

DK 631.354.2:631.361.2

## Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage

Von **W. Baader, H. Sonnenberg** und **H. Peters**, Braunschweig-Völkenrode

*Aus den Arbeiten des Instituts für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode*

Bei Trenn- und Fördereinrichtungen, die nach dem Wurfverfahren arbeiten, tritt eine Entmischung des Haufwerkes ein, sofern dessen Komponenten sich in Form und Größe wesentlich unterscheiden. Durch Veränderung von Amplitude und Frequenz der erregenden Unterlage und Schichthöhe des Haufwerkes kann diese Entmischungswirkung beeinflusst werden. Um die Betriebsbedingungen für die bei Trennanlagen erwünschte stärkste Entmischung des Haufwerkes zu bestimmen, läßt sich die Theorie für die periodische Wurfbewegung einer Einzelmasse wegen des Formänderungsvermögens der einzelnen Aggregate, wie auch des gesamten Haufwerkes, nicht mehr anwenden. Es wurde daher mit Hilfe eines einfachen Modellansatzes und unter Verwendung eines Analogrechners die für eine Entmischung günstigste Zuordnung von Amplitude, Erregerfrequenz und Haufwerkhöhe festgestellt. Entmischungsversuche mit einem Korn-Stroh-Gemenge bestätigen die Ergebnisse. Ein Einfluß der Amplitude auf den Entmischungserfolg konnte nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden. Hingegen zeigte sich eine mehr als lineare Abnahme des Entmischungserfolges bei einer Vergrößerung der Schichthöhe.

### Inhalt

- 1 Problemstellung
- 2 Experimentelle frühere Arbeiten
- 3 Entmischungs-Hypothese
- 4 Theoretische Betrachtungen
  - 4.1 Bewegung einer Punktmasse
  - 4.2 Bewegung eines Haufwerkes
- 5 Versuche mit einem Korn-Stroh-Haufwerk
  - 5.1 Analyse der Strohbewegung
  - 5.2 Bestimmung des Körnerdurchganges
- 6 Zusammenfassung
- 7 Schrifttum

### 1 Problemstellung

Haufwerke, deren Komponenten sich durch Form und Größe ihrer Aggregate wesentlich unterscheiden, lassen sich in der Regel ohne Schwierigkeit auf mechanischem Wege zerlegen, sofern es gelingt, das Feingut des Haufwerkes an eine Siebfläche heranzuführen, was einer Entmischung des Haufwerkes gleichkommt. Diese Entmischung kann auf verschiedene Art erreicht werden, z. B. durch mechanische Schwingungen, die über die Siebfläche in das Haufwerk eingeleitet werden, wodurch dieses entgegen der Schwerkraft beschleunigt periodisch beschleunigt wird. Hierbei werden Trägheitskräfte frei, die eine gegen die Siebfläche gerichtete

tete Relativbewegung der Feingutaggregate gegenüber den Grobgutaggregaten bewirken. Die nach diesem Verfahren arbeitenden Schwingsiebe sind einfach im Aufbau und lassen sich vielseitig einsetzen.

In der Aufbereitungstechnik wie in der Landtechnik stellt die Klassierung körniger Haufwerke mit Schwingsieben eine der wichtigsten Aufgaben dar. Aber auch für das Zerlegen von Haufwerken mit sehr verschiedenartigen Komponenten hat sich das Schwingsieb gut bewährt.

Der Ablauf des Entmischungsvorgangs wird von den Bewegungsgrößen der Erregerschwingung, den geometrischen und mechanischen Werten der Haufwerkkomponenten und von der Schichthöhe des zu Koppel- und Wurfbewegungen angeregten Haufwerkes bestimmt. Daher ist eine Funktionsbewertung oder eine Optimierung der Konstruktions- und Betriebsdaten eines mit großer Schichthöhe belegten Schwingsiebes nur möglich, wenn das Zusammenwirken dieser Einflußgrößen bekannt ist.

Die Bewegung einer Punktmasse auf einer harmonisch schwingenden ebenen Unterlage kann theoretisch beschrieben werden [2; 4; 5; 7; 11; 19]. Ein Haufwerk, dessen Schichthöhe über der schwingenden Unterlage ein Vielfaches der mittleren Größe der einzelnen Aggregate erreicht, bewegt sich jedoch nicht mehr nach den einfachen Gesetzen der Punktmasse, da sich das Haufwerk als ein Verband von Aggregaten unter der Einwirkung äußerer Kräfte verformen kann. Je nach Art der Bindung zwischen den Aggregaten und deren Verformungsverhalten können die Bewegungsbahnen der einzelnen Schichten eines Haufwerkes von denen einer Punktmasse erheblich abweichen [2; 7].

Die folgende Abhandlung soll einen Beitrag zur Klärung dieser Zusammenhänge darstellen, wobei dem Entmischungsvorgang innerhalb des Haufwerkes besondere Beachtung geschenkt wird<sup>1)</sup>. Der unmittelbare Anlaß zu dieser Untersuchung waren die Bestrebungen, die Arbeitsweise des „Strohschüttlers“ von Dreschmaschinen, insbesondere von Mähdreschern, zu analysieren, um die Frage beantworten zu können, ob das zur Zeit gebräuchliche Arbeitsprinzip noch weiter entwickelt werden kann, bzw. eine Optimierung der Konstruktionsdaten möglich ist. Obwohl diese Arbeit sich im engeren Sinne auf die Korn-Stroh-Trennung mit einem Schwingsieb bezieht, haben verschiedene der dargelegten Abhängigkeiten auch über diesen speziellen Anwendungsbereich hinaus Gültigkeit.

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Aussagen seien zunächst die Grenzen genannt, innerhalb derer das Problem betrachtet wird:

- a) Die beiden Komponenten des Haufwerkes unterscheiden sich wesentlich durch Größe, Form und Masse sowie Elastizität, innere und äußere Reibung ihrer Einzelaggregate; im folgen-

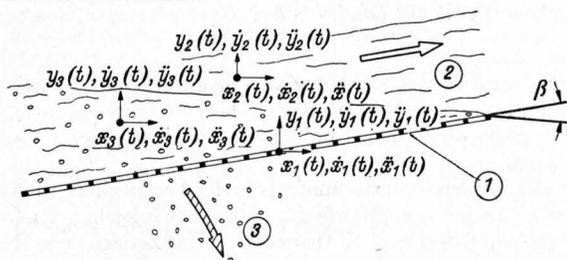
<sup>1)</sup> Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die für die Durchführung dieser Arbeit die Mittel bereitgestellt hat, sei an dieser Stelle besonders gedankt.

*Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader ist Direktor des Instituts für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode. Dipl.-Ing. Hans Sonnenberg ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ing. (grad.) Heinrich Peters Versuchstechniker in demselben Institut.*

den ist von Grob- und Feingut die Rede, wobei das Grobgut die fasrige Komponente und Feingut die körnige Komponente sein sollen;

- b) die Aggregate des Grobgutes stellen im statischen Zustand ein Flecht- und Stützwerk dar, in dessen Zwischenräumen das Feingut eingelagert ist;
- c) zwischen den Aggregaten wirken keine Bindekräfte;
- d) die Relativbewegung zwischen den Aggregaten der beiden Komponenten wird durch Massenkräfte bewirkt;
- e) im statischen Zustand wirken im Haufwerk nur die durch die Schwerebeschleunigung verursachten Kräfte;
- f) der Volumanteil des Feingutes am Gesamthaufwerk ist sehr klein;
- g) das Haufwerk wird über eine in vertikaler Richtung harmonisch schwingende, horizontale Unterlage zu Wurfbewegungen angeregt;
- h) die Unterlage stellt eine Siebfläche dar, deren Öffnungen eine Abscheidung des Feingutes erlauben.

Am Beispiel der Korn-Stroh-Trennung seien in **Bild 1** die wichtigsten den Trennvorgang bestimmenden Größen genannt. Es stellt sich nun die Aufgabe, den Einfluß der konstruktionsbedingten Größen auf die Bewegung des Haufwerks, bzw. seiner zu trennenden Komponenten, unter Berücksichtigung der Stoffkennwerte festzustellen.



**Bild 1.** Einflußgrößen bei der Korn-Stroh-Trennung mittels mechanischer Schwingungen

**1 Siebfläche:** Länge und Breite — Oberflächengestalt — Form, Größe und Anordnungen der Öffnungen — Neigung — Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Funktion der Zeit

**2 Grobgut (Stroh):** Massenbelegung — Form, Größe, Steifigkeit und Zuordnung der Einzelaggregate — Reibeigenschaften

**3 Feingut (Korn):** Form, Größe und Masse des Einzelkorns — Reibeigenschaften

## 2 Experimentelle frühere Arbeiten

Siebversuche mit körnigen Haufwerken haben gezeigt, daß der Sieberfolg bei einem Schwingesieb unter anderem sehr stark von der Erregerfrequenz abhängt. So stellt sich für die Trenn- und Abscheidewirkung immer bei einer bestimmten Frequenz ein Bestwert ein [10; 15], eine Erscheinung, die auch bei Trennversuchen mit Strohschüttlern festgestellt werden konnte [1; 3; 8; 21]. Ferner besteht zwischen dieser Optimalfrequenz  $f_{e\text{ opt}}$  und der Erregeramplitude  $A_e$  ein Zusammenhang, der sich näherungsweise in der Form  $A_e f_{e\text{ opt}}^2 = C$  ausdrücken läßt, wobei der Wert der Konstanten  $C$  von der Art des Haufwerks bestimmt wird [20].

Es fehlte auch nicht an Versuchen, die experimentell gewonnenen Ergebnisse zu deuten. Hinsichtlich der Wahl des für den Entmischungsvorgang bei der Korn-Stroh-Trennung günstigsten Bewegungszustandes von Unterlage und Haufwerk werden im wesentlichen zwei Auffassungen vertreten. Nach der Vorstellung von *Letošnev* [12] soll das Feingut dann am schnellsten zur Trennfläche gelangen, wenn die Aufprallgeschwindigkeit, d. h. die Relativgeschwindigkeit zwischen Haufwerk und Unterlage im Augenblick des Zusammentreffens am Ende einer Wurfphase, ihren Höchstwert hat. Hierbei wird von der Vorstellung ausgegangen, daß bei der Umkehr der Bewegungsrichtung im Haufwerk möglichst große Verzögerungswerte auftreten müssen, um so die für die Trennung erforderlichen Trägheitskräfte zu erreichen.

Die Deutung von *Petersen* [14] fußt auf der Annahme, daß für eine gute Entmischung das Grobgut stark aufgelockert sein muß, um dem Feingut den Durchtritt zu ermöglichen. Um diese Bedingung zu erfüllen, müsse dem Haufwerk der größtmögliche Weg angeboten werden, was dann der Fall sein soll, wenn das Auftreffen des Feinguts im Zeitpunkt der tiefsten Stellung der Unterlage erfolgt.

Da in dieser Bewegungsphase die Vertikalgeschwindigkeit der Unterlage Null ist, nimmt die Relativgeschwindigkeit zwischen

unterster Haufwerkschicht und Unterlage aber nur den Betrag der Fallgeschwindigkeit an. Beide Auffassungen widersprechen sich somit in wesentlichen Punkten. Sie stellen jedoch Teilaussagen einer komplexeren Hypothese dar, die im folgenden entwickelt und durch die Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen gestützt wird.

### Verwendete Formelzeichen

$A_e$	m	Erregeramplitude
$C$	$m/s^2$	Konstante
$c$	N/m	Federsteife
$c_R$	N/m	Beiwert der wegproportionalen Dämpfung
$c_S$	N/m	Federsteife des Strohes
$c_{RS}$	N/m	Beiwert der wegproportionalen Dämpfung des Strohes
$c^*$	N/m	innere Federsteife
$D$	N	Kraft der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul
$F$	N	Federkraft
$f_e$	1/s	Erregerfrequenz
$f_i$	1/s	Impulsfrequenz
$f_{e\text{ opt}}$	1/s	Optimalfrequenz (Erregerfrequenz, bei der der beste Abscheideerfolg auftritt)
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$h$	m	Höhe der Modelleinheit bei entspannter Feder
$h$	m	statische Einsenkung der Modelleinheit unter der Gewichtskraft
$h_{rel}$	m	relative Sprunghöhe
$K$	N	Kraft der wegproportionalen Dämpfung
$k$	1	Verhältnis der Wurfzeit zur Schwingungszeit
$m$	kg	Masse
$m_K$	kg	Körnermasse
$m_S$	kg	Strohmasse
$m'_S$	$kg/m^2$	flächenbezogene Strohmasse
$N$	N	Normalkraft
$n$	1	Zahl (bzw. Anzahl) der betrachteten Schicht (Schichten)
$P$	N	Kraft
$R$	N	Reibkraft
$r$	$Ns/m$	Beiwert der viskosen Dämpfung
$r_S$	$Ns/m$	Beiwert der viskosen Dämpfung des Strohes
$\Delta s$	m	Federweg
$t$	s	Zeit, Durchgangszeit
$t_A$	s	Aufprallzeitpunkt
$t_L$	s	Ablösezeitpunkt
$t_{0,8}$	s	Durchgangszeit für $\eta = 0,8$ (d. h. für 80% der aufgegebenen Körnermenge)
$X$	$kg/kg$	Feuchtegrad des untersuchten Gutes
$x$	m	Weg in horizontaler Richtung (Förderbewegung)
$y$	m	Weg in vertikaler Richtung
$y_e$	m	vertikaler Weg der Erregung
$y_m$	m	vertikaler Weg der Masse
$y_o$	m	vertikaler Weg des Fußes der untersten Modelleinheit
$y_{eL}$	m	Stellung der Unterlage im Ablösezeitpunkt
$\dot{y}_e$	m/s	Geschwindigkeit in vertikaler Richtung
$\dot{y}_{eL}$	m/s	Geschwindigkeit der Unterlage im Ablösezeitpunkt
$\dot{y}_{mL}$	m/s	Ablösegeschwindigkeit der Punktmasse
$\dot{y}_{Arel}$	m/s	Aufprallgeschwindigkeit
$\ddot{y}$	$m/s^2$	Beschleunigung in vertikaler Richtung
$\ddot{y}$	$m/s^2$	mittlere Beschleunigung in vertikaler Richtung
$\ddot{y}_e$	$m/s^2$	vertikale Beschleunigung der Erregung
$\ddot{y}_{e\text{ max}}$	$m/s^2$	maximale vertikale Beschleunigung der Erregung
$\alpha$	1	Vergrößerungsverhältnis
$\beta$	Grad	Neigungswinkel der Reibfläche
$\Gamma$	1	Beschleunigungskennziffer
$\delta$	1	Verdichtungsverhältnis
$\epsilon$	1	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	1/s	Dehnungsgeschwindigkeit
$\eta$	$Ns/m^2$	Viskositätskoeffizient
$\eta = m_{KD}/m_{KA}$		Anteil der abgeschiedenen Körner
$\lambda$	1	Auflockerungsverhältnis
$\mu$	1	Reibungszahl
$\sigma$	$N/m^2$	Spannung
$\varphi$	Grad	Drehwinkel
$\Delta\varphi$	Grad	Winkeldifferenz der Phasenverschiebung
$\nu$	m/m	Wegverhältnis
$\omega = 2\pi f$	1/s	Winkelgeschwindigkeit

### 3 Entmischungs-Hypothese

Eine Entmischung der beiden verschiedenen Haufwerkskomponenten ist nur möglich, wenn das Grobgut für das Feingut durchlässig ist und die an einem Feingutaggregat in Richtung der Siebfläche wirkende Beschleunigung so groß ist, daß der die Bewegung in dieser Richtung hemmende Formänderungs- und Reibwiderstand des Grobgutes überwunden wird. Für die beste Entmischungswirkung sollten somit folgende drei Faktoren Höchstwerte annehmen:

- die Anzahl der in der Zeiteinheit auf das gesamte Haufwerk einwirkenden Impulse,
- die je Impuls im Haufwerk wirkende, der Schwerebeschleunigung entgegengerichtete Beschleunigung und
- die Auflockerung, d.h. die Durchlässigkeit des Grobgutes.

Um diese Einzelvorgänge und ihr Zusammenwirken beurteilen zu können, bedarf es einiger theoretischer Betrachtungen. Zunächst sollen die in diesem Zusammenhang wesentlichen Aussagen aus der Theorie der Punktmassenbewegung in Kürze dargelegt werden, da sie die Grundlage bildet für die Erklärung der Verhaltensweise eines Haufwerks. Auf eine ausführliche mathematische Ableitung wird jedoch unter Hinweis auf das einschlägige Schrifttum verzichtet [1; 2; 4; 5; 7; 10; 11; 15; 19]. Ausgehend von den Gesetzen für die Punktmassenbewegung wird dann der Versuch unternommen, die Bewegung eines Massenverbandes zu analysieren. Neben diesen theoretischen Überlegungen wurden Versuche angestellt, die der Ermittlung des Bewegungsverhaltens eines Grobguthaufwerks — in diesem Fall im wesentlichen Stroh — und der sich jeweils daraus für körniges Gut ergebenden Entmischungswirkung dienen.

### 4 Theoretische Betrachtungen

#### 4.1 Die Bewegung einer Punktmasse

Eine Punktmasse kann gegenüber einer in senkrechter Richtung schwingenden Ebene, die zur Horizontalen nicht geneigt ist, verschiedene Bewegungen ausführen. Solange die Vertikalbeschleunigung der Unterlage  $\ddot{y}$  den Absolutwert der Schwerebeschleunigung  $g$  noch nicht erreicht hat, besteht zwischen Masse und Unterlage Kraftschluß. Überschreitet jedoch die Vertikalbeschleunigung  $\ddot{y}$  im negativen Bereich den Wert der Schwerebeschleunigung  $g$ , dann löst sich die Masse im Augenblick der Gleichheit von Vertikalbeschleunigung und Schwerebeschleunigung von der Unterlage ab.

stellen sich verschiedene Wurfarten ein. Man spricht von Einfachwürfen, wenn die Punktmasse bei jeder Periode der Erregerschwingung eine Wurfbewegung ausführt und diese immer von gleicher Dauer ist. Mehrfachwürfe treten auf, wenn die Wurfdauer mehrere Perioden überschreitet. Folgt jedoch einem längeren Wurf ein kürzerer, so liegt Wechselwurf vor. Diese Bewegungsart stellt sich ein, wenn beim Wiederauftreffen der Punktmasse die Verzögerung der Unterlage  $1g$  überschritten hat und somit eine sofortige Ablösung bei geringerer Geschwindigkeit erfolgt. Die Aufprallgeschwindigkeit erreicht immer dann ein relatives Maximum, wenn die Wurfzeit gleich der Schwingungszeit ist oder von dieser ein ganzzahliges Vielfaches beträgt [2; 4; 5; 7; 11; 19].

#### 4.2 Bewegung eines Haufwerks

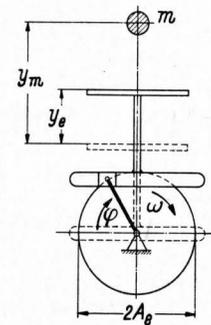
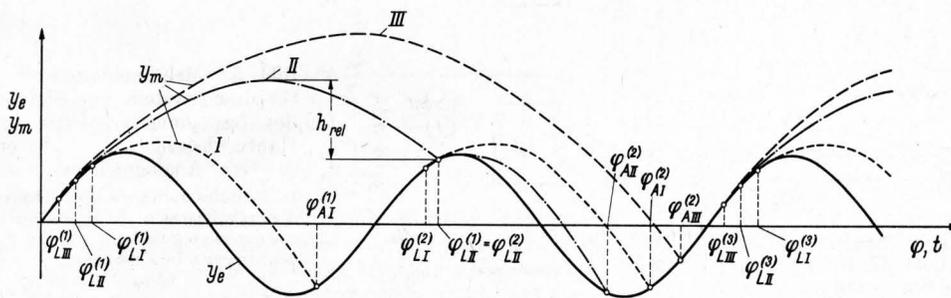
Deformierbare Körper können sich im Vergleich zur Punktmasse unter den genannten Einwirkungen sehr verschieden bewegen, je nachdem, welchen Gesetzen ihr Formänderungsverhalten unterliegt. In noch stärkerem Maße trifft dies für Haufwerke zu, die sich aus einer Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Körper zusammensetzen [2].

Um das Verhalten eines Haufwerks mit den Gesetzen der Mechanik erklären zu können, sei in erster Näherung angenommen, daß sich das Haufwerk als ein Verband mehrerer übereinander liegender Einzelmassen darstellen läßt, die kraftschlüssig gekoppelt sind und deren Relativbewegungen durch gedämpftes elastisches Verhalten gekennzeichnet sind. Die Dämpfung kann sowohl als innere Werkstoffdämpfung wie auch als äußere Reibungsdämpfung auftreten. Die Werkstoffdämpfung soll ein viskoses, d. h. geschwindigkeitsproportionales Verhalten aufweisen, während die äußere Reibungsdämpfung aus der Größe der zwischen den Aggregaten wirkenden Normalkräfte und damit aus der Dichte des Haufwerks resultiert. Da die Dichte von der vertikalen Verlagerung der Schichten abhängt, kann dieser Dämpfungsanteil auch „wegproportionale Dämpfung“ genannt werden.

Im folgenden sollen die genannten charakteristischen Eigenschaften dieses gewählten Ersatzmodelles näher betrachtet werden.

#### Elastizität

Elastisches Verhalten wird durch eine Feder mit der Federsteifigkeit  $c$  repräsentiert. Bei diesem Grundelement, in der Rheologie als *Hooke-Körper* bezeichnet [16], ist die Spannung  $\sigma$  der Dehnung  $\epsilon$  proportional, **Bild 3a**. Der Proportionalitätsfaktor ist



**Bild 2.** Darstellung des zeitlichen Verlaufs der drei Bewegungsarten einer Punktmasse auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage, die mittels eines Kreuzschleifengeriebes sinusförmig erregt wird.

$y_e$  vertikaler Weg der Erregung  
 $y_m$  vertikaler Weg der Masse  $m$

Ist die Beschleunigungskennziffer  $\Gamma \leq 3,3$ , so führt die Masse einen Einfachwurf (I) aus. Bei  $\Gamma > 3,3$  liegt Wechselwurf (II) oder Mehrfachwurf (Doppelwurf III) vor.

Die Masse führt dann eine Wurfbewegung aus. Diese ist abhängig von der Schwerebeschleunigung, von der Anfangsgeschwindigkeit und der Stellung der Unterlage zur Zeit der Ablösung. Die Wurfbewegung und die Bewegung der Unterlage bestimmen den Auftreffpunkt. In **Bild 2** ist dieser Bewegungsverlauf über dem Drehwinkel für eine in vertikaler Richtung erregte Unterlage dargestellt. Je nach Wahl der maximalen Erregerbeschleunigung

$$\ddot{y}_{e \max} = A_e \omega^2$$

bzw. deren Verhältnis  $\Gamma$  zur Schwerebeschleunigung

$$\Gamma = \frac{A_e \omega^2}{g}$$

der  $E$ -Modul. Das Verhalten des *Hooke-Körpers* ist durch die Gleichung

$$\sigma(t) = E \epsilon(t)$$

gegeben.

Der Verlauf der Federkraft  $F$  wird durch die Gleichung

$$F = c (-\Delta y)$$

dargestellt, worin  $c$  die Federsteife und  $\Delta y$  die Federlängung sind.

#### Geschwindigkeitsproportionale Dämpfung

Dieses Verhalten gibt der sogenannte *Newton-Körper* (**Bild 3b**) wieder, der die Spannungs-Dehnungs-Beziehung

$$\sigma(t) = \eta \dot{\epsilon}(t)$$

aufweist. Die Spannung  $\sigma$  ist hier linear von der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  abhängig. Der Proportionalitätsfaktor ist der Viskositätskoeffizient  $\eta$ . Als bewegungshemmende Kraft  $D$  (Dämpfungskraft) ergibt sich

$$D = r(-\Delta\dot{y}),$$

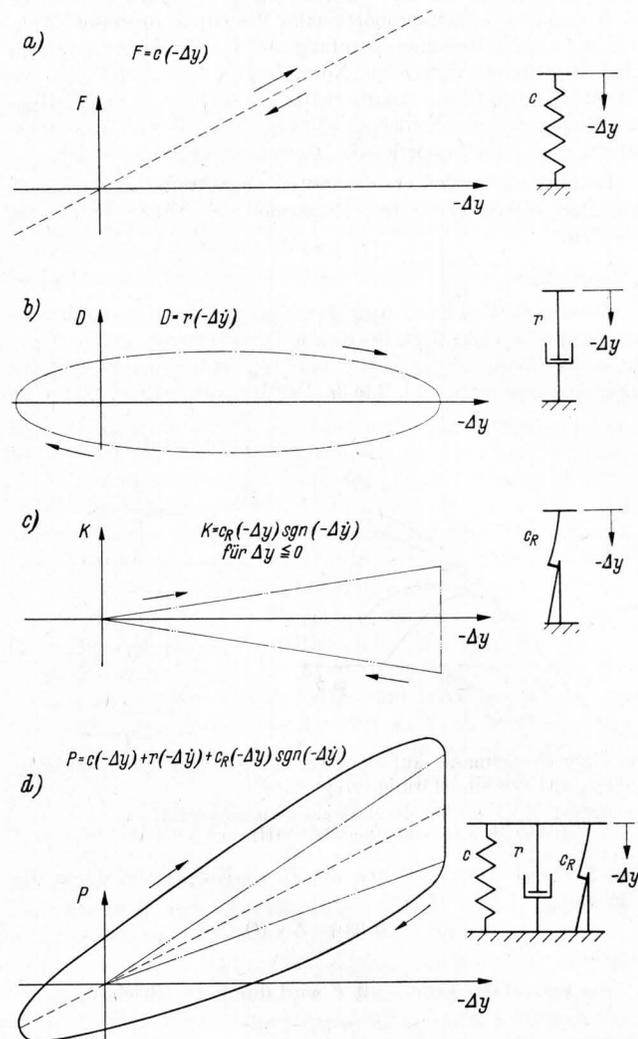
worin  $r$  der Beiwert der viskosen Dämpfung und  $\Delta\dot{y}$  die Geschwindigkeit der Federlängung sind.

#### Wegproportionale Dämpfung

Modellvorstellungen über den bewegungshemmenden Einfluß einer Reibkraft sind mehrfach entwickelt worden. So erfaßt der sogenannte *St. Venant-Prandtl*-Körper die Auswirkung einer konstanten Reibkraft, von *Ritter* [17] bei der Betrachtung reibungsbehafteter Mehrmassensysteme eingehend behandelt. *Bathelt* [6] wählt zur Darstellung des Verdichtungsvorganges bei schwingungserregten Sandschüttungen das Modell einer einklinkenden Feder, deren Kraft bei Zunahme des Weges (Verdichtung) ansteigt, dann aber nicht mehr zurückgegeben wird. Da auch dieses Modell für die vorliegende Aufgabe ungeeignet war, wurde in Anlehnung an *Mewes* [13] ein neues Keilmodell entwickelt [18], **Bild 4**, bei welchem eine Wegänderung  $\Delta y$  in der Beanspruchungsrichtung des Modells eine Änderung der Federkraft und damit der Normalkraft  $N$  auf das Reibelement und die daraus resultierende Reibkraft  $K$  hervorruft:

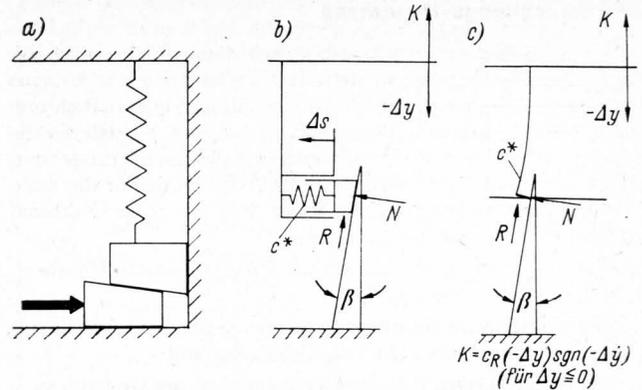
$$K = \mu \frac{N}{\cos \beta} = \psi \mu c^* (-\Delta y),$$

worin  $\mu$  der Reibwert,  $c^*$  die innere Federsteife des Elementes laut **Bild 4b** und **4c** und  $\psi$  das Wegverhältnis  $\Delta s/\Delta y$  sind.



**Bild 3.** Zusammensetzung des Modells für eine Haufwerksschicht zur Simulation auf einem Analogrechner aus der Parallelschaltung der drei rheologischen Grundelemente:

- für die Elastizität (*Hooke-Körper*),
- für die viskose Dämpfung (*Newton-Körper*) und
- für die wegproportionale Dämpfung;
- zusammengesetztes Modell.



**Bild 4.** Aufbau des rheologischen Grundelements für die wegproportionale Dämpfung. Die bewegungshemmende Reibkraft wächst und sinkt mit der Zu- bzw. Abnahme des Weges  $-\Delta y$ .

- einfaches Keilmodell nach *Mewes*; es bildet den Ausgangspunkt;
- neues Modell mit den gewünschten Eigenschaften und
- vereinfachte Darstellung des neuen Modells.

Berücksichtigt man noch, daß sich bei Umkehr der Bewegungsrichtung auch die Wirkungsrichtung der Reibkraft umkehrt und setzt man

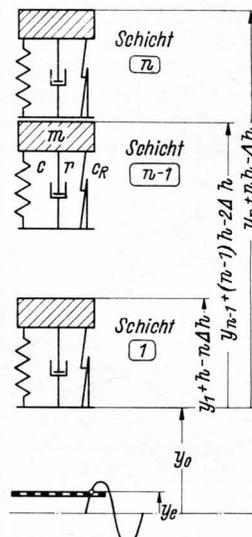
$$\psi \mu c^* = c_R,$$

dann ergibt sich für dieses Element die Gleichung

$$K = c_R (-\Delta y) \operatorname{sgn}(-\Delta \dot{y}).$$

Da die Feder des Elementes nur verkürzt werden kann, gilt die Gleichung auch nur für  $\Delta y \leq 0$  (**Bild 3c**).

Diese Grundelemente lassen sich nun hintereinander, parallel oder gemischt mit Einzelmassen zu schwingungsfähigen Mehrmassensystemen zusammenschalten, die sich dann bei Einwirkung äußerer dynamischer Kräfte jeweils sehr unterschiedlich verhalten können. Da eine gezielte Synthese des mechanischen



**Bild 5.** Mehrmassenmodell und Gleichungssystem zur Simulation des Bewegungsverhaltens von  $n$  Haufwerksschichten auf einem Analogrechner.

Im Falle des Aufliegens der Schichten auf der Auflagefläche ist der Weg  $y_0$  des Fußes der untersten Schicht gleich dem Weg  $y_e$  der Erregung. Im Falle des Wurfbewegung ist  $y_0 > y_e$ .

$h$  Höhe der Modelleinheit bei entspannter Feder  
 $\Delta h$  statische Einsenkung der Modelleinheit unter der Gewichtskraft  
 $m, c, r$  und  $c_R$  konstant

$$\ddot{y}_n = (r/m)(-\dot{y}_n + \dot{y}_{n-1}) + (c/m)(-y_n + y_{n-1}) + (c_R/m)(-y_n + y_{n-1}) \times \operatorname{sgn}(-y_n + y_{n-1}) - g$$

$$\ddot{y}_{n-1} = (r/m)(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) - (\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_{n-2}) + (c/m)[(y_n - y_{n-1}) - (y_{n-1} - y_{n-2})] + (c_R/m) \{ (y_n - y_{n-1}) \operatorname{sgn}[-(y_n - y_{n-1})] + [(y_{n-1} - y_{n-2}) \operatorname{sgn}[-(y_{n-1} - y_{n-2})] \} - g$$

für  $y_0 = y_e$ :

$$\ddot{y}_1 = (r/m)[(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - (\dot{y}_1 - \dot{y}_e)] + (c/m)[(y_2 - y_1) - (y_1 - y_e)] + (c_R/m) \{ (y_2 - y_1) \operatorname{sgn}[-(y_2 - y_1)] + [(y_1 - y_e) \operatorname{sgn}[-(y_1 - y_e)]] \} - g$$

für  $y_0 > y_e$ :

$$\ddot{y}_1 = (r/m)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + (c/m)(y_2 - y_1) + (c_R/m)(y_2 - y_1) \operatorname{sgn}[-(y_2 - y_1)] - g$$

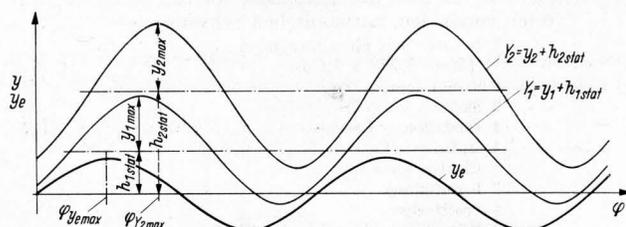
$$\dot{y}_0 = \dot{y}_1 + (c/r)(y_1 - y_0) + (c_R/r)(y_1 - y_0) \operatorname{sgn}(\dot{y}_0 - \dot{y}_1)$$

$$\ddot{y}_e = -y_e \omega^2$$

Modells für ein so heterogenes Haufwerk, wie es z. B. Stroh darstellt, kaum möglich sein dürfte, wurde in Anlehnung an ähnliche Arbeiten aus dem Gebiet der Fahrzeugschwingungen die Parallelschaltung der drei genannten Elemente (Bild 3d) je Einzelmass gewährt und mit solchen Modelleinheiten ein Mehrmassensystem so aufgebaut, daß die Einheiten jeweils einzeln übereinander angeordnet eine Säule bilden, **Bild 5**. Aufgrund von Beobachtungen an schwingenden Haufwerken kann ferner die Einschränkung gemacht werden, daß zwischen den Modelleinheiten ständig Kraftschluß besteht, das gesamte System sich jedoch von der erregenden Unterlage zeitweise abheben kann.

Das Bewegungsverhalten des Systems kann nun durch eine Reihe gekoppelter Differentialgleichungen beschrieben werden, wobei jeder Modelleinheit eine eigene Differentialgleichung zugeordnet ist. Je nachdem, ob das System mit der Unterlage Kraftschluß hat ( $y_0 = y_e$ ) oder, für den Fall der Wurfbewegung, keine feste Koppelung besteht ( $y_0 > y_e$ ), werden die Gleichungen verschieden sein. Für  $n$  gleichwertige Modelleinheiten (Haufwerkschichten) nimmt das Gleichungssystem unter den genannten Voraussetzungen die in Bild 5 dargestellte Form an.

Das Verhalten dieses so beschriebenen Modells kann nun auf einer elektronischen Rechenanlage simuliert werden. Im vorliegenden Fall wurde ein Analogrechner verwendet, der mit zusätzlichen Logik-Elementen bestückt war und die Ergebnisse als zeitlich veränderliche Größen entweder in Form eines Direktschriebes mit einem X-Y-Schreiber oder als stehendes Bild auf einem Oszilloskop ausgab. Wegen der begrenzten Kapazität der Anlage mußte das Modell auf zwei Einheiten beschränkt werden. Wie durch Kontrollrechnung festgestellt werden konnte, wird der Aussagewert der Ergebnisse dadurch nicht beeinträchtigt.



**Bild 6.** Definition der Kennwerte für die Beurteilung eines Mehrmassensystems.

$y_2$  vertikaler Weg der obersten Haufwerkschicht  
 $y_1$  vertikaler Weg der untersten Haufwerkschicht  
 $y_e$  vertikaler Weg der Erregung

Die Kennwerte sind:

$$\text{das Vergrößerungsverhältnis } \alpha = \frac{y_2 \max}{A_e}$$

$$\text{das Auflockerungsverhältnis } \lambda = \frac{(y_2 - y_1) \max}{A_e}$$

$$\text{das Verdichtungsverhältnis } \delta = \frac{(y_1 - y_2) \max}{A_e}$$

$$\text{die Winkeldifferenz } \Delta\varphi_2 = \varphi_{Y_2 \max} - \varphi_{Y_{e \max}}$$

Um der Simulation möglichst reale Randbedingungen zugrunde zu legen, wurden diese den Ergebnissen von Schwingungsversuchen entnommen, die zuvor mit einem Strohhafwerk durchgeführt worden waren und auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden soll. In **Tafel I** sind die verwendeten Werte aufgeführt. Mit dieser Untersuchung sollte festgestellt werden, unter welchen Voraussetzungen die optimale Zuordnung von Impulszahl, Beschleunigung und Auflockerung für dieses Modell erfüllt ist.

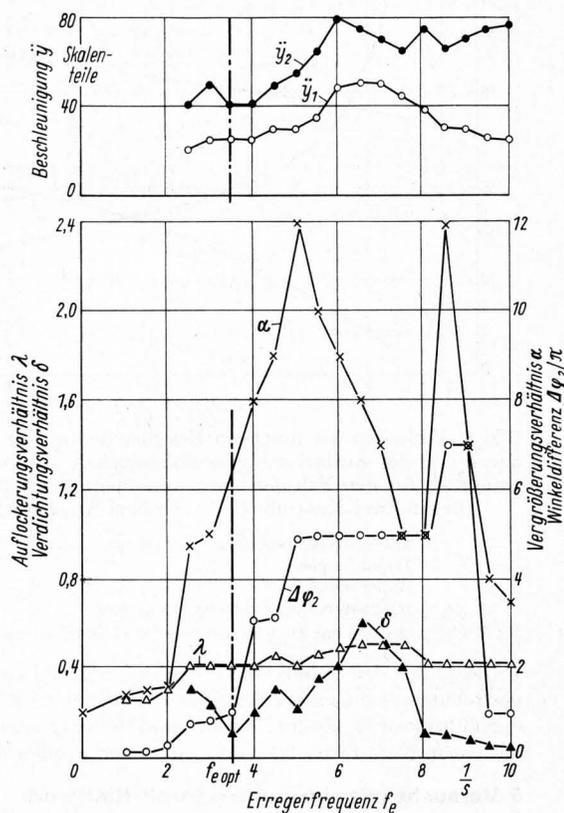
**Tafel I.** Bei der Simulation verwendete Zahlenwerte.

Masse	$m = 2 \text{ kg}$
Anzahl der Schichten	$n = 2$
Erregeramplitude	$A_e = 0,01 \dots 0,07 \text{ m}$
Erregerfrequenz	$f_e = 1 \dots 10 \text{ 1/s}$
Federsteife	$c = 2452,5; 4905,0 \text{ N/m}$
Beiwert der viskosen Dämpfung	$r = 58,9 \text{ Ns/m}$
Beiwert der wegproportionalen Dämpfung	$c_R = 490,5 \text{ N/m}$

Die Anzahl der in der Zeiteinheit auf das System einwirkenden Impulse kann aus dem Zusammenhang zwischen Erregerfrequenz und der Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  geschlossen werden, die sich aus der

Verschiebung des Maximums der Wurfhöhe für die oberste Masse zum oberen Totpunkt der erregenden Unterlage ergibt, **Bild 6**. Die in **Bild 7** dargestellte Kennlinie für die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi_2$  weist immer dann einen Sprung um den Betrag  $2\pi$  auf, wenn die Wurffolge eine weitere Periode der Erregerschwingung einschließt und somit an der oberen Masse die wirksame Impulsfrequenz sich im reziproken Verhältnis zur Zahl der übersprungenen Perioden verändert. Gleichzeitig ist dann auch jeweils ein steiler Anstieg der Kennlinie für das Vergrößerungsverhältnis zu erkennen, die nach Erreichen eines oder mehrerer relativer Höchstwerte auf ein tieferes Niveau absinkt, wobei gleichzeitig die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi_2$  auf den Wert  $\pi$  zurückgeht. Dies bedeutet, daß das Gut dann von der schnell schwingenden Unterlage jeweils nur ganz kurz bei jeder oberen Totlage der Unterlage angeschlagen wird.

Sehr aufschlußreich ist der Verlauf der Kennlinie für das Auflockerungsverhältnis  $\lambda$  und das Verdichtungsverhältnis  $\delta$ . Es zeigt sich, daß die Auflockerung keineswegs der Tendenz des Vergrößerungsverhältnisses  $\alpha$  folgt, sondern sich mit ansteigender Frequenz nur unwesentlich verändert. Anders verhält es sich bei der Verdichtung, die im unteren Frequenzbereich dann abnimmt, wenn die Kennlinie des Vergrößerungsverhältnisses stark ansteigt, bzw. die Winkeldifferenz einen Sprung um eine Periode aufweist.



**Bild 7.** Kennlinien ( $\alpha, \Delta\varphi_2, \lambda, \delta, y$ ) des Bewegungsverhaltens eines Zwei-Massenmodells in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz (nach Berechnung auf einem Analogrechner).

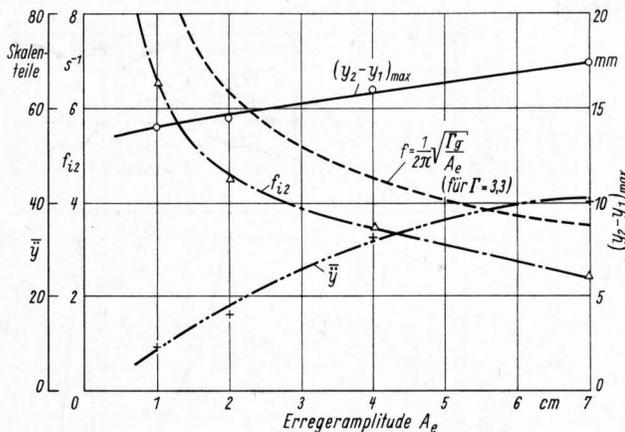
Simulation eines Haufwerks in zwei Schichten von der Gesamtmassebelegung  $4 \text{ kg/m}^2$ .

**Rechenwerte:**

Erregeramplitude	$A_e = 0,04 \text{ m}$
Masse einer Schicht	$m = 2 \text{ kg}$
Federsteife	$c = 4905 \text{ N/m}$
Beiwert der viskosen Dämpfung	$r = 58,9 \text{ Ns/m}$
Beiwert der wegproportionalen Dämpfung	$c_R = 490,5 \text{ N/m}$

Diese Zusammenhänge traten auch bei anderen Erregeramplituden auf. Besonders deutlich zeichnete sich immer die Koppelung des Periodensprungs der Winkeldifferenz mit einem steilen Anstieg bzw. einem relativen Maximum des Vergrößerungsverhältnisses ab. Da bei Steigerung der Erregerfrequenz unmittelbar nach dem ersten Periodensprung die Auflockerung nicht mehr nennenswert ansteigt, ferner zwar die Beschleunigung weiter zunimmt, gleichzeitig jedoch ein verhältnismäßig starker Anstieg der Verdichtung festzustellen ist, kann der Schluß gezogen werden, daß gemäß der oben genannten Hypothese die besten Ent-

mischungsbedingungen unmittelbar vor Auftreten des Periodensprungs der Winkeldifferenz, d. h. bei der in Bild 7 mit  $f_{e\text{opt}}$  bezeichneten Frequenz, vorliegen müssen<sup>2)</sup>. Wie das Bild zeigt, treten ähnlich günstige Bedingungen nochmals in einem höheren Frequenzbereich ( $\approx 10$  Hz) auf. Diese Erscheinung konnte auch bei Entmischungsversuchen beobachtet werden. Für die Anwendung dürfte jedoch die niedrigere Optimalfrequenz geeigneter sein. Für diesen Fall sind in **Bild 8** die bei Veränderung der Erregeramplitude auftretenden Werte für die mittlere Beschleunigung der beiden Massen, die auf die obere Masse einwirkende Impulsfrequenz und die absolute Auflockerung zusammengestellt. Man erkennt, daß bei einer Erhöhung der Erregeramplitude die Kennlinie für die mittlere Beschleunigung und die Impulsfrequenz der oberen Masse eine gegenläufige Tendenz aufweisen, während die Auflockerung nur geringfügig ansteigt. Da es kaum möglich ist, den einzelnen Komponenten eine Wertigkeit hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Entmischungsvorgang zuzuordnen, kann auch über den quantitativen Einfluß der Erregeramplitude keine Aussage gemacht werden. Zum Vergleich der Impulsfrequenz  $f_{12}$  für das Zwei-Massenmodell ist die nach der angegebenen Gleichung errechnete Optimalfrequenz  $f$  für eine Punktmasse gestrichelt eingezeichnet.



**Bild 8.** Verhalten der mittleren Beschleunigung, der Impulsfrequenz und der Auflockerung in Abhängigkeit von der Erregeramplitude für den Fall der Optimalfrequenz (nach Berechnung für ein Zwei-Massenmodell auf einem Analogrechner).

$$\begin{aligned} \text{mittlere Beschleunigung } \bar{y} &= 1/2 (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) \\ \text{Impulsfrequenz } f_{12} & \\ \text{Auflockerung } (y_2 - y_1)_{\max} & \\ \text{Optimalfrequenz } f \text{ für eine Punktmasse} & \end{aligned}$$

Die Rechenwerte und das Zwei-Massenmodell sind dieselben wie in Bild 7.

Diesen aus den Simulationsversuchen aufgrund einer Modellvorstellung gewonnenen Erkenntnissen sollen nun die Ergebnisse gegenübergestellt werden, die bei praktischen Untersuchungen mit einem Korn-Stroh-Haufwerk gewonnen wurden.

## 5 Versuche mit einem Korn-Stroh-Haufwerk

Um einen Einblick in das Verhalten eines realen Mehrmassensystems zu gewinnen, wurde eine Versuchseinrichtung erstellt, deren Aufbau **Bild 9** und **10** zeigen. Die Anlage ermöglichte nicht nur eine Analyse der Bewegungsvorgänge bei Grobgut (Stroh), sondern gestattete auch die genaue Erfassung der Feingutbewegung.

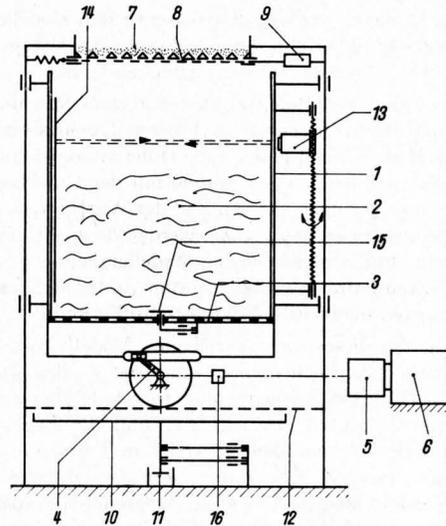
### 5.1 Analyse der Strohbewegung

Bei diesen Versuchen sollten für die oberste Haufwerkschicht die Kennlinien für das Vergrößerungsverhältnis  $\alpha$  und die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  bei verschiedenen Erregeramplituden  $A_e$  und Haufwerkhöhen festgestellt werden. Ferner war von Interesse, bei welchem Drehwinkel  $\varphi$  die unterste Haufwerkschicht auf die erregende Unterlage jeweils auftrifft.

Zur Ermittlung des Vergrößerungsverhältnisses war die Messung der Wurfhöhe der obersten Schicht erforderlich. Hierfür wurde eine Lichtschranke von oben an die schwingende Strohmasse herangeführt, Bild 9, bis auf dem Bildschirm eines an den

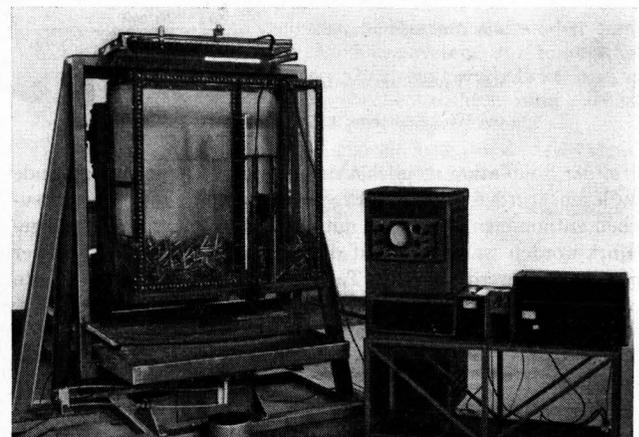
<sup>2)</sup> Die Beschleunigungswerte sind in Skalenteilen des Rechner-Oszilloskops angegeben. Die Kurven stellen reine Vergleichswerte der bei der jeweiligen Frequenz auftretenden Beschleunigungen dar.

Fotoempfänger angeschlossenen Oszilloskops deren Unterbrechung zu beobachten war. Gleichzeitig wurde die Stellung der Lichtschranke über dem Behälterboden festgelegt. Um auch für den Fall des Wechselwurfes einen gesicherten Wert für den Drehwinkel zu erhalten, bei welchem die oberste Schicht ihre relative maximale Wurfhöhe erreicht, mußte die Lichtschranke so tief in das Haufwerk eingefahren werden, daß auch das zweite, geringere



**Bild 9.** Aufbau der Versuchseinrichtung für die Untersuchung des Bewegungsverhaltens und des Körnerdurchganges eines Korn-Stroh-Haufwerks bei verschiedenen Erregeramplituden und -frequenzen, der über die horizontale Auflagefläche eingeleiteten vertikalen, harmonischen Schwingungen.

- 1 Behälter mit Plexiglaswänden (Fläche  $0,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ )
- 2 Strohfüllung
- 3 Siebboden
- 4 verstellbarer Exzenter ( $0 \leq A_e \leq 0,07 \text{ m}$ )
- 5 stufenloses Getriebe ( $1 \leq f_e \leq 8 \text{ 1/s}$ )
- 6 Elektromotor
- 7 Kornfüllung
- 8 Spaltboden
- 9 Magnet zum Öffnen des Spaltbodens
- 10 Waage (mit Dehnungsmeßstreifen)
- 11 Dämpfung der Waage
- 12 Netz zum Auffangen von Einzelhalmen
- 13 kombinierter Lichtsender und -empfänger (höhenverstellbar bis  $0,7 \text{ m}$  über Siebboden)
- 14 Reflexionsband
- 15 Auflagekraftgeber (mit Dehnungsmeßstreifen)
- 16 elektrischer Drehwinkelgeber



**Bild 10.** Gesamtansicht der Versuchseinrichtung, die für die Messungen des Entmischungserfolges verwendet wurde.

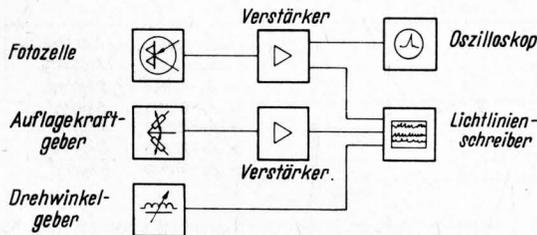
Wurfmaximum erreicht wurde. Die Registrierung dieser Werte erfolgte dabei mit einem Lichtlinienschreiber, der gleichzeitig auch die Totpunktmarke der Erregung sowie den Verlauf der Auflagekraft wiedergab, **Bild 11 a**.

Als Versuchsmaterial diente abgelagertes Haferstroh. Um eine gleichmäßige Verteilung im schwingenden Behälter zu erreichen, mußten die Halme auf eine mittlere Länge von  $30 \text{ cm}$  gebracht

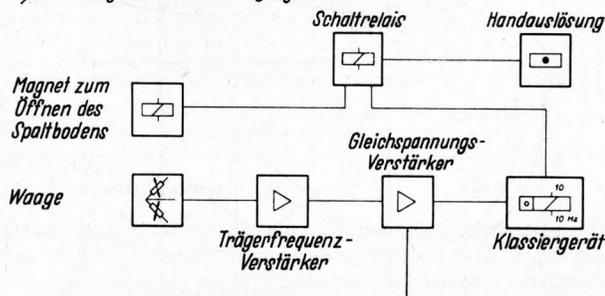
und in einer Drescheinrichtung geknickt werden. Die Variationsbreite der Werte für die Massenbelegung  $m_s'$  der erregenden Unterlage ergab sich aus dem im praktischen Betrieb auftretenden Bereich.

Bei der Bestimmung des Vergrößerungsverhältnisses  $\alpha$  und der Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  für die oberste Strohschicht ergab sich ebenfalls die bei der Rechnung ermittelte Korrespondenz zwischen dem Periodensprung der Winkeldifferenz und dem Verlauf des Vergrößerungsverhältnisses, **Bild 12**.

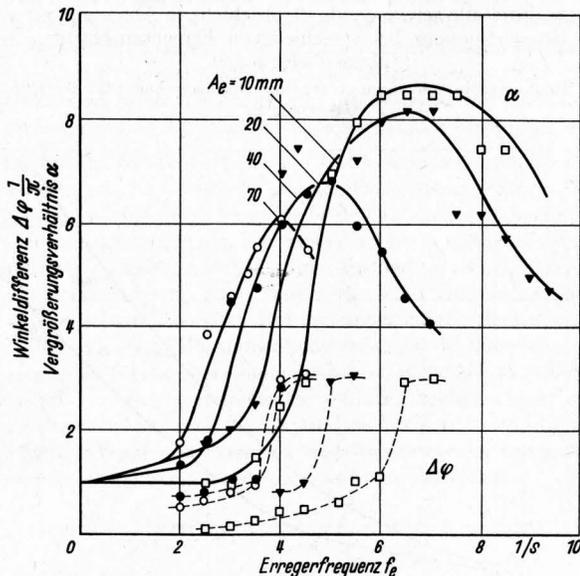
a) Messung der Strohbewegung



b) Messung des Körnerdurchgangs



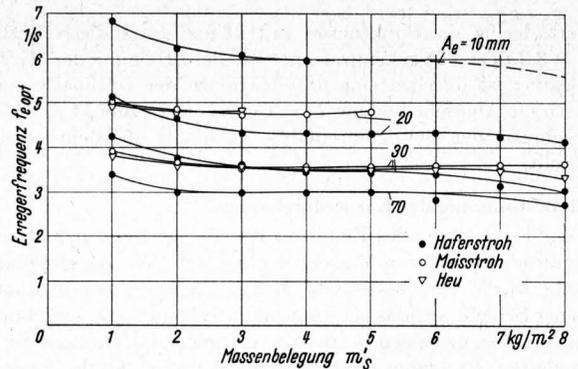
**Bild 11.** Blockschaltbilder für die Messung der Strohbewegung und des Körnerdurchganges mittels der Versuchseinrichtung in Bild 9 und 10.



**Bild 12.** Kennlinien des Bewegungsverhaltens eines Strohaufwerks in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz für verschiedene Erregeramplituden  $A_e$ .

Haferstroh  
Massenbelegung  $4 \text{ kg/m}^2$   
Feuchtegrad  $X = 0,08$

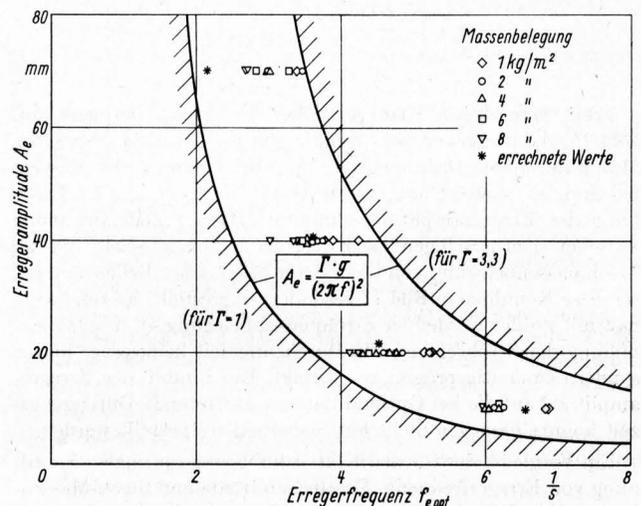
Wie bereits erwähnt, konnte aus Kapazitätsgründen auf dem Rechner der Einfluß der Massenzahl nicht erfaßt werden. Daher wurde bei den Versuchen besonders auch auf die Klärung dieser Frage Wert gelegt. Hierbei zeigte sich, **Bild 13**, daß sich die optimale Erregerfrequenz  $f_{e \text{ opt}}$  über einen großen Bereich der Massenbelegung nur unwesentlich verändert. Diese Erscheinung konnte auch bei anderem Halmgut, wie z. B. Heu und Maisstroh, festgestellt werden, obwohl dieses Material eine vom Stroh verschiedene mittlere Dichte aufweist. Bei sehr starker Verringerung der Massenbelegung nähert sich die optimale Frequenz dem



**Bild 13.** Einfluß der Massenbelegung auf die Optimalfrequenz bei verschiedenen Stroharten und Erregeramplituden  $A_e$ .

**Tafel 2.** Funktionsgesetze für das Verhalten einer Punktmasse auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage.

Bewegungsphase	Funktionsgesetze
Kraftschluß zwischen Masse und Unterlage	Weg $y_e = y_m = A_e \sin \omega t$ Geschwindigkeit $\dot{y}_e = \dot{y}_m = A_e \omega \cos \omega t$ Beschleunigung $\ddot{y}_e = \ddot{y}_m = -A_e \omega^2 \sin \omega t$ Beschleunigungskennziffer $\Gamma = \frac{-A_e \omega^2}{g}$
Ablösung	Ablösebedingung $\ddot{y}_e = g$ oder $\Gamma = 1$ ( $g = -9,81 \text{ ms}^{-2}$ ) Ablösezeitpunkt $t_L = 1/\omega \arcsin 1/\Gamma$ Stellung der Unterlage $y_{eL} = A_e/\Gamma$ Ablösegeschwindigkeit der Punktmasse $\dot{y}_{mL} = \dot{y}_{eL} = \frac{-g}{\omega} \sqrt{\Gamma^2 - 1}$
Aufprall	Aufprallzeitpunkt $t_A = \frac{2\pi}{\omega} k + t_L$ ( $k = \frac{\text{Wurfzeit}}{\text{Schwingszeit}}$ ) Aufprallgeschwindigkeit $\dot{y}_{A \text{ rel}} = 2 \sqrt{\frac{A_e g}{\Gamma}} \cdot [-\pi k + \sin \pi k \cdot (\sqrt{\Gamma^2 - 1} \sin \pi k + \cos \pi k)]$ Zwischen $k$ und $\Gamma$ besteht der Zusammenhang $\Gamma = \sqrt{1 + \left(\frac{1 - \cos 2\pi k - 2\pi^2 k^2}{\sin 2\pi k - 2\pi k}\right)^2}$



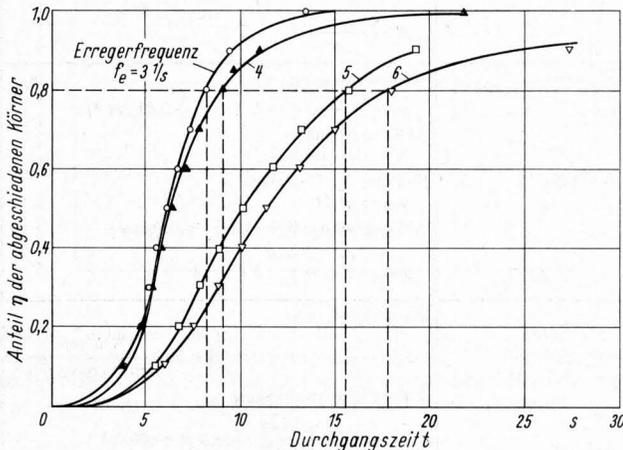
**Bild 14.** Zusammenhang zwischen Erregeramplitude, -frequenz und Massenbelegung beim Übergang der obersten Strohschicht vom Einfachwurf zum Wechselwurf mittels der Zwei-Massenmodellberechnung auf dem Analogrechner und der Analyse der Strohbewegung.

Haferstroh, Feuchtegrad  $X = 0,08$

Wert, der bei der Punktmasse auftritt und durch die Kennziffer  $\Gamma = 3,3$  (Tafel 2) gekennzeichnet ist. Bei Erhöhung der Massenbelegung ist dagegen eine untere Grenze der Optimalfrequenz durch die Ablösebedingung  $\Gamma = 1$  gegeben. In Bild 14 sind diese Ergebnisse der Bewegungsanalyse nochmals übersichtlich dargestellt.

### 5.2 Bestimmung des Körnerdurchgangs

Zur Feststellung des Einflusses von Erregerfrequenz, Erregeramplitude und Stroh-Massenbelegung auf den Entmischungserfolg wurde eine bestimmte Menge Weizenkörner in dünner ebener Schicht auf das schwingende Strohhauwerk aufgebracht und die Zeit gemessen, in der die Körner das Hauwerk durchwanderten. Zu diesem Zweck wurde gleichzeitig mit der Freigabe der Körner (s. Bild 9, 10 und 11 b) ein 10-Klassen-Zeitzählwerk in Gang gesetzt, dessen Einzelzählwerke nacheinander jeweils dann automatisch abgeschaltet wurden, wenn an der elektrischen Waage die Gewichtskraft eine Dekade des Gesamtgewichts überschritt. Hierdurch war es möglich, den zeitlichen Verlauf des Körnerdurchgangs sofort in Form einer Summenhäufigkeitskurve, Bild 15, darzustellen, der dann als Kennwert für den Entmischungserfolg die Zeit entnommen werden konnte, die für den Durchgang eines bestimmten Körneranteils an der Gesamtkörnermenge erforderlich war. Es hatte sich als zweckmäßig erwiesen, diesen Anteil mit  $\eta = m_{KD}/m_{KA} = 0,8$  festzulegen, woraus sich dann der Kennwert  $t_{0,8}$ , gemessen in s, ergab.



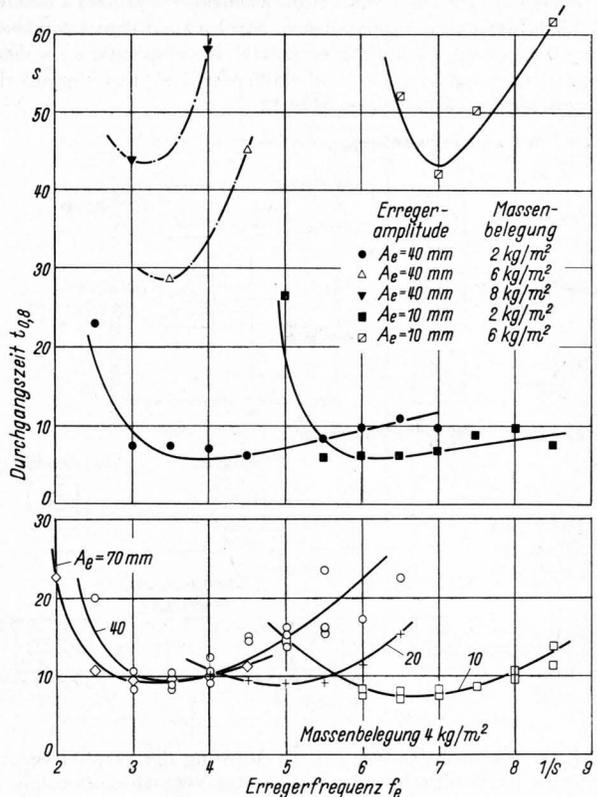
**Bild 15.** Summenkurven der abgeschiedenen Körner in Abhängigkeit von der Durchgangszeit für verschiedene Erregerfrequenzen. Für einen bestimmten Anteil der aufgegebenen Körnermenge (z. B. 80%; d. h.  $\eta = 0,8$ ) läßt sich für die verschiedenen Erregerfrequenzen der Entmischungserfolg anhand der Durchgangszeit als Kennwert angeben.

Erregeramplitude  $A_e = 40$  mm  
Haferstroh, Massenbelegung  $4 \text{ kg/m}^2$   
Weizenkörner

Trägt man diesen Kennwert über der Erregerfrequenz auf, Bild 16, dann ergeben sich Kennlinien mit einem ausgeprägten Minimum, dessen Ordinatenwert ( $t_{0,8}$ ) bei Zunahme der Massenbelegung  $m'_s$  ansteigt und dessen Abszissenwert ( $f_{e \text{ opt}}$ ) bei Erhöhung der Erregeramplitude abnimmt. Da der Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Tiefwert der Durchgangszeit und der Strohmassenbelegung von besonderer praktischer Bedeutung ist, sei diese Kennlinie in Bild 17 gesondert dargestellt. Es zeigt sich, daß mit größer werdender Strohmassenbelegung, d. h. einer Erhöhung der Strohschicht, die Durchgangszeit keineswegs linear, sondern eindeutig progressiv ansteigt. Ein Einfluß der Erregeramplitude auf die bei Optimalfrequenz auftretende Durchgangszeit konnte hingegen nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

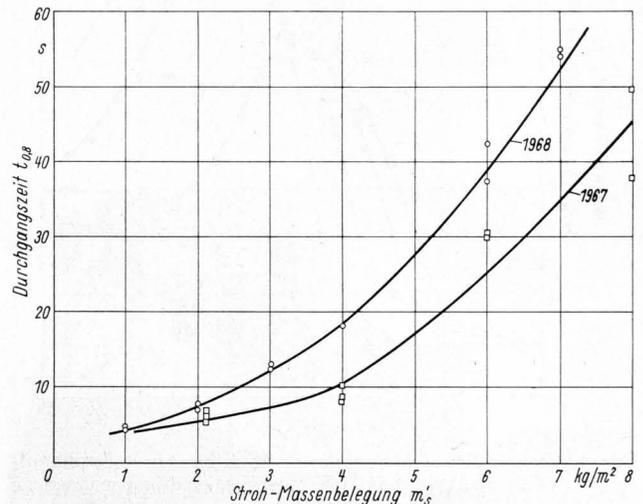
Ein Vergleich der für den Körnerdurchgang optimalen Zuordnung von Erregerfrequenz, Erregeramplitude und Stroh-Massenbelegung in Bild 13 mit den Optimalwerten, die gemäß Hypothese bei der Berechnung des Zwei-Massen-Modells und bei der Analyse der Strohbelegung ermittelt wurden (Bild 14), ergibt eine sehr gute Bestätigung der Annahmen. Man erkennt, daß der Bestwert für die Körnerdurchgangszeit sich immer dann einstellt, wenn die Bewegung der obersten Strohschicht vom Einfachwurf

in den Wechselwurf übergeht. Bei diesem Bewegungszustand herrschen somit offensichtlich die für die Entmischung des Hauwerks günstigsten Voraussetzungen. Die darunter liegenden Schichten führen dann immer noch einen vollen Einfachwurf aus.



**Bild 16.** Durchgangszeiten  $t_{0,8}$  für 80% der aufgegebenen Körnermenge durch die schwingende Strohschicht in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz bei verschiedenen Erregeramplituden und Massenbelegungen.

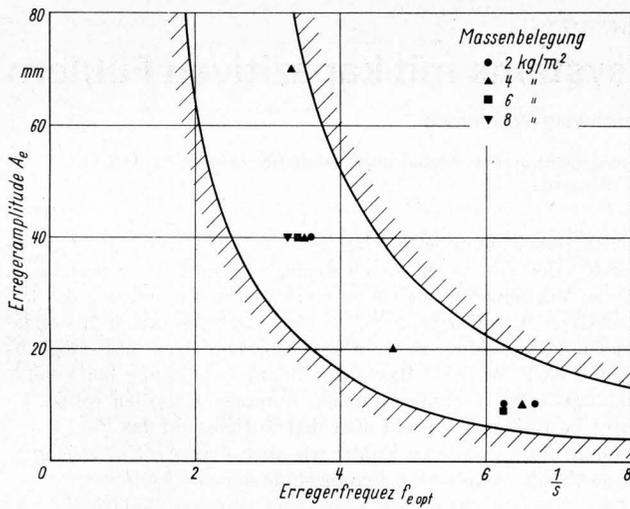
Die Minima der Kurven zeigen die jeweilige Optimalfrequenz für den Körnerdurchgang an.



**Bild 17.** Durchgangszeit  $t_{0,8}$  für Körner in Abhängigkeit von der Stroh-Massenbelegung für Haferstroh aus zwei Ernten.

Erregeramplitude  $A_e = 40$  mm

Wird durch eine Erhöhung der Amplitude oder der Frequenz das Beschleunigungsverhältnis vergrößert, so gehen nach und nach auch die unteren Schichten vom Einfach- in den Wechselwurf bzw. Doppelwurf über, bis schließlich das gesamte Hauwerk zu periodischen Wurfbewegungen mit der halben Erregerfrequenz angeregt ist. Dieser schnelle Rückgang der pro Zeiteinheit auf das Hauwerk einwirkenden Impulse übt den dominierenden Einfluß aus. Er hat trotz Zunahme der im Hauwerk wirkenden Beschleunigung eine Verschlechterung des Körnerdurchgangs zur Folge.



**Bild 18.** Zusammenhang zwischen Erregeramplitude, -frequenz und Massenbelegung bei optimalem Körnerdurchgang.

Die Darstellung zeigt aufgrund von Korn-Stroh-Entmischungsversuchen den Bereich der für die Kornabscheidung günstigsten Zuordnung von Erregeramplitude, -frequenz und Massenbelegung. Man erkennt, daß die Bestwerte mit den in Bild 14 dargestellten Ergebnissen aus der Stroh Bewegungsanalyse gut übereinstimmen.

Haferstroh, Feuchtegrad  $X = 0,08$   
Weizenkorn, Feuchtegrad  $X = 0,12$

## 6 Zusammenfassung

Ausgehend von den Bewegungsgesetzen, denen eine zu periodischen Wurfbewegungen angeregte Punktmasse folgt, wurde versucht, das Verhalten eines Mehrmassensystems bei entsprechender Anregung mit Hilfe eines einfachen Modellansatzes und unter Verwendung eines Analogrechners zu analysieren. Hiermit sollte die Frage geklärt werden, bei welcher Zuordnung von Erregeramplitude, Erregerfrequenz und Massenbelegung ein aus zwei sehr verschiedenartigen Komponenten bestehendes Feststoffhaufwerk am wirkungsvollsten entmisch werden kann. Es konnte nachgewiesen werden, daß der beste Entmischungserfolg dann erreicht wird, wenn die Anzahl der pro Zeiteinheit in das Haufwerk eingeleiteten Impulse der Erregerfrequenz entspricht.

Da die im Haufwerk wirkende Beschleunigung und die Auflockerung bei einer Veränderung der Erregerfrequenz gegenläufige Tendenzen aufweisen, kann für beide Größen nicht gleichzeitig ein Höchstwert auftreten. Sie müssen somit in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Bewegung der obersten Haufwerkschicht vom Einfachwurf zum Wechselwurf übergeht. Für den untersuchten Bereich ergab sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Erregeramplitude und der für die Erreichung des besten Entmischungserfolges erforderlichen Erregerfrequenz. Sowohl die Ergebnisse des Simulationsversuchs wie auch die der Analyse der Stroh bewegung weisen für die Wahl von Frequenz und Amplitude der erregenden Unterlage einen Bereich aus, der durch die Beziehung

$$A_e = \frac{g}{4 \cdot \pi^2} \frac{\Gamma}{f_e^2}$$

mit

$$1,0 < \Gamma < 3,3$$

ausgedrückt werden kann. Bei  $\Gamma = 3,3$  ist die Wurfzeit für den Einfachwurf der Punktmasse gleich der Periodenzeit. Sowohl durch eine Erhöhung der Amplitude, wie auch durch eine Verringerung der Massenbelegung wird die Optimalfrequenz zu größeren  $\Gamma$ -Werten hin verschoben.

Unter Berücksichtigung dieser günstigsten Zuordnung von Frequenz und Amplitude der erregenden Unterlage kann ein direkter Einfluß der Amplitude auf den Entmischungserfolg nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden. Hingegen zeigte sich eine mehr als lineare Abnahme des Entmischungserfolges bei einer Erhöhung der Massenbelegung.

Für den eingangs erwähnten Anwendungsfall des Mährescherstüttlers, wie auch für alle Trenneinrichtungen, bei welchen die

erregende Unterlage dem zu trennenden Haufwerk gleichzeitig auch eine Förderbewegung erteilt, sind diese Aussagen von besonderer Bedeutung. Bei der Wahl von Amplitude und Frequenz muß darüber hinaus auch der Einfluß dieser Größen auf die Fördergeschwindigkeit berücksichtigt werden, von der bei konstantem Durchsatz nicht nur die Massenbelegung abhängt, sondern auch die bei gegebener Förderlänge zur Verfügung stehende Verweilzeit.

## 7 Schrifttum

Bücher sind mit ● gekennzeichnet

- [1] *Ardeev, N. E.*: Issledovanie raboty klavishnykh solomotrijasov (Untersuchung der Arbeit der Hordenschüttler). *Mechanizacija i Elektrifikacija* **18** (1960) H. 6, S. 12/16.
- [2] ● *Baader, W.*: Untersuchungen über das Verhalten eines Haufwerks großer Schichthöhe auf einem schwingenden Siebrost. Diss. TH Braunschweig 1960. Auszug in: *Grundl. Landtechn.* Heft 13 (1961) S. 13/20.
- [3] *Baader, W.*, und *H. Meier*: Untersuchungen an Mährescherstroschüttlern. Unveröffentl. Vers.-Ber. Nr. 66/1 Maschinenfabrik Fahr AG, Gottmadingen 1966.
- [4] ● *Bachmann, D.*: Bewegungsvorgänge in Schwingmühlen mit trockener Mahlkörperfüllung. Beitrag zur Klärung des Schwingmahlvorgangs. Diss. TH Karlsruhe 1939. Auszug in: *Z. VDI Beiheft Verfahrenstechn.* (1940) Nr. 2, S. 43/55.
- [5] *Batel, W.*: Über die Zerkleinerung in Schwingmühlen. *Chemie-Ing.-Techn.* **30** (1958) Nr. 9, S. 567/72.
- [6] ● *Bathelt, U.*: Das Arbeitsverhalten des Rüttelverdichters auf plastisch-elastischem Untergrund. Berlin: Ernst & Sohn 1956.
- [7] ● *Böttcher, S.*: Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen. Diss. TH Hannover 1957. Auszug in: *Fördern und Heben* **8** (1958) H. 3, S. 127/31; H. 4, S. 235/40 und H. 5, S. 307/15.
- [8] *Csukás, L.*: Beszámoló a szalmarázókísérletek eredményeiről (Bericht über die Ergebnisse von Stroschüttlerprüfungen). *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* **7** (1960) H. 5, S. 174/79.
- [9] ● *Giloi, W.*, und *R. Lauber*: Analogrechnen. Programmierung, Arbeitsweise und Anwendung des elektrischen Analogrechners. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Verl. Springer 1963.
- [10] ● *Glatzel, H.*: Untersuchungen über die Aufstellung von Leistungskennlinien an schnelllaufenden Schwingmühlen für die Fein- und Feinstklassierung verschiedener Massengüter. Diss. TH Aachen 1938. Auszug in: *Z. VDI Beiheft Verfahrenstechn.* (1939) Nr. 1, S. 31/33.
- [11] ● *Kroll, W.*: Über das Verhalten von Schüttgut in lotrecht schwingenden Gefäßen. Diss. TH Aachen 1953. Auszug in: *Forsch. Ing.-wesen* **20** (1954) S. 2/15.
- [12] ● *Letošnev, M. N.*: Sel'skochozjajstvennye masiny (Landmaschinen). Sel'choziz 1955.
- [13] *Mewes, E.*: Untersuchungen von Fließigenschaften mit einfachen mechanischen Modellen. *Kolloid-Z.* **131** (1953) H. 2, S. 84/88.
- [14] *Petersen, E. H.*: Beitrag zur Theorie der Dreschmaschine. *Techn. i. d. Landw.* **22** (1941) H. 8, S. 153/54.
- [15] *Prockat, F.*, und *E. Rammler*: Untersuchungen über die Arbeitsweise von Zittersieben. *Glückauf* **71** (1935) Nr. 31, S. 725/36 und Nr. 32, S. 755/62.
- [16] ● *Reiner, M.*: Rheologie in elementarer Darstellung. München: Verl. C. Hanser 1968.
- [17] ● *Ritter, R.*: Zur erzwungenen periodischen Bewegung von Ein- und Mehrmassensystemen unter Einfluß coulombischer Dämpfung. Diss. TH Braunschweig 1967.
- [18] *Sonnenberg, H.*: Untersuchungen über das Bewegungsverhalten eines Haufwerks unter Einwirkung harmonischer, in vertikaler Richtung über die Auflagefläche eingeleiteter Schwingungen. Unveröffentl. Diplomarbeit TU Braunschweig 1968.
- [19] ● *Wehmeier, K. H.*: Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrinnen. Diss. TH Hannover 1961. Auszug in: *Fördern und Heben* **11** (1961) H. 5/6, 20 S.
- [20] *Wessel, J.*: Grundlagen des Siebens und Sichtens. Hab. Arbeit TH München 1967. *Aufbereitungs-Techn.* **8** (1967) H. 4, S. 167/80.
- [21] Untersuchungen zur Regelung der Schüttlerfrequenz — eine Möglichkeit durchgreifender Senkung der Ernteverluste. *Dt. Agrartechn.* **14** (1964) H. 7, S. 293/96.