIN 1055 Blatt 6 [1] zur Verfügung, die 1964 auf der Basis praktischer Erfahrungen auf dem Gebiet des Silobaus und einer Reihe von in Modellversuchen – ausgehend von Janssen [2] – gewonnenen experimentellen Erkenntnissen erarbeitet worden ist [3]. Die Verfasser

*) Dipl.-Ing. Th. Hesse ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig, Dipl.-Ing. J. Paul war wissenschaftlicher Assistent an diesem Institut und ist jetzt Entwicklungsleiter der Firma HAKO-Werke, Bad Oldesloe.

dieser Berechnungsgrundlagen weisen ausdrücklich darauf hin, daß das heutige Wissen auf dem Gebiet der Lastannahmen für Silobauten noch lückenhaft ist und weiterführende Untersuchungen erforderlich sind, was durch die in neuerer Zeit immer noch auftretenden Siloschäden leider seine Bestätigung findet.

Die Kenntnis der höchsten Beanspruchungen der Behälter durch das einzulagernde Gut, d.h. die Kenntnis der maximal zu erwartenden Druckbelastungen auf Wand und Boden sowie der entsprechenden Schubbelastungen, **Bild 1**, ist eine Voraussetzung für eine verbesserte festigkeitsgerechte Dimensionierung von Silos. Die Größe dieser Belastungen ist vom Betriebszustand der Silos (Füllen, Lagern und Entleeren) abhängig. In der Regel nehmen die auf den Boden wirkenden Druckbelastungen beim Füllen und Lagern, die Wanddruck- und Wandschubbelastungen beim Entleeren ihre maximalen Werte an.

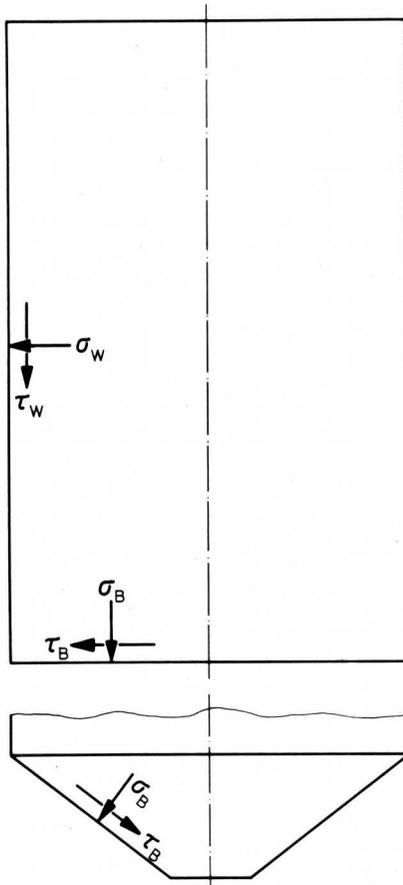


Bild 1. Druckbelastungen am Boden σ_B , an der Wand σ_w und Schubbelastungen τ_B am Boden, τ_w an der Wand eines Lagerbehälters mit ebenem oder trichterförmigen Boden.

Für die Ermittlung dieser Druck- und Schubbelastungen an Wand und Boden mußte zunächst eine geeignete Meßeinrichtung entwickelt und deren Eignung durch praktische Messungen nachgewiesen werden. Dazu wurden die in diesem Aufsatz beschriebenen grundlegenden Untersuchungen angestellt; sie wurden an Modellsilos von bis zu 1 m Durchmesser durchgeführt, wobei die folgenden Größen variiert wurden:

Siloeigenschaften:

Größe, Form, Werkstoff, Oberflächenrauigkeit

Schüttguteigenschaften:

Gutart, Dicht, Gutfeuchte

Füllvorgang:

zentrisch, exzentrisch, schräg, niveaugleich, (jeweils verschiedene Gutströme)

Entleerungsvorgang:

zentrisch, exzentrisch, (jeweils verschiedene Gutströme).

2. Grundlagen für den Bau von Belastungsmeßeinrichtungen

2.1 Spannungszustände im Silo

Ein lagerndes Haufwerk kann sich in verschiedenen Spannungszuständen befinden, was durch eine anschauliche Darstellung in Anlehnung an *Kezdi* [4] in **Bild 2** gezeigt ist: Eine um ihren Fußpunkt drehbar gelagerte und mit einem körnigen kohäsionslosen Haufwerk hinterfüllte ebene Wand (oberes Bild) wird im Ruhezustand nicht bewegt: es stellt sich die im unteren Diagramm eingetragene Wandruhedruckbelastung σ_{w0} ein. Gibt die Wand infolge des auf sie ausgeübten Druckes nach, d.h. führt sie eine Drehbewegung nach links ($-a$) aus, die also vom Haufwerk weggerichtet ist, so sinkt der Wanddruck solange, bis im Haufwerk Brüche in Form von Gleitlinien auftreten: das Haufwerk beginnt plastisch zu fließen, es befindet sich im aktiv plastischen Grenzspannungszustand. Auch bei zunehmender Wanddrehung bleibt die Wanddruckbelastung σ_{wa} konstant. Führt die Wand hingegen aufgrund äußerer Kräfte eine auf das Haufwerk gerichtete Bewegung ($+a$) aus, so steigt der Wanddruck von der Ruhedruckbelastung σ_{w0} aus an. Infolge der bei dieser Wandbewegung hervorgerufenen Kompression des Haufwerkes wird schließlich die Scherfestigkeit des Gutes überschritten, so daß wiederum Brüche im Haufwerk und damit Gleitlinien auftreten können. Die hierbei erreichte Wanddruckbelastung σ_{wp} bleibt weiterhin konstant, das Haufwerk befindet sich im passiv plastischen Grenzspannungszustand. Die beiden plastischen Spannungszustände, zwischen denen der elastische Spannungszustand des Haufwerkes liegt und der sich ebenfalls in einen aktiven und in einen passiven Bereich aufspalten läßt, können sich je nach innerem Reibungswinkel des Gutes hinsichtlich ihrer Druckspannung um den Faktor 5 und mehr unterscheiden.

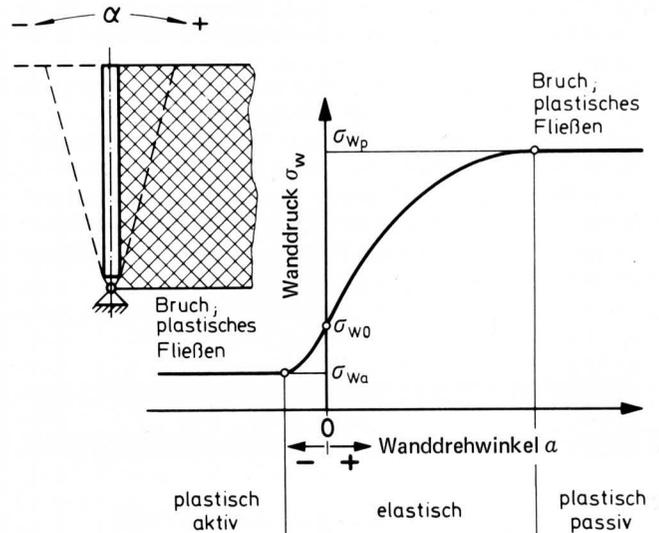


Bild 2. Zusammenhang zwischen Wanddrehbewegung a und Wanddruck σ_w . Definition des elastischen und der beiden plastischen Spannungszustände.

2.2 Forderungen an die Meßtechnik

Für die Ermittlung der am Silo auftretenden Belastungen mußte zunächst durch theoretische und experimentelle Untersuchungen eine geeignete Meßmethode gefunden werden, die u.a. folgende Kriterien erfüllt:

1. geringer systematischer Fehler bei der Belastungsermittlung,
2. kontinuierliche Registrierung des Meßsignals (auch Belastungsspitzen) beim Befüllen, Lagern und Entleeren,
3. Messung statischer und dynamischer Kräfte,
4. einfache Konstruktion der Meßeinrichtung und damit
5. geringe Störanfälligkeit,
6. einfache Versuchsdurchführung.

Da die Drücke in Modellsilos speziell für Haufwerke landwirtschaftlicher Güter (z.B. Getreide) klein sind – sie liegen unter 0,1 bar – werden hier besondere Anforderungen an die Meßtechnik gestellt.

Um die örtlichen Druck- und Schubbelastungen an Wand und Boden hinreichend genau zu bestimmen, muß mit relativ kleinen Meßflächen an möglichst vielen Stellen des Behälters gemessen werden. Der Durchmesser der Meßfläche muß andererseits im Verhältnis zur Korngröße eine gewisse Mindestgröße haben, um einen repräsentativen Mittelwert der von den Körnern übertragenen Kräfte aufzunehmen. Eigene Untersuchungen und die anderer Autoren, z.B. [5, 6], haben gezeigt, daß ein Durchmesser der Meßfläche von mehr als etwa 10 mal Korndurchmesser des Schüttgutes eine gute Reproduzierbarkeit der Meßwerte gewährleistet.

Wie eingangs erwähnt, können Haufwerke im Innern u.a. auch Reibungskräfte und – soweit vorhanden – Kohäsionskräfte übertragen, was beim Bau von Belastungsmeßgeräten zu berücksichtigen ist. So bewirken diese inneren Kräfte, daß sich die Druckkraft auf eine in die Siloberandung eingelassene Druckmeßplatte ändert, wenn sich die Platte während des Meßvorganges in irgendeiner Weise bewegt. Es muß dabei unterschieden werden zwischen dem sehr kleinen Meßweg, der sich während einer zunehmenden Belastung allmählich einstellt, und einer aufgezwungenen Auslenkung nach erreichter Maximalbelastung, wie sie im Abschnitt 2.1 beschrieben ist.

2.3 Druckbelastungsmeßverfahren

Nach Bild 3 unterscheidet man zum Messen der Druckbelastung grundsätzlich zwei Verfahren [7]: die Kompensationsmessung und die direkte Druckmessung.

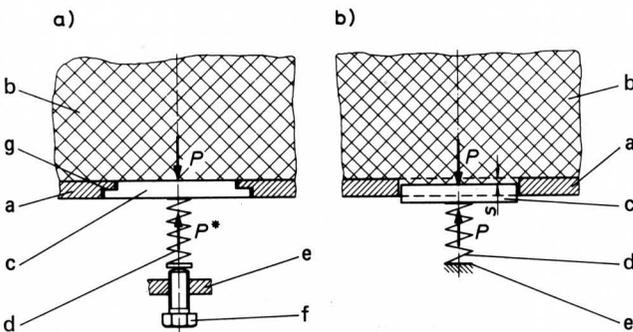


Bild 3. Grundsätzliche Unterscheidung der Druckbelastungsmeßverfahren. a) Kompensationsmessung; b) direkte Messung.

- | | |
|------------------|----------------------|
| a Behälterboden | e feste Abstützung |
| b Haufwerk | f Verstellerschraube |
| c Druckmeßplatte | g Anschlag |
| d Feder | |

- P Druckkraft auf die Meßplatte
P* Kompensationskraft
s Meßweg

2.3.1 Kompensations-Druckbelastungsmessung

Bei dem Kompensationsverfahren, Bild 3 a, bleibt die Druckbelastungsmeßplatte während des Messens in Ruhe. Vor dem Füllen des Silos wird eine Kompensationskraft P^* (beispielsweise mittels Schraube und Druckfeder) von außen auf die Druckmeßplatte aufgebracht, die größer ist als die vom Schüttgut zu erwartende Kraft P . Nach dem Füllen des Silos wird P^* (in diesem Fall durch Herausdrehen der Schraube) solange verkleinert, bis P^* gleich P ist. Die gesuchte Belastungskraft P kann dann als P^* gemessen werden. Der Gleichgewichtszustand kann in der Praxis sehr schwer bestimmt werden. Beispielsweise wird die Vorlast P^* solange verringert, bis ein merkbares Ausweichen der Platte den Meßzeitpunkt

über einen elektrischen Kontakt anzeigt. Durch dieses zwar geringe aber nachträgliche Nachgeben der Platte ändert sich der Spannungszustand im Gut und damit die Belastung an der Berandung entscheidend (vgl. Abschn. 2.1), d.h. die Belastung wird zu niedrig ermittelt. Darüber hinaus wird beim Auftreten einer instabilen Gewölbebildung des Schüttgutes über der vom Gut weg bewegten Meßfläche eine noch kleinere Kompensationskraft gemessen. Es ist daher leicht einzusehen, daß mit dieser Meßmethode nicht die wahre Druckbelastung ermittelt wird. Da sich ein systematischer Fehler weder vermeiden, noch seine Größe sich übersehen läßt, ist bei Belastungsmessungen an Haufwerken von der Kompensationsmethode abzuraten.

Darüber hinaus weist dieses Meßverfahren einen weiteren entscheidenden Nachteil auf: Da pro Silofüllung jeweils nur ein einziger Meßwert erfaßt werden kann, d.h. keine kontinuierliche Messung und damit keine Registrierung der statischen und dynamischen Belastungsanteile während des Füllens, Lagerns und Entleerens möglich ist, erlaubt das Verfahren nicht die in der Aufgabenstellung geforderte direkte Ermittlung der kritischen Belastungen.

2.3.2 Direkte Belastungsmessung

Bei der direkten Meßmethode, Bild 3 b, legt die Meßplatte während des Füllvorganges, d.h. während der Belastungszunahme infolge der Auslenkung der Feder allmählich einen Meßweg s zurück. Über diese Auslenkung kann mit entsprechender Meßtechnik die Belastungskraft P fortlaufend erfaßt werden, damit ergibt sich die Möglichkeit, alle auftretenden Belastungsspitzen zu registrieren.

Mit Hilfe der direkten Belastungsmessung ist es ebenfalls möglich, bei einer ähnlichen Anordnung die auf die Meßplatte wirkenden Schubkräfte zu ermitteln. Eine geeignete Konstruktion (siehe Abschnitt 3) erlaubt es, gleichzeitig zwei senkrecht aufeinanderstehende Schubkräfte in der Meßplattenebene mit der senkrecht darauf gerichteten Druckbelastung an einer einzigen Meßplatte aufzunehmen.

Nach den vorstehenden Erläuterungen von Abschnitt 2.1 bleibt daher lediglich zu klären, wie groß die Meßfehler für die Belastung sind, die sich während des Füllens infolge des allmählichen Absenkens der Meßplatte ergeben. Im folgenden sollen die Ergebnisse der zur Klärung dieser Frage durchgeführten Untersuchungen beschrieben werden.

Mit der in Bild 4 skizzierten Versuchseinrichtung wurde die Abhängigkeit zwischen der Bodendruckbelastung σ_B und dem zurückgelegten Meßplattenweg s während des Füllens experimentell ermittelt. Dazu wurde eine Stahlplatte mit einem Durchmesser von 80 mm elastisch an federnden Biegeelementen aufgehängt und berührungsfrei in den ebenen Behälterboden eingesetzt. Im unbelasteten Zustand schließt die Plattenoberfläche mit dem Behälterboden ab. Wird das Schüttgut in den Versuchsbehälter eingefüllt, so weicht die Meßplatte proportional zu dem sich aufbauenden Druck um den Meßweg s aus, was über einen induktiven Meßfühler aufgenommen und auf einem angeschlossenen Schreiber registriert wird.

Um bei maximaler Belastung verschieden große Meßplattenwege zu erreichen, wurde die Federsteifigkeit c der Meßplattenhalterung so variiert, daß sich bei jeweils vollem Versuchsbehälter maximale Wege von $s = 0,2 \mu\text{m}$ bis $s = 250 \mu\text{m}$ ergaben. Die Abhängigkeit der Bodendruckbelastung σ_B vom Meßplattenweg s ist in Bild 5 dargestellt. Der Bodendruck sinkt mit zunehmendem Meßweg annähernd linear, im gesamten untersuchten Bereich jedoch um nicht mehr als 15 %. Bei der Wahl einer entsprechend großen Federsteifigkeit kann diese Abweichung auf weniger als 5 % reduziert werden, so daß sie in der Größenordnung der übrigen Fehler liegt.

Das Ausweichen der Meßplatte durch die laufende Druckerhöhung während der Silobefüllung ruft demnach keine Gewölbebildung im Haufwerk über der Meßstelle hervor, bzw. sie hat keine nennenswerte Änderung des Spannungszustandes zur Folge. Damit ist der Nachweis erbracht, daß die direkte Druckbelastungsmessung bei einem zulässigen Meßplattenweg in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ für körnige Haufwerke durchaus geeignet ist.

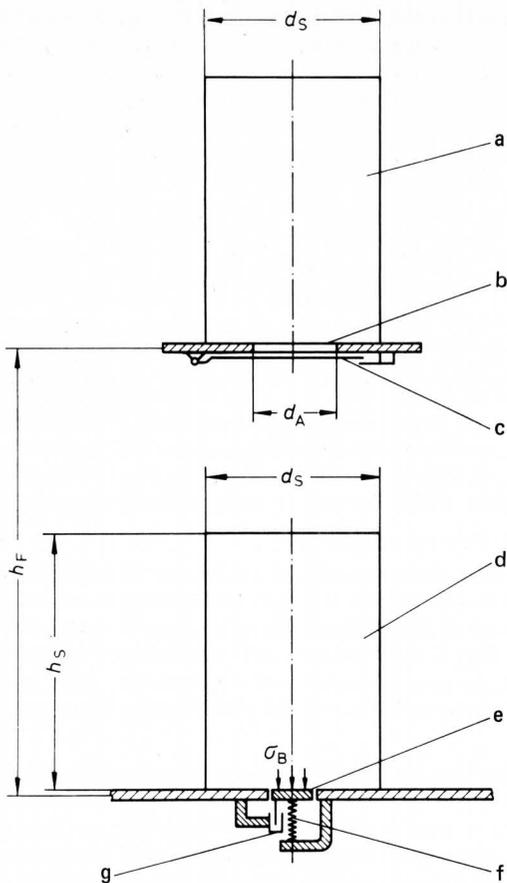


Bild 4. Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Einflusses der Meßplattenabsenkung auf die Druckbelastung.

- | | |
|--------------------|--|
| a Vorratsbehälter | e Meßplatte |
| b Auslauf | f Feder mit variabler Steifigkeit |
| c Verschlusskappe | g induktiver Wegaufnehmer zur Ermittlung der Meßplattenabsenkung |
| d Versuchsbehälter | |

(Behälterdurchmesser $d_S = 200$ mm; Auslaufdurchmesser $d_A = 40$... 140 mm; Fallhöhe $h_F = 600$ mm; Schütthöhe $h_S = 300$ mm)

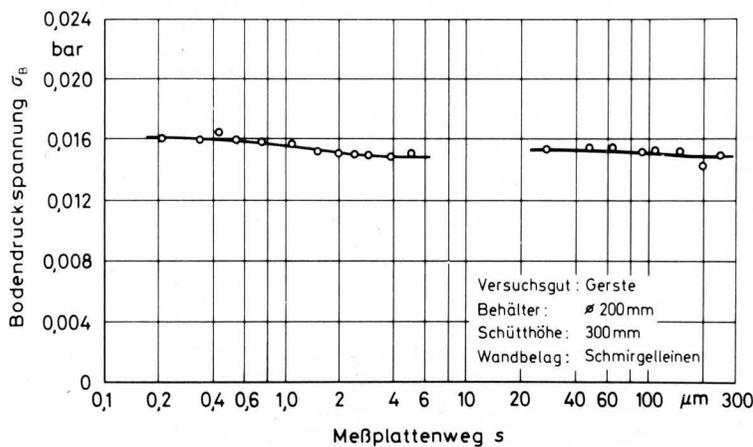


Bild 5. Abhängigkeit des Bodendruckes σ_B vom Meßplattenweg s .

3. Dreikomponentenmeßeinrichtung

Nach umfangreichen Grundlagenversuchen über die Rückwirkung direkt messender Druckmeßeinrichtungen auf die Meßwerte und die dabei maximal zulässigen Meßwege (siehe Abschnitt 2.3.2) wurde die im folgenden beschriebene 3-Komponenten-Meßeinrichtung entwickelt.

3.1 Aufbau der Meßeinrichtung

Nach dem Bau und der Erprobung mehrerer Prototypen wurde die in **Bild 6** gezeigte Bauform gewählt. Sie kann zur Messung der auf die Wand oder den Boden des Silos wirkenden Druck- und Schubbelastungen eingesetzt werden. Drei orthogonal aufeinander stehende Kräfte, die gleichzeitig in x-, y- und z-Richtung auf einen Meßsteller wirken und die somit hinsichtlich ihrer Richtung definierte Belastungen darstellen, werden unabhängig voneinander ermittelt: zwei Schubbelastungen (in x- und y-Richtung) sowie eine Druckbelastung (in z-Richtung).

Die auf die Meßplatte a wirkende Druckkraft in z-Richtung wird über die Durchbiegung bzw. Auslenkung von vier Blattfedern, die unmittelbar unter der Meßplatte angeordnet sind, mit einem induktiven Geber (im Bild nicht sichtbar) gemessen. Diese Druckkraftmeßeinrichtung ist über zwei senkrecht zueinander angeordnete Verformungselemente b und c zur Messung der in x-Richtung und der in y-Richtung auftretenden Schubkräfte mit dem Flansch d verbunden. Auch die Schubkräfte in x- und y-Richtung werden als Auslenkung der Verformungselemente mit induktiven Wegaufnehmern e gemessen, die über Trägerfrequenzverstärker mit einer Registriereinheit verbunden sind.

Durch Aufbohren bzw. Aufreiben der an den Eckpunkten des Verformungsparallelogrammes angebrachten Bohrungen ist es möglich, die federnden Stege zu schwächen. Damit ist die Anpassung der Federsteifigkeit des Systems an die zu messenden Schubbelastungen möglich. Der Flansch ermöglicht mit Hilfe von zwei Zug- und drei Druckschrauben eine einfache Montage und Zentrierung der Meßeinrichtung in der Wand- und Boden- bzw. Trichterebene des Behälters. Die Oberfläche der Meßsteller ist der jeweiligen Oberfläche des Silos angepaßt, d.h. am Boden eben und bei einem runden Behälter an der Seitenwand leicht gewölbt und mit dem gleichen Belag (z.B. Schmirgelleinen) beschichtet. Der wegen der Auslenkung des Meßstellers vorgesehene Ringspalt von ca. 1 mm ist durch einen etwa 0,3 mm starken Gummimembranring von rund 20 mm Breite unter dem aufgeklebten Belag abgedichtet, damit kein Staub eindringen und die Meßeinrichtung nicht verklemmen kann.

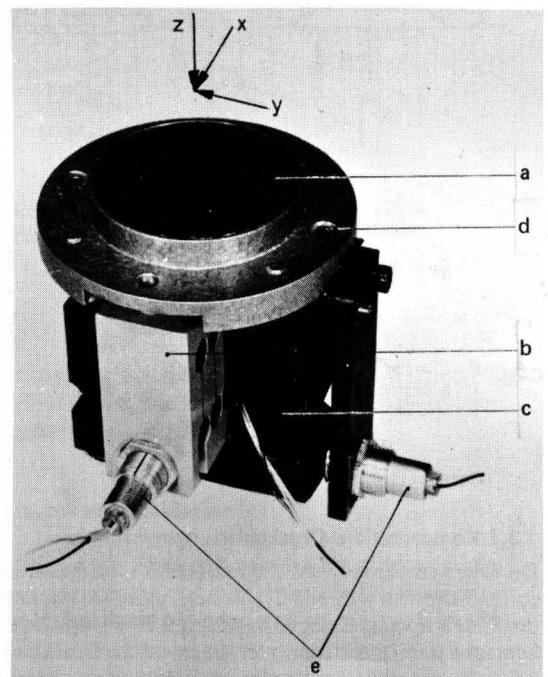


Bild 6. Drei-Komponenten-Meßeinrichtung zur Ermittlung von Druck- und Schubbelastungen am Silo.

- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| a Meßplatte | d Flansch |
| b Biegeelement für x-Richtung | e induktiver Meßfühler |
| c Biegeelement für y-Richtung | |

Speziell bei rotationssymmetrischen Silos treten aus Symmetriegründen keine Schubkräfte in Umfangsrichtung auf, so daß dann jeweils nur 2 Komponenten einer Meßeinrichtung zum Einsatz kommen: In z-Richtung wirken sowohl am Boden als auch an der Seitenwand die Druckkräfte, in positiver x-Richtung am Boden radial nach außen und an der Seitenwand nach unten die Schubkräfte (siehe auch Bild 1).

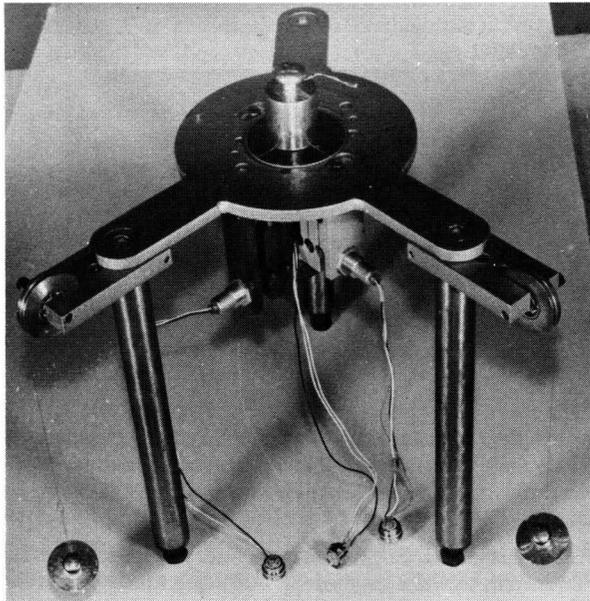


Bild 7. Vorrichtung zum Kalibrieren einer 3-Komponenten-Meßeinrichtung.

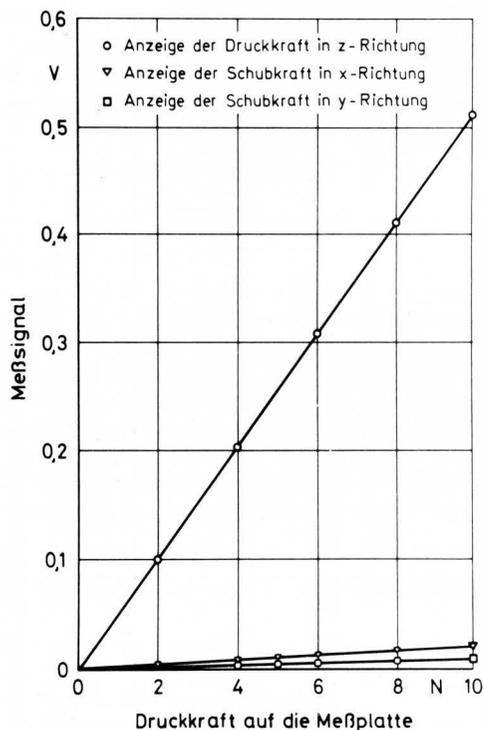


Bild 8. Kalibrierungs-Charakteristik einer 3-Komponenten-Meßeinrichtung bei Druckbelastung in z-Richtung.

3.2 Kalibrieren der Meßapparatur

Vor dem Einbau in den zu untersuchenden Silo werden die 3-Komponenten-Meßeinrichtungen in eine Vorrichtung montiert und einem Funktionstest unterzogen. Diese in Bild 7 dargestellte Vorrichtung ermöglicht eine getrennte Aufbringung von Lasten (z.B.

Gewichtsstücken) in x-, y- und z-Richtung: die Druckkraft wird direkt aufgelegt, die Schubkräfte über angehängte dünne Stahlseile und Umlenkrollen erreicht. Durch Justierung der induktiven Meßfühler kann eine Linearität der Meßelemente erreicht werden.

Eine gegenseitige Beeinflussung der angreifenden Kräfte läßt sich nicht ganz ausschließen. Bild 8 gibt eines der mit Hilfe eines X,Y-Schreibers aufgenommenen Kalibrierungsdiagramme einer 3-Komponenten-Meßeinrichtung wieder. Bei der Kalibrierung in z-Richtung (Druckkraft) ist gleichzeitig die Fehlzanzeige in den Schubkraftrichtungen x und y aufgenommen worden. Die Druckmeßeinrichtung zeigt eine lineare Kennung. Die bei einer reinen Druckbelastung in den Schubrichtungen auftretende Fehlzanzeige ist sehr klein. Sie liegt bei allen 11 inzwischen im Einsatz sich befindenden Meßeinrichtungen im Mittel unter 2%. Diese geringe Fehlzanzeige ermöglicht eine hinreichend genaue Messung der drei Komponenten.

3.3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau mit einem runden Modellsilo aus Stahl von 600 mm Durchmesser, 3 m Höhe und 10 mm Wandstärke ist in Bild 9 skizziert. Der Modellsilo a ist mit insgesamt 9 Seitenmeßstellen b zur Ermittlung der Druck- und Schubbelastungsverteilung an der Wand und mit 2 Meßstellen im Auslaufrichter ausgerüstet. Der Modellsilo wird über ein Rohr aus dem Vorratsbehälter c gefüllt. Das Entleeren erfolgt über eine Rutsche in einen zweiten Vorratsbehälter, der, um ein unnötiges Beschädigen des Versuchsgutes zu vermeiden, mit einem elektrischen Aufzug d in die Ausgangsposition gebracht werden kann.

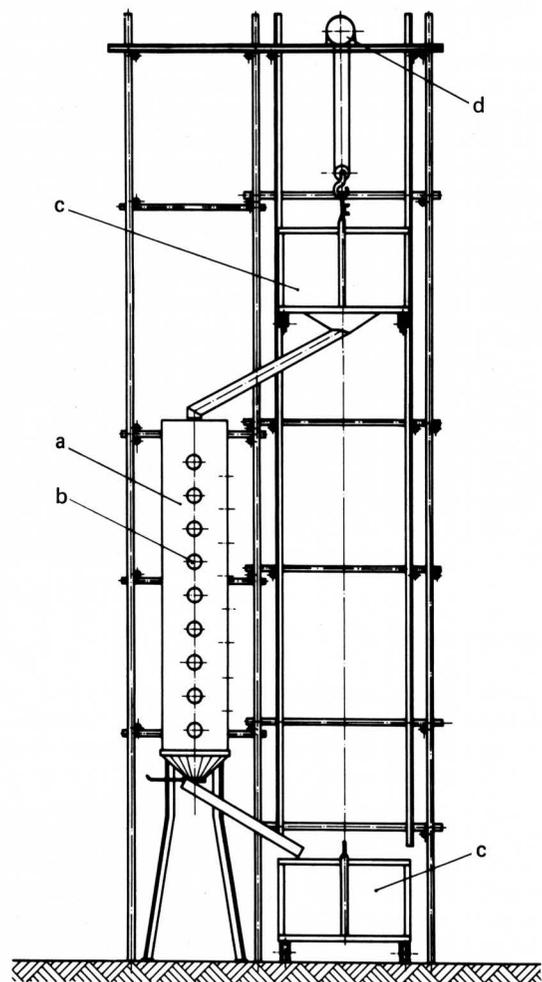


Bild 9. Versuchsaufbau.

- a Modellsilo
- b Seitenmeßstellen
- c Vorratsbehälter
- d elektrischer Aufzug

3.4 Meß- und Registriereinrichtung

Bild 10 zeigt die zur Erfassung der Meßwerte aufgebauten Meß-, Verstärker- und Wiedergabegeräte. Die von den 3-Komponenten-Meßstellen am Silo kommenden Meßsignale werden in Trägerfrequenzverstärkern a verstärkt, evtl. auf einem Magnetband zwischengespeichert (im Bild nicht sichtbar), anschließend in einer Datenerfassungsanlage b digitalisiert und von einer Lochstreifenstanze c

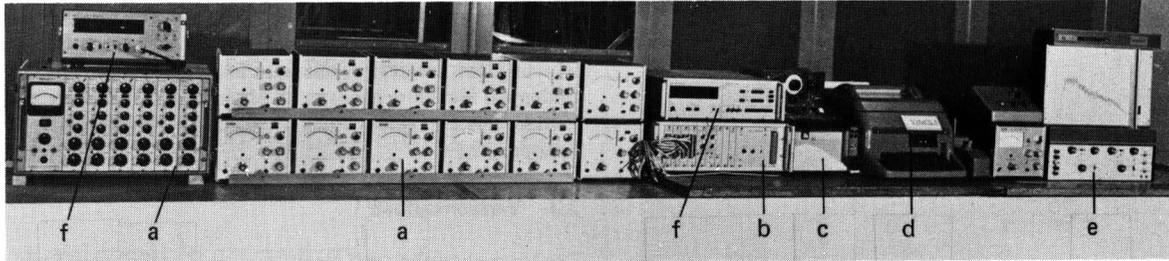


Bild 10. Meß- und Registriereinrichtung.

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| a Trägerfrequenzverstärker | d Fernschreiber |
| b Datenerfassungsanlage | e X, Y-Schreiber |
| c Lochstreifenstanze | f Digitalvoltmeter |

3.5 Allgemeiner Belastungsverlauf an der Silowand

Als Beispiel der mit den neuentwickelten Meßeinrichtungen ermittelten Meßergebnisse sind in Bild 11 die Druck- und Schubbelastungen an der Wand für das Schüttgut Sojabohnen und Schmirgelleinen als Wandbelag wiedergegeben. Die Belastungsverläufe sind über der Silotiefe aufgetragen, wobei die ausgezogenen Kurven die maximal gemessenen Werte beim Entleeren und die gestrichelten Kurven die Werte bei der Lagerung wiedergeben. Da während des Lagerns keine nennenswerten Veränderungen der Belastungen gegenüber dem Füllende auftreten, wurde der Betriebszustand Füllen in den Einzeldiagrammen nicht mit aufgenommen.

Die Druck- und Schubbelastungen an der Wand nehmen mit wachsender Silotiefe zu, um asymptotisch einem Grenzwert zuzustreben, der sich aufgrund des sog. Siloeffektes als Maximalwert ergibt. Unmittelbar nach Entleerungsbeginn steigen für den gesamten Silobereich sowohl die Druck- als auch Schubbelastungen an der Wand stark an. Zu bemerken ist, daß die für den Entleerungsvorgang eingezeichneten Kurven aus den Einhüllenden der auftretenden Maximalwerte gebildet wurden, um eine Aussage über die maximal zu erwartenden Behälterbelastungen machen zu können.

4. Zusammenfassung

Voraussetzung für die Entwicklung neuer Grundlagen für die festigkeitsgerechte Dimensionierung von Silos ist die Kenntnis des kritischen, d.h. des höchsten beim Silobetrieb überhaupt auftretenden Belastungszustandes.

Nach erfolgreichem Abschluß meßtechnischer Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung der Meßfehler infolge der Einflüsse der Meßeinrichtung war es möglich, funktionsfähige 3-Komponenten-Meßeinrichtungen zum Messen von Druck- und Schubbelastungen zu entwickeln und praktisch zu erproben. Die neuen direkt messenden Meßeinrichtungen erlauben es, gleichzeitig alle am Silo auftretenden Belastungen zu erfassen.

Es wurde ein Modellsilo-Versuchsstand errichtet, an dem umfangreiche Versuche zur experimentellen Ermittlung der Druck- und Schubbelastungsverteilung am Siloboden bzw. am -auslaufrichter und an den Behälterwänden für die Betriebszustände Füllen, Lagern und Entleeren durchgeführt wurden. Die Untersuchungen

(z.B. für eine Weiterverarbeitung in einem Digitalrechner) in Form von Lochstreifen ausgegeben oder von einem Fernschreiber d in Tabellenform ausgedruckt, bzw. auf einem X, Y-Schreiber e z.B. über der laufenden Füllhöhe direkt aufgezeichnet.

Die Meßanlage wird vor Versuchsbeginn abgeglichen. Die Meßwerte können entweder während der Silobefüllung oder nach beendeten Füllvorgang sowie während der Entleerung laufend abgefragt werden.

umfaßten die Parameter Siloeigenschaften, Schüttguteigenschaften, Füll- und Entleerungsverfahren. Anhand eines Beispiels wurde die Druck- und Schubbelastungsverteilung an der Silowand wiedergegeben.

Die in [8] ausführlich dargelegten Ergebnisse zeigen, daß während des Entleerens teilweise ein mehr als 100%iges Ansteigen der Belastung gegenüber der Lagerung auftritt. Darüber hinaus hat auch das Füllverfahren einen entscheidenden Einfluß auf die maximalen Belastungen des Silos.

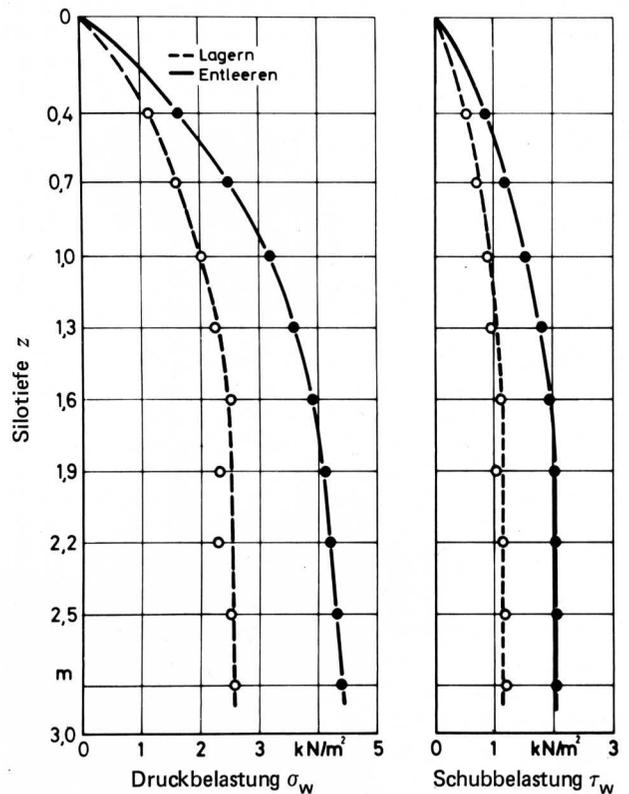


Bild 11. Verlauf der Druck- und Schubbelastung an der Wand bei zentrischem Füllen und Entleeren.

- | | |
|----------------------|----------------------|
| Gutart: | Sojabohnen |
| Behälterdurchmesser: | 600 mm |
| Wandrauhigkeit: | Schmirgelleinen K 60 |

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *DIN 1055 Blatt 6:* Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen.
- [2] *Janssen, H.A.:* Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschr. VDI Bd. 39 (1895) S. 1045/49.
- [3] • *Pieper, K. u. F. Wenzel:* Druckverhältnisse in Silozellen. Berlin – München: Verlag W. Ernst u. Sohn 1964.
- [4] • *Kezdi, A.:* Erddrucktheorien. Berlin: Springer-Verlag 1962.

- [5] *Dale, A.C. u. R.N. Robinson:* Pressures in deep grain storage structures. Agric. Engng. Bd. 35 (1954) Nr. 8, S. 570/73.
- [6] *v. Eisenhart Rothe, M. u. O. Natau:* Fließen von Schüttgütern. Vortrag anlässlich des Symposiums "Lagern und Fließen von Schüttgütern". Erlangen 12./13. Sept. 1974.
- [7] *Stroppel, A.:* Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI-Forschungsheft 525, Düsseldorf: VDI-Verlag 1968.
- [8] *Paul, J.:* Spannungsverteilung in körnigen kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagerung in Behältern. Diss. TU Braunschweig 1974.

Energetische Analyse der Dreschtechnik

Von Georg Segler und Ewald Graeber,
Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.361.2:631.561.004.15

Die Energiekrise hat bewirkt, daß auch der Landwirt energiekostenbewußter geworden ist. Bisher spielte in den meisten Bereichen der Energiepreis bei den betriebswirtschaftlichen Überlegungen nur eine untergeordnete Rolle. Eine Ausnahme bildete beispielsweise die Hochtemperaturtrocknung von Grüngut.

Heute wird jedoch zunehmend auf den spezifischen Energieverbrauch von Maschinen und Aggregaten geachtet. Auch läßt die Bereitschaft nach, wegen des Betriebs einzelner, relativ kurzzeitig eingesetzter Maschinen, beispielsweise Häckslern, wesentlich stärkere Schlepper zu kaufen, als für den Normaleinsatz erforderlich wären.

1. Einleitung

Am Mähdrescher ist die Dreschtrommel das Element, das den größten Energiebedarf hat. Bis über 50 % der Gesamtenergie der Maschine werden an den Schlagleisten umgesetzt. Aufgabe einer am Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Hohenheim durchgeführten Forschungsarbeit [1] war es, den Energieaufwand beim Entkörnen von Mais zu analysieren und Wege für eine bessere Energieausnutzung aufzuzeigen. Die Untersuchung wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

2. Der Energieaufwand beim Drusch im Kollektiv

Die der Drescheinrichtung zugeführte mechanische Energie geht nach dem Energieerhaltungssatz nicht verloren, sondern wird teilweise in andere Energieformen überführt. Bei einer allgemeinen Betrachtung geht man gewöhnlich von der Leistung, also dem Energieaufwand pro Zeiteinheit aus. Dabei kann zunächst zwischen der Leerlaufleistung und der zum Behandeln des Gutes aufzuwendenden Dreschleistung unterschieden werden. Letztere setzt sich nach Segler [2] aus Anteilen zusammen, die verschiedenartigen Wirkmechanismen zuzuschreiben sind.

Es können genannt werden:

Beschleunigungsleistung,
Verformungsleistung,
Zerkleinerungsleistung und
Entkörnungs- oder Trennleistung;
letztere ist die Leistung, die rein zum Lösen der Körner vom Fruchtstand aufzuwenden ist.

Aus Dreschversuchen mit einer in einen Prüfstand eingebauten serienmäßigen Drescheinrichtung, bestehend aus Maiskorb und Schlagleistentrommel, wurde die an der Trommel beim Drusch umgesetzte Energie bestimmt und als spezifische Druschenergie auf die Masse der abgetrennten Körner bezogen.

Bild 1 ist zu entnehmen, daß die spezifische Druschenergie stark mit dem Feuchtegehalt abnimmt. Je trockener das Gut, desto weniger Energie wird offensichtlich zur Spindelbeschleunigung und zur plastischen Verformung aufgewendet. Hinzu kommt, daß bei trockenem Gut das Korn-Stroh-Verhältnis günstiger ist. Für Kolben mit Lieschen ergibt sich eine höhere spezifische Druschenergie. Dies war erwartet worden, da die Lieschen und die in den Lieschen eingeschlossenen, bereits getrennten Körner die Schläge der Leisten dämpfen. Der geringere Abscheidungsgrad bewirkt, daß mehr Körner über die ganze Korblänge transportiert werden müssen. Das Entfernen der Lieschen vor dem Drusch ist also aus energetischer Sicht von Vorteil.

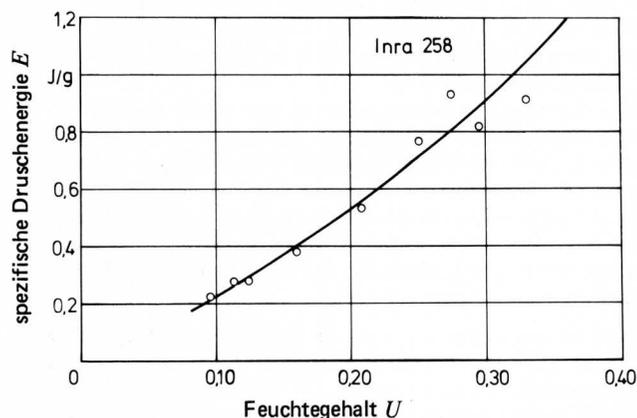


Bild 1. Spezifische Druschenergie E in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt U der Körner.

Sorte Inra 258, entliescht, Erntejahr 1970, Kolbenlage parallel

*) Prof. Dr.-Ing. Georg Segler ist Inhaber des Lehrstuhls für Landtechnik der Universität Hohenheim, Dr.-Ing. Ewald Graeber war wissenschaftlicher Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl.