

Das Verhalten eines Schüttgutes auf schwingenden Siebrosten¹⁾

Von Wolfgang Baader, Gottmadingen

Die zweckmäßigste Bewegungsart eines Schwingsiebtes richtet sich in erster Linie nach Zustand, Art und Zusammensetzung des zu verarbeitenden Gutes. Eine Absiebung kann erst stattfinden, wenn die siebbaren Bestandteile sich über den Öffnungen des Siebes befinden und durch eine Kraft durch diese hindurchbewegt werden. Solange das Siebgut in einer sehr dünnen Schicht ohne Kraft- und Formscluß der einzelnen „Körner“ untereinander auf der Siebfläche liegt, genügt in der Regel eine Bewegung des Siebgutes in der Siebebene, damit die siebbaren Teile infolge der Schwerkraft durch die Sieböffnungen fallen. Sobald das Gut aber durch Bindekräfte zusammengehalten wird, müssen diese statischen Kräfte beim Sieben durch dynamische Kräfte aufgehoben werden. Dynamische Kräfte im Siebgut können aber nur durch eine Beschleunigung des Gutes von seiten des Siebes hervorgerufen werden. Wenn die Schichthöhe nicht viel größer ist als die Größe der abzusiebenden Teile, genügen für eine sichere Absiebung bereits kleine Beschleunigungen. Bei größeren Schichthöhen muß das Gut jedoch so stark beschleunigt werden, daß die absiebenden Teile den Durchdringungswiderstand des umgebenden Gutes und die Bindekräfte überwinden und so zu den Sieböffnungen gelangen können. Je größer nun die Beschleunigungen sind und je öfter ein Beschleunigungswechsel auftritt, desto besser wird die Siebleistung sein.

Hohe Beschleunigungen lassen sich kurzzeitig am einfachsten über einen Stoßvorgang erzielen. Bewegt man das Schwingsieb so, daß das Siebgut periodisch geworfen wird, dann werden im Siebgut bei jedem Aufprall infolge des Stoßes Trägheitskräfte wirksam, deren Größe in erster Linie von der normal zum Sieb gerichteten Geschwindigkeitskomponente des Aufpralles abhängt. Man wird daher eine um so höhere Siebleistung erzielen,

1. je größer diese Komponente der Aufprallgeschwindigkeit ist,
2. je höher die Wurfzahl des Siebes in der Zeiteinheit ist, und
3. wenn die Förderleistung des Siebes groß genug ist, um eine kontinuierliche Beschickung zu gewährleisten.

Bei einer sehr dünnen Siebgutschicht können die Aufprallgeschwindigkeit, die Wurfzahl und die Fördergeschwindigkeit mit hinreichender Genauigkeit errechnet werden. Mit wachsender Schichthöhe beeinflussen jedoch Kohäsion, Dämpfung und Elastizität immer mehr das dynamische Verhalten des Siebgutes, so daß gegenüber dem errechneten Bewegungsablauf erhebliche Abweichungen auftreten können.

In jedem Fall sollte man aber dennoch eine Berechnung für die Einzelmasse vornehmen. Man erhält dann jeweils die bestmöglichen Werte, die in der Praxis um so eher erreicht werden, je geringer die Bindekräfte innerhalb des Siebgutes und je niedriger die Schichthöhe sind.

1. Die Bewegung einer Einzelmasse auf einer schwingenden, ebenen Unterlage

Es sei vorausgesetzt, daß die Bewegung jedes einzelnen Punktes des Schwingsiebtes in einer Ebene liegt, also eine ebene Bewegung vorliegt. Die unter dem während der Schwingung konstanten Winkel β zur Horizontalen geneigte Siebfläche,

Bild 1, habe im Punkt S zur Zeit t die Beschleunigung b , deren Betrag und Richtung graphisch oder rechnerisch aus dem Bewegungsgesetz des Getriebes ermittelt werden kann. Der Siebboden übt dann unter dem Einfluß der Beschleunigung b des Siebes und der Erdbeschleunigung g die Kraft P auf die Masse m aus; die Komponenten dieser Kraft sind:

normal zur Siebfläche

$$P_n = m (g_n + b_n) = m \cos \beta (g + b_v) \dots \dots \dots (1)$$

parallel zur Siebfläche

$$P_t = m (g_t + b_t) = m \left[(g + b_v) \sin \beta + \frac{\ddot{x}}{\cos \beta} \right] \dots \dots (2)$$

Sind $\ddot{x}(t)$ und $\ddot{y}(t)$ die auf ein rechtwinkliges Koordinatensystem bezogenen Komponenten der Beschleunigung b , dann ist

$$b_v = \ddot{y} - \ddot{x} \tan \beta \dots \dots \dots (3)$$

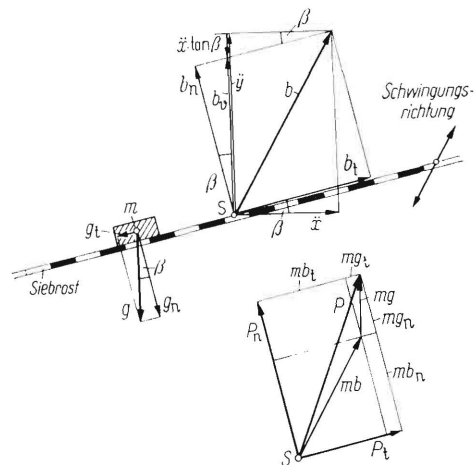


Bild 1. Beschleunigungsplan zur Ermittlung der Relativbewegungen sowie der Kräfte der Siebfläche auf das Siebgut. Benutzte Formelzeichen Seite 14 unten.

Je nach Größe der Beschleunigungskomponenten b_n und b_t kann nun eine Masse innerhalb einer Schwingungsperiode folgende Bewegungen relativ zum Siebboden ausführen:

- a) Dauerndes Haften,
- b) Haften und Gleiten,
- c) Dauerndes Gleiten,
- d) Wurf mit nachfolgendem Haften ohne Gleiten,
- e) Wurf mit nachfolgendem Gleiten und Haften und
- f) Wurf mit nachfolgendem Gleiten ohne Haften.

1.1 Die Gleitbewegung

Soll die Masse parallel und relativ zum Siebboden unter Beibehaltung des Kraftschlusses sich bewegen, dann muß ein Reibungswiderstand

$$R = \mu_0 P_n \dots \dots \dots (4)$$

Dr.-Ing. Wolfgang Baader war wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. D. Simons †) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braun-schweig-Völkenrode.

¹⁾ Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Kuratoriums für Technik in der Landwirtschaft durchgeführt, denen auch an dieser Stelle verbindlichst gedankt sei.

überwunden werden, worin μ_0 der Reibungsbeiwert der Ruhe ist. Die Grenzbedingung für den Beginn der Gleitbewegung zwischen Masse und Siebboden ist also

$$P_t = \mu_0 P_n$$

oder

$$\frac{P_t}{P_n} = \mu_0 \dots \dots \dots (5).$$

Setzt man Gl. (1), (2) und (3) in Gl. (5) ein, so erhält man als Grenzbedingung für das Gleiten:

$$\tan \beta - \frac{\ddot{x}}{(g + \ddot{y} - \ddot{x} \tan \beta) \cos^2 \beta} = \mu_0 \dots \dots (6).$$

Bleibt der linke Ausdruck in Gl. (5) und (6) während einer ganzen Schwingungsperiode kleiner als μ_0 , dann ist die Masse relativ zum Siebboden in Ruhe. Wird er zeitweise größer als μ_0 , dann wechseln Haften und Gleiten. Ist er jedoch immer größer als μ_0 , so gleitet die Masse ununterbrochen auf dem Siebboden.

Bei einem dauernden Kraftschluß zwischen Masse und Sieb kann auf das zu verarbeitende Gut nur wenig Energie übertragen werden, so daß die Entmischung und Umordnung der zu trennenden Einzelkörper nur sehr langsam vor sich geht. Für Siebmaschinen wird daher in der Regel eine Wurfbewegung der reinen Gleitbewegung vorgezogen.

1.2 Die Wurfbewegung

Die Ablösung der Masse m vom Siebboden kann erst dann erfolgen, wenn die Normalkraft P_n aufgehoben wird, d. h., wenn die Gleichung

$$P_n = m \cos \beta (g + b_v) = 0$$

bzw.

$$b_v = -g$$

erfüllt ist. Nach Einsetzen von Gl. (3) lautet die Ablösebedingung

$$\ddot{y} - \ddot{x} \tan \beta = -g \dots \dots \dots (7).$$

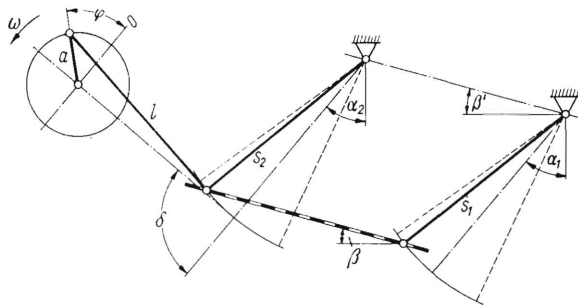


Bild 2. Schema des untersuchten Schwingensiebgetriebes.

- $\alpha_1 = \alpha_2 = 40^\circ$
- $\beta = \beta' = 15^\circ$
- $\delta = 90^\circ$
- $l = 700 \text{ mm}$
- $s_1 = s_2 = 800 \text{ mm}$
- a und ω variabel

Aus dieser Gleichung läßt sich der Zeitpunkt t_L der Ablösung bestimmen, sofern die Beschleunigungsfunktionen $\ddot{x}(t)$ und $\ddot{y}(t)$ für den betrachteten Siebpunkt S bekannt sind. Ist bei einer schwingenden Siebbewegung

$$b_{v \max} \leq -g \quad \text{bzw.} \quad \frac{b_{v \max}}{g} \leq -1 \dots \dots (8),$$

so kann keine Ablösung der Masse vom Siebboden auftreten. Für eine schwingende Siebbewegung wird deshalb die Größe

$$\frac{b_{v \max}}{g} = \frac{1}{g} (\ddot{y} - \ddot{x} \tan \beta)_{\max} = K_v \dots \dots (9)$$

auch die Kennziffer für die Wurfbewegung genannt. Sie ist das Verhältnis der maximalen, parallel zum Siebboden auf die Vertikale projizierte Komponente $b_{v \max}$ der Siebbeschleunigung zur Erdbeschleunigung g .

Hinsichtlich der Energieübertragung beim Wiederauftreffen der Masse auf die Siebfläche ist nun von Interesse, zu welchem Zeitpunkt der Aufprall erfolgt, und welche Relativgeschwindigkeit senkrecht zur Siebfläche die Masse in diesem Augenblick hat. Unter der Voraussetzung, daß die Siebfläche nur eine Parallelverschiebung erfährt, d. h. der Winkel β über die ganze Schwingungsperiode konstant bleibt und daß sich die Masse vom Augenblick der Ablösung ab nach den Wurfgesetzen (unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes) bewegt, kann der Aufprallzeitpunkt t_A aus der Gleichung

$$y - y_L - \tan \beta (x - x_L) + (t_A - t_L) (\dot{x}_L \tan \beta - \dot{y}_L) + \frac{g}{2} (t_A - t_L)^2 = 0 \dots \dots \dots (10)$$

z. B. mit Hilfe der graphischen Nullstellenbestimmung ermittelt werden²⁾.

Im Aufprallzeitpunkt t_A sind dann die Komponenten der Relativgeschwindigkeit zwischen Masse und Siebfläche

$$\Delta v_{Ax} = \dot{x}_A - \dot{x}_L - \Delta v_{Lx} \cos \beta \dots \dots \dots (11)$$

$$\Delta v_{Ay} = \dot{y}_A - \dot{y}_L + g (t_A - t_L) + (\dot{x}_L - \dot{x}_A) \tan \beta \dots \dots (12).$$

In der Regel herrscht zwischen Siebgut und Sieb im Augenblick der Ablösung eine Gleitbewegung Δv_{Lx} , deren Größe vom Gleitreibungsbeiwert zwischen Siebgut und Sieb, ferner von der vom Siebgut auf das Sieb ausgeübten Normalkraft und dem Verlauf der parallel zur Siebfläche wirkenden Beschleunigung während der Dauer des Kraftschlusses abhängt.

Wird z. B. das Sieb durch einen Kurbeltrieb in Schwingungen versetzt, **Bild 2**, dann besteht zwischen der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Phasenwinkel φ der Kurbel die Beziehung

$$\varphi = \omega t.$$

²⁾ Diese und die folgenden Formeln sind in [1] ausführlich abgeleitet.

Benutzte Formelzeichen

b	Beschleunigung des Siebes in Punkt S	m	Einzelmasse eines körnigen Siebgutes
b_n	Komponente von b , senkrecht zur Siebfläche	A	aufgegebene Siebgutmenge pro Siebflächen- und Zeiteinheit in $\text{kg/m}^2 \text{s}$
b_t	Komponente von b , in Richtung der Siebfläche	D	durchgesiebte Menge pro Siebflächen- und Zeiteinheit (Siebdurchgangsleistung) in $\text{kg/m}^2 \text{s}$
b_v	Komponente von b_n , parallel zum Siebboden auf die Lotrechte projiziert	D_A	durchgesiebte Menge pro Siebflächeneinheit und Aufprall in kg/m^2
$x(t), y(t)$	die Zeitfunktionen des Weges von Punkt S	e_A	Dichte des Siebgutes beim Aufprall
\dot{x}, \dot{y}	die Komponenten der Geschwindigkeit des Punktes S	t_L	Ablösezeitpunkt des Siebgutes vom Sieb
\ddot{x}, \ddot{y}	die Komponenten der Beschleunigung des Punktes S	t_A	Aufprallzeitpunkt des Siebgutes auf dem Sieb
Index L	im Zeitpunkt t_L des Ablösens der Masse vom Siebboden	t_d	Durchgangszeit zwischen Aufprall der untersten Schicht auf dem Sieb und dem Verschließen der Sieböffnungen durch Gewölbbildung
Index A	im Zeitpunkt t_A des Aufpralles der Masse auf dem Siebboden	P	Gesamtkraft des Siebbodens auf die Siebmasse
Δv	Relativgeschwindigkeit zwischen Masse und Siebboden	P_n	Komponente von P , senkrecht zum Siebboden
Δv_A	Relativgeschwindigkeit zwischen Masse und Siebboden im Aufprallzeitpunkt t_A	P_t	Komponente von P , tangential zum Siebboden
$\Delta v_{Ax}, \Delta v_{Ay}$	Komponenten der Relativgeschwindigkeit Δv_A	P_{dyn}	dynamische Reaktionskraft des Siebbodens auf die Siebmasse beim Aufprall
Δv_{Lx}	Relativgeschwindigkeit zwischen Masse und Siebfläche in Richtung der Siebfläche im Ablösezeitpunkt t_L	μ_0	Reibungsbeiwert der Ruhe zwischen Siebmasse und Siebboden
g	Erdbeschleunigung (der Siebmasse)	R	Reibungswiderstand zwischen Siebmasse und Siebboden
g_n	Komponente von g , senkrecht zur Siebfläche	$K_v = b_{v \max}/g$	Kennziffer für die Wurfbewegung
g_t	Komponente von g , tangential zur Siebfläche	φ	Phasenwinkel der Antriebskurbel des Schwingensiebes
α	Neigungswinkel der Schwinde gegen die Vertikale	F	gesamte Siebfläche
β	Neigungswinkel der Siebfläche gegen die Horizontale	F_d	freie Siebfläche

Der Ablösezeitpunkt t_L kann dann auch durch den Phasenwinkel $\varphi_L = \omega t_L$ und der Aufprallzeitpunkt t_A durch den Phasenwinkel $\varphi_A = \omega t_A$ ausgedrückt werden. Für das untersuchte Schwing-siebgetriebe ist in **Bild 3** der theoretische Verlauf der Funktionen $\varphi_L(K_v)$ und $\varphi_A(K_v)$ dargestellt. Die Wurfbewegung tritt danach erst bei einem Wert $K_v > 1$ ein [siehe Gl. (8)]. Ist z. B. $K_v = 2$, dann löst sich die Masse bei einer durch die ausgezogene Kurve gekennzeichneten Phasenlage φ_{L1} ab, um bei φ_{A1} (gestrichelte Kurve) wieder auf dem Siebboden aufzutreffen. Dies gilt für den ganzen Bereich $1 < K_v < 3,45$. Das Spiel wiederholt sich nun in gleicher Weise in jeder Schwingungsperiode ($\varphi_{L2}, \varphi_{A2}$ usw.).

Im Bereich $3,45 < K_v < 4,67$ trifft die Masse aber erst bei einer Phase φ_{A1} auf, bei welcher φ_{L2} bereits überschritten ist. Eine punktförmig gedachte Masse muß sich daher sofort wieder ablösen. Infolge der bei φ'_{L2} gegenüber ($\varphi_{L1} + 2\pi$) geringeren Bahngeschwindigkeit des Siebpunktes S ist der folgende Wurf kürzer: $(\varphi_{A2} - \varphi'_{L2}) < (\varphi_{A1} - \varphi_{L1})$.

Im Bereich $3,45 < K_v < 4,17$ erfolgt der Aufprall φ_{A2} später als φ_{L3} , aber früher als der Aufprall des erstenwurfes: $(\varphi_{A1} + 2\pi) > \varphi_{A2} > \varphi_{L3}$. Demzufolge dauert der dritte Wurf mit φ_{L3} wieder etwas länger als der zweite Wurf. Dieser Pendelvorgang wiederholt sich nach einer bestimmten Anzahl von Schwingungsperioden. Eindeutig ist das Wurfverhalten aber wieder im Bereich $4,17 < K_v < 4,67$, wo einem langen Wurf ein kurzer folgt, $(\varphi_{A1} - \varphi_{L1}) > (\varphi_{A2} - \varphi_{L2})$, der bei einer Phase $\varphi_{A2} < \varphi_{L3}$ endet, so daß die Ablösung für den dritten Wurf wieder bei φ_{L3} erfolgt. Bei $K_v = 4,67$ hat die φ_A -Funktion eine Unstetigkeitsstelle, da hier die Kurven $y_{Masse}(\varphi)$ und $y_{Sieb}(\varphi)$ einander gerade berühren, **Bild 4**. Bei einer unendlich kleinen Vergrößerung von K_v geht der Doppelwurf $\varphi_{L1} \rightarrow \varphi_{A1} (= \varphi'_{L2}) \rightarrow \varphi_{A2}$ in einen Einfachwurf $\varphi_{L1} \rightarrow \varphi_{A1}$ über. Bei weiterer Erhöhung des K_v -Wertes wiederholen sich die geschilderten Vorgänge in entsprechender Weise über mehr Schwingungsperioden.

2. Die Bewegung eines Massenverbandes auf einer schwingenden, ebenen Unterlage

Während bisher nur das Verhalten einer Einzelmasse behandelt wurde, soll nun untersucht werden, auf welche Weise sich ein Haufwerk, d. h. eine regellose Anhäufung von Einzelmassen gleicher oder verschiedener Größe und Beschaffenheit, auf einer schwingenden Unterlage bewegt.

Vereinfachend sei angenommen, daß die Unterlage nur eine vertikale Bewegung ausführt. Ein Haufwerk allgemeiner Art soll als ein Massenverband definiert werden, der sich bei Einwirkung äußerer Kräfte im wesentlichen plastisch und zu einem geringeren Teil auch elastisch verformen kann. Ferner können innerhalb und zwischen den Einzelkörpern Bindekräfte verschiedener Art wirksam sein. Zur Betrachtung des mechanischen Verhaltens dieses Haufwerkes bei einer vertikal ausgerichteten Kräfteinwirkung soll ein Modell herangezogen werden, wie es in **Bild 5** dargestellt ist. Die Feder gibt das schwache elastische Verhalten wieder, der Dämpfer das allmähliche Fließen. Der Anteil der bleibenden Verformung wird durch einen Keil dargestellt, dessen Flankenform eine Selbsthemmung in gefederten Gegenlagern hervorrufen soll. Sowohl die Masse als auch die Federkennzahl, der Dämpfungswert und die Charakteristik des Keilelementes können bei den einzelnen Systemen völlig verschieden sein. Diese Eigenschaften bestimmen nun das Verformungsgesetz, welches das dynamische Verhalten sowohl der Teilsysteme als auch des gesamten Haufwerkes festlegt. Bei einer periodischen Erregung $y(t)$ der Unterlage (Siebboden) in vertikaler Richtung führt jede Einzelmasse eine Koppelschwingung $q(t)$ aus, die sowohl von der Erregerschwingung als auch von der Schwingung der benachbarten Systeme abhängt, von diesen aber in der Regel verschieden ist. Streben nun zwei benachbarte Einzelmassen auseinander, dann wird das Keilelement entlastet. Die selbsthemmende Wirkung kann dabei sogar aufgehoben werden, so daß sich die Keilverbindung löst und der Kraftschluß aufgehoben wird. Dies tritt z. B. ein, wenn durch Einwirkung äußerer Kräfte die Bindekräfte innerhalb des Haufwerkes aufgehoben werden.

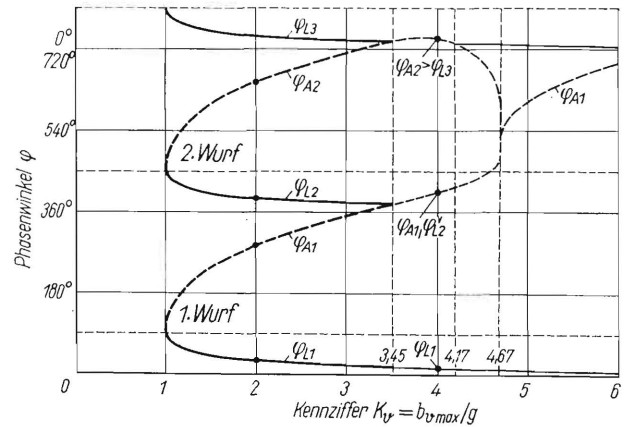


Bild 3. Ablösephase φ_L und Aufprallphase φ_A bei der Wurfbewegung einer punktförmig gedachten Masse auf einem schwingenden Siebboden bei verschiedenen Siebkennziffern K_v für das in Bild 2 dargestellte Schwing-sieb.

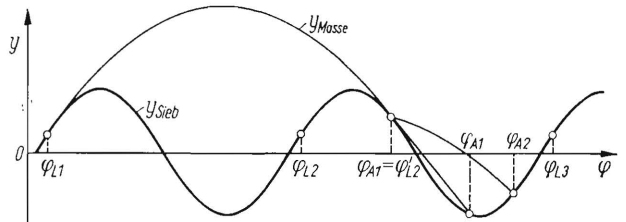


Bild 4. Erläuterung der Unstetigkeitsstelle bei der Funktion $\varphi_A(K_v)$ in Bild 3.

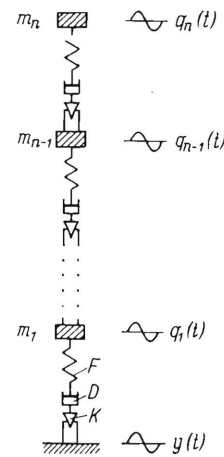


Bild 5. Strukturmodell für ein Schüttgut auf einer schwingenden Unterlage.

- F Feder (elastisches Verhalten)
- D Dämpfer (allmähliches Fließen)
- K Keil (Anteil der bleibenden Verformung)

2.1 Ablösung und Aufprall

Am Beispiel des senkrechten Wurfes soll zunächst der Aufprall dieses Modellhaufwerkes auf eine in vertikaler Richtung schwingende, horizontale Unterlage untersucht werden. Es sei vorausgesetzt, daß unmittelbar vor dem Aufprallzeitpunkt t_A zwischen den meisten Einzelkörpern kein Kraftschluß mehr besteht, und daß die „Federn“ entspannt sind. Der Aufprall des untersten Körpers mit der Masse m_1 auf die Unterlage zur Zeit $t_{A(1)}$ ruft an der Berührungsstelle eine Reaktionskraft

$$P_{\text{dyn}(1)} = m_1 \frac{d\Delta v_{A1}}{dt} \dots \dots \dots (13)$$

hervor, wobei Δv_{A1} die veränderliche Relativgeschwindigkeit des Massenschwerpunktes gegenüber der Unterlage bedeutet. Der

zeitliche Verlauf von $\Delta v_{A1}(t)$ hängt unmittelbar vom dynamischen Verformungsgesetz, von der Größe der Masse m_1 und der Aufprallgeschwindigkeit Δv_{A1} ab. Die maximale Reaktionskraft der Unterlage beim Aufprall des ersten Körpers ist relativ groß, da eine starre Unterlage mit sehr großer Masse vorausgesetzt wird. Trifft jedoch der nächste Körper mit der Masse m_2 mit der veränderlichen Relativgeschwindigkeit Δv_{A2} auf, dann wird infolge der zusätzlichen weiteren Verformung des ersten Systems die Kraft $P_{\text{dyn}(2)\text{max}} < P_{\text{dyn}(1)\text{max}}$. Jede weitere Schicht trifft auf ein Polster mit entsprechend größerer Masse und größerem Verformungsvermögen auf, so daß allgemein

$$P_{\text{dyn}(i)\text{max}} < P_{\text{dyn}(i-1)\text{max}}$$

ist und der in Bild 6 gezeigte Verlauf der Kurve $P_{\text{dyn}(i)\text{max}}(t)$ angenommen werden kann. Mit dem gleichzeitig erfolgenden Massenzuwachs ergibt sich für die Größe der jeweiligen Gesamtmasse auf der Unterlage der in der Kurve $\sum m_i(t)$ angegebene Verlauf und daraus das jeweilige Gesamtgewicht $G(t) = g \sum m_i(t)$.

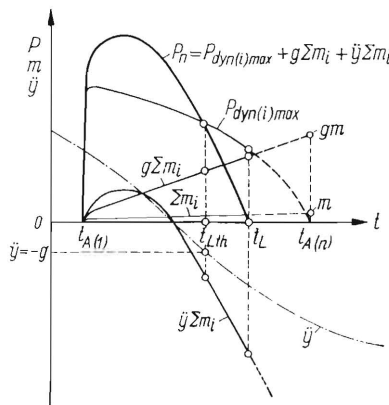


Bild 6. Ermittlung der resultierenden Kraft P_n zwischen Sieb und Masse beim Aufprall eines Haufwerks. Verschiebung des Ablösezeitpunktes t_L bei einer Wurfbewegung des Siebgutes.

Da nun die Unterlage eine schwingende Bewegung mit der vertikalen Beschleunigung $\ddot{y}(t)$ ausführt, erzeugt die aufliegende Gesamtmasse eine zusätzliche Reaktionskraft $\ddot{y} \sum m_i$. Die resultierende Reaktionskraft der schwingenden Unterlage auf die Masse in Abhängigkeit von der Zeit t ist somit

$$P_n(t) = P_{\text{dyn}(i)\text{max}}(t) + g \sum m_i(t) + \ddot{y}(t) \sum m_i(t) \quad (14)$$

Die Ablösung erfolgt in dem Augenblick, da die Bedingung

$$P_n(t) = 0 \quad (15)$$

erfüllt ist. Aus Bild 6 ist zu ersehen, daß die Ablösung schon vor dem Aufprallzeitpunkt $t_{A(n)}$ der letzten Schichten erfolgen kann,

was auch durch die bei praktischen Versuchen hergestellten Filmaufnahmen bestätigt wird. Der tatsächliche Ablösungszeitpunkt t_L fällt nur dann mit dem aus Gl. (7) sich ergebenden theoretischen Ablösezeitpunkt t_{Lth} zusammen, wenn die Reaktionskraft $P_{\text{dyn}(i)\text{max}}$ zu einem Zeitpunkt $t < t_{Lth}$ abgeklungen ist. Bei einer Wurfbewegung von Haufwerken ist dies nur bei sehr niedrigen K_V -Werten und gleichzeitig geringer Schichthöhe annähernd der Fall; denn dann wird die Auflagezeit infolge des kurzen Wurfes verhältnismäßig lang und die Aufprallzeit infolge der wenigen Einzelmassen kurz.

Auch das Verhalten des Haufwerks während der Auflagezeit läßt sich an Hand des mechanischen Modells erklären. Bei den einzelnen aufprallenden Körpern seien sowohl der plastische Anteil als auch die Dämpfung groß gegenüber dem elastischen Anteil. Wenn alle n Körper aufgeprallt sind, dann wirkt von der Unterlage auf die Masse die Kraft

$$P_n(t) = \sum_{i=1}^n m_i(g + \ddot{y}) \quad (16)$$

Von einem Körper einer beliebigen Schichthöhe k des Haufwerks wird nun auf die darüberliegenden Körper die Kraft

$$P_n(t) = \sum_{i=k+1}^n m_i(g + \ddot{y}) \quad (17)$$

ausgeübt. Infolge der Elastizität stellt sich ein bestimmter Abstand zwischen den Mittelpunkten der Massen m_k und m_{k+1} entsprechend dem Augenblickswert von $P_n(t)$ sowie der Federkonstanten und Dämpfungswerte der beiden benachbarten Systeme ein. Das heißt aber, daß zwischen den Massenmittelpunkten eine Relativgeschwindigkeit herrscht. Während der Auflagezeit $t_{L2} - t_{A1}$ nimmt nun $\ddot{y}(t)$ und damit $P_n(t)$ sehr schnell ab, die Federn entspannen sich, und die Körper streben auseinander. Vom Zeitpunkt t_L an unterliegen sie keiner äußeren Kraft mehr. Die kinetische Energie der sich auseinander bewegenden Massen bewirkt schließlich eine Dehnung der Federn, bis die Federkraft so groß ist, daß die Selbsthemmung des Keilelementes und damit der Kraftschluß zwischen den Einzelkörpern aufgehoben wird, das gesamte Haufwerk sich also auflockert. Ist der elastische Anteil größer, dann kann bereits beim Aufprall ein Rückfedern der einzelnen Körper eintreten und eine zusätzliche Auflockerung des Gutes entstehen.

Bei einer späteren Ablösung $t_L > t_{Lth}$ ist die Abwurfgeschwindigkeit kleiner und der Wurf infolgedessen kürzer. Die sich daraus ergebende geringere Aufprallgeschwindigkeit kann bei der Absiebung eines Haufwerks die Siebleistung wesentlich beeinflussen. Eine theoretische Behandlung der Wurfbewegung ohne Berücksichtigung dieser Vorgänge führt in der Regel zu Ergebnissen, die mit den praktischen Verhältnissen nicht im Einklang stehen.

Durch praktische Versuche kann der geschilderte Ablauf der Wurfbewegung eines Haufwerks auf einem Schwingsieb mit Ackerboden als Siebgut nachgewiesen werden. Der Aufbau und Bewegungsverlauf des für die Versuche benutzten Siebroses entspricht den speziellen Anforderungen bei der Absiebung von feuchter Erde in einer Kartoffelrntemaschine, Bild 7. Der Siebrost ist 1000 mm lang und 400 mm breit und besteht aus gezogenen Stahlrohren von 10 mm \varnothing , die in Längsrichtung in einem Abstand von 35 mm angeordnet sind, Bild 8. Das Sieb hängt in vier Stahlrohrschwingen in dem Maschinengestell und wird von einem Exzenter, dessen Amplitude stufenlos verstellt werden kann, in schwingende Bewegung versetzt. Hierbei ist durch den Antrieb mit einem Gleichstrommotor eine stetige Veränderung der Schwingungsfrequenz möglich. Bei den Versuchen sind die Schwingen in der Nullstellung des Getriebes zur Vertikalen $\alpha = 40^\circ$ und die Siebrostfläche zur horizontalen $\beta = 15^\circ$ geneigt. Über ein langes Zuführband kann das Sieb mit dem Siebgut besetzt werden. Die Ablöse- und Aufprallphasen der Erde bei der Wurfbewegung werden durch ein 70 mm langes Zwischenstück, das in die Lücke eines Siebstabes eingelassen ist und über eine Duralfeder mit ihm verbunden ist, erfaßt, Bild 9. Mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen, die auf die Feder aufgeklebt sind,

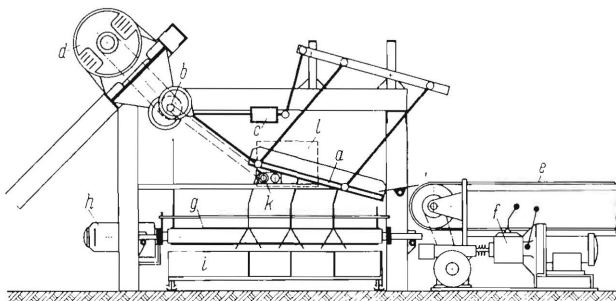


Bild 7. Aufbau des Schwingsieb-Versuchsstandes.

- a Siebrost mit Plexiglas-Seitenwand
- b Exzenterwelle
- c Ausgleichsmasse
- d Antriebsmotor
- e Zuführband
- f Antrieb für Zuführband
- g Querband
- h Antrieb für das Querband
- i Wagen mit Auffangbehältern
- k Phasen- und Zeitgeber
- l Bildausschnitt für Filmaufnahmen

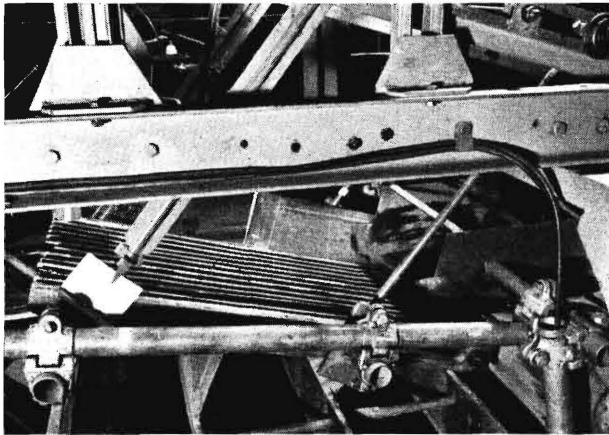


Bild 8. Ansicht des Siebrosstes bei abgenommener Seitenwand. In Siebmitte ist der elektronische Normalkraftgeber sichtbar.

kann in einem Oszillographen der zeitliche Verlauf der vom Siebgut auf den Geber ausgeübten Normalkraft registriert werden. Die mit dieser Meßeinrichtung erhaltenen Ergebnisse sind in **Bild 10** zusammengestellt.

Während der Übergang zur ungleichmäßigen Bewegung bei einer punktförmig gedachten Masse für die vorliegende Siebbewegung bei $K_V = 3,45$ liegt (s. a. Bild 3), ist sie bei dem untersuchten Siebgut (Erde) für eine Amplitude von 31 mm bereits bei etwa $K_V = 2$ erreicht. Die ungleichmäßige Wurfbewegung setzt ein, sobald bei $K_V > 2$ der gemessene Ablösephasenwinkel (schwarze Meßpunkte) den theoretisch sich ergebenden Ablösephasenwinkel (ausgezogene Kurve) überschreitet. Bei $K_V = 3$ z. B. stimmen die Phasenlagen für Ablösung und Aufprall des zweiten Wurfes mit den entsprechenden des ersten Wurfes nicht mehr überein.

Tafel 1. Siebversuche. Einfluß der Bodenfeuchtigkeit bzw. der Schichthöhe auf den Aufprallphasenwinkel bei gleicher Siebkennziffer.

Versuchs-Nr.	Kennziffer K_V	Siebdurchgangsleistung D in $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ bei		Differenz*) der gemessenen Phasenwinkel φ_A beim Aufprall in Grad	
		kleinerer Schichthöhe	größerer Schichthöhe	1. Wurf	2. Wurf
47	1,40	53,4			
31	1,31		31,5	+ 17,1	+ 11,3
54	2,00	65,4			
76	1,97		53,5	+ 5,1	- 4,5
48	2,05	56,8			
33	2,08		26,5	+ 36,0	- 14,1
78	2,10	47,6			
33	2,08		26,5	+ 21,6	- 27,2
55	2,48	67,2			
34	2,50		27,8	+ 35,4	- 51,7
49	2,56	70,3			
39	2,55		53,7	+ 37,8	+ 3,7
50	2,90	62,1			
35	3,10		32,8	+ 30,6	- 53,6
79	3,25	70,7			
74	3,25		50,9	-	+ 12,2
56	3,26	91,2			
74	3,25		50,9	Wurf über 1 Periode	2 Perioden
57	4,09	102,1			
37	4,09		69,5	Wurf über 1 Periode	2 Perioden
46	4,27	107,7			
73	4,26		55,3	-	+ 29,7

*) Aufprall bei größerer Schichthöhe;
+ später als bei kleinerer Schichthöhe,
- früher als bei kleinerer Schichthöhe.

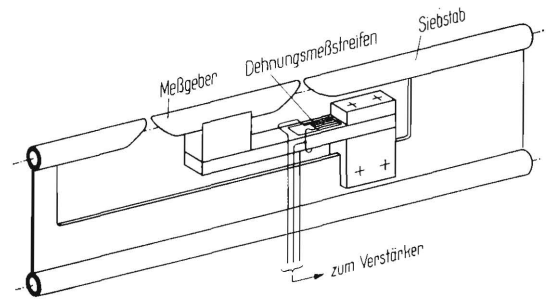


Bild 9. Elektronischer Meßgeber mit Dehnungsmeßstreifen zur Messung der Normalkraft und zur Erfassung der Ablöse- und Aufprallphase des Schüttgutes auf dem Schwingensieb. Anordnung des Meßgliedes im Siebrost siehe Bild 8.

Ähnliche Verhältnisse sind beim Übergang vom Einfachwurf zum Doppelwurf festzustellen. Insbesondere ist zu erkennen, daß bei der Ablösung der Phasenwinkel $\varphi = 90^\circ$ bzw. $(360 + 90^\circ)$ zum Teil wesentlich überschritten wird. Diese Erscheinung kann nur durch den Einfluß des stark verzögerten Aufprallvorganges der verschiedenen Siebgutschichten erklärt werden. Die große Phasendifferenz zwischen dem Aufprall nach dem ersten Wurf und der Ablösung zum zweiten Wurf bei K_V -Werten, bei welchen eine ungleichmäßige Wurffolge vorliegt, läßt auf eine erhebliche Auflockerung des Siebgutes in diesem Bereich schließen.

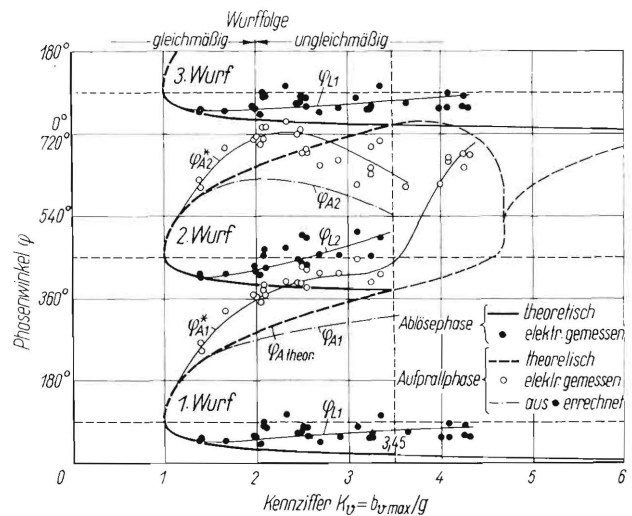


Bild 10. Verlauf der Ablöse- und Aufprallphase in Abhängigkeit von der Siebkennziffer bei der Wurfbewegung einer bestimmten Menge Erde auf einem Parallelschwingensieb. Die theoretischen, für eine punktförmige Masse sich ergebenden Kurven sind dieselben wie in Bild 3.

Zugeführte Siebgutmenge $A = 40$ bis 45 kg/s
Feuchtigkeit der Erde 17 bis 10 Gew.-%
(bezogen auf die Trockensubstanz)
Siebamplitude $a = 31 \text{ mm}$
Schwingenneigung $\alpha = 40^\circ$
Siebneigung $\beta = 15^\circ$

Auf Grund der während der Versuche aufgetretenen Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes stellten sich bei den einzelnen Messungen verschiedene Absiebleistungen ein, die auch eine Veränderung der Schichthöhe zur Folge hatten. Da aber die Wurfbewegung von der Schichthöhe beeinflusst wird, streuen nach Bild 10 die Ablöse- und Aufprallwerte. Diese Zusammenhänge gehen auch aus **Tafel 1** hervor, in welcher für jeweils zwei gleiche bzw. nahezu gleiche Kennziffern, aber verschiedene Bodenfeuchtigkeit und Schichthöhe die spezifischen Siebleistungen D und die Differenz der Phasenwinkel beim Aufprall eingetragen sind. Die Zahlenwerte in der Tafel bestätigen, daß der Aufprall nach dem ersten Wurf bei der größeren Schichthöhe später stattfinden muß als bei der kleineren Schichthöhe. Im Bereich der gleichmäßigen Wurffolge $K_V < 2$ trifft das Siebgut

auch nach dem zweiten Wurf später auf, bei ungleichmäßigem Wurf jedoch früher. Im Übergangsbereich zum Wurf über zwei Perioden bewirkt eine kleine Schichthöhe noch einen Wurf in jeder Periode, bei größerer Schichthöhe erfolgt der Aufprall dagegen erst nach zwei Schwingungsperioden. Beim reinen Doppelwurf (zwei Perioden) ruft eine Vergrößerung der Schichthöhe wieder einen späteren Aufprall hervor.

Trotz der relativ hohen Empfindlichkeit der elektronischen Geber stellen die gemessenen Aufprallwerte aber nicht die wirklichen Aufprallverhältnisse dar. Das beweisen die Ergebnisse bei der Siebkennziffer $K_v < 2,4$. Die gegenüber der Theorie später eintretende Ablösung in diesen Bereichen müßte eigentlich einen Aufprall zur Folge haben, der vor dem theoretischen Wert stattfindet. Die Meßwerte liegen aber später. Das elektronische Meßverfahren gibt somit einen vom wirklichen Aufprall etwas abweichenden Wert. Dies zeigt sich vor allem dann, wenn man die gemessenen Ablösephasen φ_L in Gl. (10) einsetzt und daraus die Aufprallphasen φ_A berechnet. In Bild 10 sind die aus den gemessenen und gemittelten Ablösephasen errechneten Aufprallwerte durch die strichpunktierte Kurve angegeben. Durch diese Kurve wird die Phase gekennzeichnet, bei welcher die unterste Siebgutschicht am Ende eines Wurfes gerade das Sieb berührt. Der Verlauf dieser Kurve bestätigt die Annahme, daß nach einer späteren Ablösung der Wurf kürzer verlaufen muß. Der Einfluß der Bewegung in den höher liegenden Haufwerkschichten auf die unterste Schicht konnte jedoch mit dem elektrischen Meßverfahren nicht erfaßt werden.

Die einzige Möglichkeit, ein umfassendes Bild über die gesamte Bewegung des Siebgutes zu erhalten, war der Einsatz einer Filmkamera mit hoher Bildfrequenz. Die Siebgutbewegung wurde zu diesem Zwecke von der Seite durch eine Plexiglaswand des Siebkastens aus einer Entfernung von etwa 2 m mit einer Filmkamera (Bildfrequenz 80 Bilder/s) aufgenommen. Um den Bewegungsablauf der einzelnen Schichten auswerten zu können, war es notwendig, der Erde etwas weißen Kies mit einer Korngröße von 4 bis 5 mm zuzusetzen. Zur Auswertung der Filmaufnahmen wurde die Lage der einzelnen sichtbaren Kieskörner in verschiedenen Schichthöhen sowie die Stellung eines mitgefilmten Phasenanzeigers über mehrere Schwingungsperioden aufgenommen und auf Transparentpapier übertragen. Auf diese Weise erhielt man zunächst die Bahnkurven der einzelnen Körner, Bild 11, wobei jedem Meßpunkt eine bestimmte Phase zugeordnet war. Diese Darstellung des Bewegungsablaufes in Form der Bahnkurven erlaubte bereits eine gute Beurteilung des Wurfvorganges.

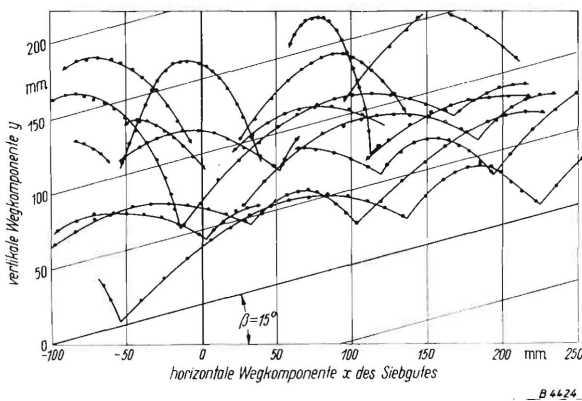
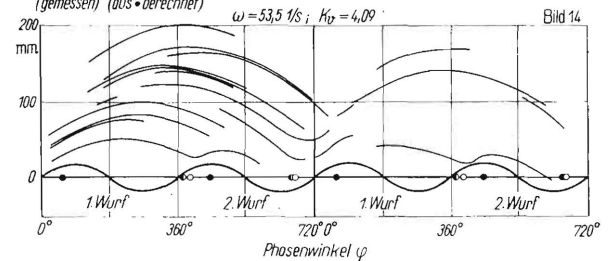
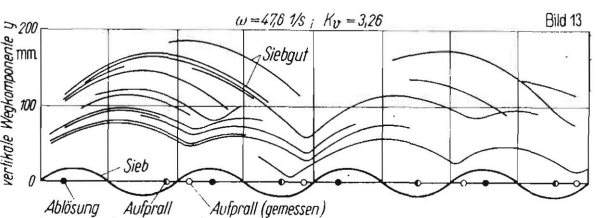
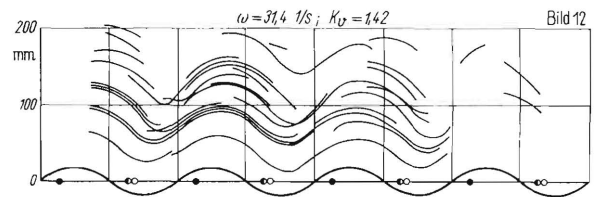


Bild 11. Wurfbewegung von Erde auf einem schwingenden Siebrost. Die Bahnkurven wurden durch Filmaufnahmen (Bildfrequenz 80 Bilder/s) ermittelt.

$K_v = 3,26$ $a = 31$ mm $\omega = 47,6$ 1/s

Noch deutlicher treten diese Zusammenhänge in Erscheinung, wenn man die y -Komponente der Siebgutbewegung über dem jeweiligen Phasenwinkel der Siebgutbewegung aufträgt. In den **Bildern 12 bis 14** ist dies für drei verschiedene K_v -Werte geschehen. Gleichzeitig sind in die Diagramme die y -Komponente des Siebes sowie die elektrisch gemessenen Ablöse- und Aufprallphasenwerte eingetragen.

Bei der kleinen Siebbeschleunigung $b_{vmax} = 1,42$ g ($K_v = 1,42$) in Bild 12 führt das Siebgut in vertikaler Richtung bis in die obersten Schichten eine vollkommen gleichmäßige Wurfbewegung aus. Der Aufprall tritt jedoch bei den einzelnen Schichten nach oben hin immer später ein, da sich das Gut während des Wurfes auflockert. Stellt man sich die Wendepunkte im abfallenden Bereich der einzelnen Kurven miteinander verbunden vor, dann kann man den zeitlichen Verlauf des gesamten Aufprallvorganges erkennen. Diese gedachte Verbindungslinie endet auf der Nullachse bei dem Phasenwinkel, der sich rechnerisch aus dem gemessenen Ablösephasenwinkel als der wirkliche Aufprallzeitpunkt ergibt. Erst nach dem Auftreffen einer größeren Siebgutmengen reicht die Normalkraft für die elektrische Bestimmung des Aufpralls aus. Die Ablösung tritt erst dann ein, wenn alle Schichten aufgeprallt sind. Daß in den einzelnen Schichten die Vertikalgeschwindigkeit und damit die Auflockerung zunimmt, erkennt man aus der mit der Höhe größer werdenden Steigung der Kurven bei demselben Phasenwinkel.



Bilder 12 bis 14. Vertikalkomponente der Bahnkurven nach Bild 11 in Abhängigkeit vom Phasenwinkel φ der Antriebswelle für drei verschiedene Siebkennziffern.

$a = 31$ mm

Ein vollkommen anderes Bild ergibt sich bei einer höheren Kennziffer $K_v = 3,26$ in Bild 13. Das Siebgut der untersten Schicht trifft nach dem ersten Wurf in einer Phasenlage auf, bei welcher die Siebgeschwindigkeit im Gegensatz zu Bild 12 wesentlich größer und der Siebgutgeschwindigkeit entgegen gerichtet ist. Der harte Aufprall hat eine höhere Rückfederung des Gutes zur Folge, so daß dieses mehr aufgelockert wird. Die nächsthöheren Schichten treffen somit später auf, in den oberen Schichten sogar erst nach zwei Schwingungsperioden. Die Ablösung zum zweiten Wurf tritt erst dann ein, wenn der größte Teil des Siebgutes aufgeprallt ist. Die Siebgeschwindigkeit ist dann aber wieder kleiner und der zweite Wurf infolgedessen kürzer. Auch hier stehen die elektronisch gemessenen Werte in gutem Einklang mit den Filmaufnahmen.

Je höher die Kennziffer, d. h. bei konstanter Amplitude die Siebfrequenz, ist, desto größer wird die Phasenverschiebung beim Aufprall und um so mehr macht diese sich in Siebnähe bemerkbar. Bei der Kennziffer $K_v = 4,09$, Bild 14, führt nur noch die unterste Schicht einen Wechselwurf aus.

Wie auch die Filmaufnahmen zeigen, kann das Siebgut als ein Mehrmassensystem betrachtet werden, das bei hoher Dämpfung

und relativ geringen elastischen Eigenschaften unter dem Einfluß einer vertikal schwingenden Unterlage Koppelschwingungen ausführt. Da zwischen den einzelnen Massen sowie zwischen der unteren Haufwerkschicht und der Unterlage im wesentlichen nur eine kraftschlüssige Verbindung besteht, werden diese Schwingungen von Wurfbewegungen überlagert. Die Phasenverschiebung und die Amplitudenverzerrung zwischen der Erregerschwingung und den Koppelschwingungen in den verschiedenen Schichten hängen nach den Schwingungsgesetzen einerseits von der Amplitude und Frequenz der Erregerschwingung, andererseits von der Größe der angeregten Massen und der zwischen diesen wirkenden elastischen und dämpfenden Verbindung ab. Je stärker die Dämpfung und je größer die Schichthöhe gegenüber der Erregeramplitude ist, desto weniger wird sich die Erregerschwingung auf die oberen Schichten auswirken. In extremen Fällen bleibt der obere Teil des Haufwerks nahezu in Ruhe, und der ganze Energieaustausch spielt sich nur in den unteren Schichten ab.

Diese Erscheinungen sind für die Beurteilung des Absiebvorganges bei Haufwerken mit großer Schichthöhe sehr wesentlich, weil durch sie die Wurfbewegung, und damit die Auflockerung, sowie die Aufprallgeschwindigkeit und der Energieaustausch beim Aufprall, stark beeinflußt werden.

3. Der Absiebvorgang bei Erde

Bei der Absiebung des aufgenommenen Erddammes in Kartoffelerntemaschinen beträgt der Anteil der abzusiebenden Erde etwa 95 Vol.-% des gesamten Siebgutes. Es kommt dabei weniger auf eine gute Entmischung, als auf eine hohe Durchsatzleistung an. Diese hängt im wesentlichen von dem Bewegungszustand zwischen Sieb und Siebgut in der Berührungszone ab, ferner von der Breite, der Form und dem Abstand der Siebstäbe und von der Dichte, der Korngröße und Kornform sowie der Kohäsion und inneren Reibung des Siebgutes.

Unter dem Einfluß der Reibung baut sich nach dem Aufprall der Erde auf dem Siebrost über benachbarten Siebstäben ein Gewölbe auf, welches die Durchgangsöffnung verschließt und den Absiebvorgang für den betreffenden Wurf beendet. Je größer die Relativgeschwindigkeit Av_A zwischen dem Sieb und den unteren Erdteilen ist, desto größer ist ihre Energie und um so länger ist die Zeitdauer t_d zwischen Aufprall und Gewölbebildung. In erster Annäherung läßt sich nun die pro Aufprall abgesiebte Menge D_A , die mit der Dichte ρ_A während der Zeit t_d des Aufpralls mit einer mittleren Relativgeschwindigkeit Av_A durch den freien Siebquerschnitt F_d strömt, durch folgende (auf die gesamte Siebfläche F bezogene) Gleichung ausdrücken:

$$D_A = \rho_A Av_A t_d \frac{F_d}{F} \text{ kg/m}^2 \dots \dots \dots (18).$$

Wie bereits weiter oben beschrieben, kann die Wurfbewegung in jeder Schwingung entweder gleichartig verlaufen, oder es tritt nach einem langen Wurf ein kürzerer auf, dem unter Umständen sogar noch ein dritter (noch kürzerer) Wurf folgen kann. Auch Würfe über eine oder mehrere Schwingungsperioden sind möglich. Während n Schwingungsperioden mögen nun k verschiedenartige Würfe erfolgen, bei welchen sich jeweils andere Durchsatzwerte D_A ergeben. Nach n Schwingungen beträgt die Menge des abgesiebten Gutes

$$D_{An} = \sum_{i=1}^k D_{Ai} \dots \dots \dots (19).$$

Mit der Siebfrequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ist dann die pro Zeit- und Flächeneinheit abgesiebte Menge

$$D = \frac{\omega}{2\pi n} \sum_{i=1}^k D_{Ai} \text{ kg/m}^2 \text{ s} \dots \dots \dots (20).$$

Die Durchgangszeit und die Dichte werden in erster Linie durch die physikalischen Eigenschaften des Gutes bestimmt. Da sich diese jedoch während des Wurfvorganges ändern, sind sie zahlenmäßig schwer zu erfassen, so daß eine Vorausberechnung der Siebdurchgangsleistung nicht möglich ist.

Praktische Versuche haben gezeigt, daß die Siebdurchgangsleistung durch Verringerung der Schichthöhe verbessert werden kann. Eine Erhöhung der Siebfrequenz wirkte sich auch nur bei kleinen Schichthöhen positiv auf das Absiebergergebnis aus.

Die funktionelle Verknüpfung der für den Bewegungsablauf und für die Absiebung von Erde maßgebenden Einflußgrößen kann man nun folgendermaßen zusammenfassen: Die Wurfbewegung wird in erster Linie durch die Größe der Siebkennziffer K_V und der Schwingungsamplitude a , d. h. durch den Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsablauf des Siebes bestimmt, da sich hieraus im wesentlichen der Ablösezeitpunkt t_L und die Abwurfgeschwindigkeit des Gutes ergeben. Von diesen beiden Werten hängt der Aufprallzeitpunkt t_A ab, bei welchem zwischen Siebgut und Sieb die Relativgeschwindigkeit Av_A herrscht. Von dem Betrag und der Richtung dieser Geschwindigkeit sowie von der Dichte ρ_A des auftreffenden Siebgutes hängen nun die Kohäsions-, Reibungs- und elastischen Kräfte ab, die schließlich zur Bildung eines Gewölbes über den Sieböffnungen führen und den Absiebvorgang nach der Zeit t_d beenden. Nach Rückgang der durch den Aufprall ausgelösten Kräfte zwischen Siebgut und Sieb lockert sich das Gut auf Grund der elastischen Rückverformung mit einer gewissen Rückprallgeschwindigkeit auf, deren Größe aber ebenfalls durch Kohäsion und Reibung beeinflußt wird. Da sich bereits vor dem Ablösezeitpunkt die Auflockerung einstellt, ist die Abwurfgeschwindigkeit der einzelnen Siebgutschichten um die Auflockerungsgeschwindigkeit größer als die Siebgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_L . Berücksichtigt man ferner, daß das Siebgut während des Kraftschlusses mit dem Sieb auch parallel zu diesem eine Geschwindigkeit beibehält, deren Betrag unter dem Einfluß der Reibungskraft schwankt und in der Regel bei der Ablösung einen gegenüber der Siebgeschwindigkeit beachtlichen Wert annehmen kann, dann ergeben sich auch für die Abwurfgeschwindigkeit zum Teil starke Abweichungen von dem theoretischen Wert. Diese veränderten Abwurfbedingungen wirken sich unmittelbar auf die Vorgänge beim Aufprall aus.

4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Bewegung eines Haufwerks auf einem schwingenden Siebrost mit der für eine punktförmig gedachten Masse geltenden Wurftheorie allein nicht ausreichend erklärt werden kann, da der Aufprall nicht mehr in sehr kurzer Zeit, sondern während einer größeren Zeitspanne abläuft. Fällt der theoretische Ablösezeitpunkt, bei welchem die vertikal gerichtete Siebbeschleunigung die Erdbeschleunigung aufhebt, in den Aufprallzeitraum, dann tritt die Ablösung der untersten Haufwerkschicht erst dann ein, wenn die Summe aller normal zur Siebebene gerichteten Kräfte zwischen Siebgut und Sieb zu Null geworden sind. Bei einer späteren Ablösung wird das Gut jedoch mit geringerer Geschwindigkeit abgeworfen, und die Wurfdauer ist somit kürzer, als unter den theoretischen Ablöseverhältnissen einer punktförmigen Masse zu erwarten wäre. Die Bewegung der untersten Siebgutschichten hängt somit unmittelbar von dem Verhalten der darüberliegenden Schichten ab.

Sobald das Siebgut bei der Einwirkung einer äußeren Kraft, wie sie z. B. vom Aufprall am Ende einer Wurfbewegung ausgelöst wird, plastische und elastische Formänderungen aufweist, nimmt die Aufprallgeschwindigkeit gegenüber den gerechneten Werten ab. Demzufolge stellt sich auch ein geringerer Trenneffekt ein. Die Berechnung der Wurfbewegung für die Einzelmasse ergibt somit immer die günstigsten Werte, die im praktischen Fall um so eher erreicht werden, je geringer die Dämpfung und die Federung, d. h. die Schichthöhe des Gutes ist.

Die relative Aufprallgeschwindigkeit ist dann am größten, wenn die Wurfdauer gerade so groß ist wie eine Schwingungsperiode. Dieser Bewegungszustand hängt aber lediglich von der Kennziffer, d. h. vom Beschleunigungsverhältnis und von der Schichthöhe des Gutes ab. Für die Bewegung einer Einzelmasse läßt sich nun der Bestwert der Kennziffer in jedem Fall errechnen. Mit zunehmender Schichthöhe tritt aber das optimale Wurfverhalten bei immer kleineren Kennziffern auf. Die Folge davon ist,

daß sowohl die Anzahl der Würfe je Zeiteinheit als auch die relative Aufprallgeschwindigkeit kleiner werden. Es sollte daher die Schichthöhe des Siebgutes möglichst klein gehalten werden. Dies ließe sich am einfachsten durch Herabsetzen der aufgegebenen Siebgutmenge erreichen, doch ist dieser Weg aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in den seltensten Fällen begehbar. Eine andere Möglichkeit, die Schichthöhe zu verringern, besteht in der Erhöhung der Fördergeschwindigkeit des Gutes durch einen kleineren Schwingenneigungswinkel oder durch flachere oder abwärts geneigte Siebstellung. Da jedoch hierdurch die relative Aufprallgeschwindigkeit und damit die Energie beim Aufprall kleiner wird, wird diese Lösung die Siebleistung stark beeinträchtigen. Vorteilhafter ist darum die Ausrüstung der Sieboberfläche mit sägezahnähnlichen Aufsätzen, die die Fördergeschwindigkeit erhöhen und das Siebgut zusätzlich zerkleinern. Eine geringere Schichthöhe erreicht man ferner durch ein Verbreitern des Siebes. Dies führt allerdings nur dann zum Ziel, wenn das Siebgut über die ganze Siebbreite gleichmäßig aufgegeben wird.

Die Wurfbewegung des Gutes wird von seiten des Siebes durch die Frequenz, die Amplitude, den Schwingenneigungswinkel und den Siebneigungswinkel bedingt. Alle diese Größen sind in der Kennziffer enthalten. Will man die optimale Kennziffer einhalten, bei welcher die Wurfdauer gleich der Schwingungsdauer ist, dann kann die Siebgutbewegung und damit auch die Siebleistung durch Verändern der Siebeinstellungen beeinflusst werden. An Hand der **Tafel 2** sollen diese Zusammenhänge näher erläutert werden. Mit Hilfe der Tendenzangaben kann man der Tafel 2 entnehmen, wie die Aufprallgeschwindigkeit, die Wurfbzahl und die Fördergeschwindigkeit durch eine Veränderung der Siebeinstelltdaten beeinflusst werden. Durch Einsetzen der umgekehrten Tendenzen in den Spalten 1 bis 5 ergeben sich auch umgekehrte Tendenzen in den Spalten 6 bis 8. Wie stark sich die einzelnen Einstellgrößen auf die Bewegungsverhältnisse des Gutes auswirken, hängt in erster Linie vom mathematischen Aufbau der Siebkennziffer, d. h. vom jeweils vorliegenden Bewegungsgesetz, ab.

Tafel 2. Einfluß der Siebeinstellung auf die Siebgutbewegung.

Kennziffer	Siebeinstellung				Siebgutbewegung		
	Frequenz	Amplitude	Schwingenneigungswinkel	Siebneigungswinkel	Aufprallgeschwindigkeit normal zum Sieb	Wurfbzahl	Fördergeschwindigkeit
K_v	f	a	α	β			
1	2	3	4	5	6	7	8
konstant	steigt	fällt	konstant	konstant	fällt	steigt	fällt
	steigt	konstant	fällt	konstant	fällt	steigt	steigt
	steigt	konstant	konstant	steigt	steigt	steigt	konstant
	konstant	steigt	fällt	konstant	steigt	steigt	steigt
konstant	konstant	steigt	konstant	steigt	steigt	konstant	fällt
konstant	konstant	konstant	steigt	steigt	steigt	konstant	fällt

Zur Erreichung einer optimalen Siebleistung muß zunächst die Siebkennziffer so gewählt werden, daß die Wurfdauer mit der Schwingungsdauer des Siebes übereinstimmt, wobei die Schichthöhe des Gutes auf ein Minimum reduziert werden sollte. Unter Einhaltung dieser Kennziffer können dann durch Veränderung der Einstelltdaten die Aufprallgeschwindigkeit und die Wurfbzahl gesteigert werden. Mit Rücksicht auf die Schichthöhe darf die Fördergeschwindigkeit des Gutes jedoch nicht zu sehr durch diese Maßnahmen beeinträchtigt werden.

Aus diesen Betrachtungen kann geschlossen werden, daß man für ein Schwingsieb nicht generell optimale Einstelltdaten festlegen kann, da eine Vielzahl von Einflußgrößen das Verhalten des jeweils zu verarbeitenden Siebgutes verändert. Auf Grund theoretischer Überlegungen und meßtechnischer Untersuchungen der Bewegungsvorgänge konnte aber nachgewiesen werden, daß der Bereich, in welchem die günstigsten Einstelltdaten liegen, sehr begrenzt ist.

Schrifttum

- [1] Baader, W.: Untersuchungen über das Verhalten eines Haufwerks großer Schichthöhe auf einem schwingenden Siebrost. Diss. TH Braunschweig, 1960.
- [2] Bachmann, D.: Bewegungsvorgänge in Schwingmühlen mit trockener Mahlkörperfüllung. Verfahrenstechnik Z. VDI-Beiheft (1940) S. 43/55.
- [3] Baganz, K.: Laborversuche über Erdabsiebung auf schwingenden Siebrosten. Diss. Humboldt-Universität Berlin 1957.
- [4] Batel, W.: Neue Erkenntnisse über Siebvorgänge. Z. VDI 97 (1955) S. 393/424.
- [5] Berry, P. E.: Basic theory of low-acceleration oscillating conveyers. J. agric. Engng. Res. 4 (1959) S. 204/13.
- [6] Böttcher, S.: Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen. Fördern und Heben 8 (1958) S. 127/31, S. 235/39, S. 307/15.
- [7] Decker, O., und H. J. Macder: Technologische und schwingungstechnische Betrachtungen zum Siebvorgang. Firmendruckschrift Humboldt, Köln 1952.
- [8] Klockhaus, W.: Fördergeschwindigkeit von Schwingrinnen und Schwingsieben. Erdöl und Kohle 5 (1952) S. 493/95.
- [9] Kluge, W.: Neuzeitliche Siebmaschinen für die Aufbereitung. Erdöl und Kohle 5 (1952) S. 705/11.
- [10] Letoschnew: Landmaschinen. Theorie, Berechnung, Projektierung und Prüfung. Moskau 1956.