

Technisch-physikalische Grundlagen der Kornvereinzelung bei Einzelkornsämaschinen

Von Gerhard Thalmann und Wilfried Andrä, Jena*)

DK 631.331.85

Die Kenntnis der technisch-physikalischen Zusammenhänge bei der Kornvereinzelung im Sämechanismus von Einzelkornsämaschinen bildet die Voraussetzung zur zweckmäßigen Gestaltung der entsprechenden Arbeitsorgane.

Insbesondere bei der Kornvereinzelung auf pneumatischem Wege ist auch im Hinblick auf den wachsenden Anwendungsumfang derartiger Maschinen die theoretische Beschreibung der technischen Abläufe von Bedeutung.

Im folgenden wird auf bereits bekannte und neuere Erkenntnisse zur genannten Problematik eingegangen.

1. Einleitung

Einzelkornsämaschinen sind entsprechend ihrem spezifischen Verwendungszweck Spezialdrillmaschinen, deren besondere Eigenart in der Einzelführung der Saatkörner und der damit verbundenen Präzision der Standraumzumessung bei der Saat liegt.

Im Sämechanismus von Einzelkornsämaschinen laufen unterschiedliche Arbeitsphasen ab, die sich in ihrer zeitlichen Abfolge in

- Kornvereinzelung,
- Kornförderung und
- Kornabgabe

gliedern lassen [1].

Die Hauptforderung für die erste Arbeitsphase als Primärfunktion einer Einzelkornsämaschine besteht in der Erzeugung einer kontinuierlichen Folge von einzelnen Saatkörnern. Die dabei zu erreichenden Kornfolgefrequenzen f_K von bis zu 50 s^{-1} , in Abhängigkeit von der Arbeitsgeschwindigkeit v_A und dem Kornablageabstand b ($f_K = v_A/b$), belegen den hohen Anspruch bei der technischen Realisierung.

Ziel der dargestellten Untersuchungen war es, einen Beitrag zum besseren Verständnis des komplizierten Vorganges der Kornvereinzelung bei Verwendung mechanischer und pneumatischer Funktionsprinzipien zu leisten.

2. Zur Theorie der Kornvereinzelung

2.1 Analyse des Erkenntnisstandes

Die Kornvereinzelung in der Einzelkornsämaschine beinhaltet das Herauslösen von Einzelkörnern oder Korngruppen aus der Menge des als Haufwerk vorliegenden Saatgutvorrates.

Dabei kommen für das Zusammenwirken von Vereinzelungsorgan und Saatgut, je nach Art der benutzten Kraftwirkung, mechanische oder pneumatische Funktionsprinzipien zur Anwendung, Bild 1.

*) Dr. agr. G. Thalmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg (Direktor: Prof. Dr. sc. P. Kundler) der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Bereich Jena; Prof. Dr. sc. nat. W. Andrä ist wissenschaftlicher Mitarbeiter i.R. im Physikalisch-Technischen Institut der Akademie der Wissenschaften der DDR, Jena.

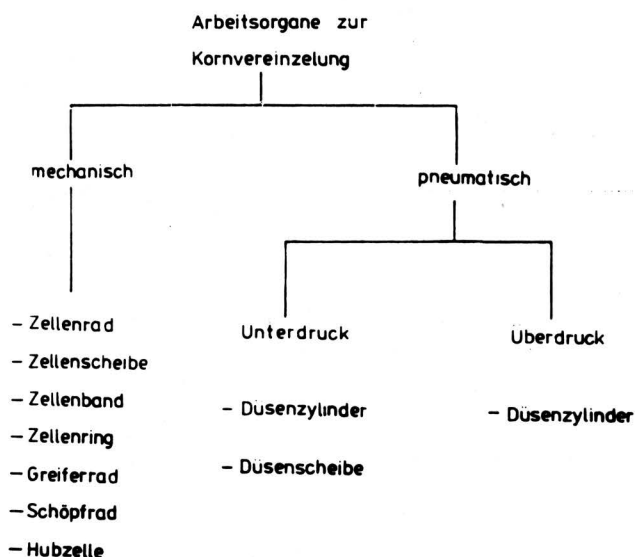


Bild 1. Systematik technischer Lösungen zur Kornvereinzelung; nach Thalmann [2].

Beim mechanischen Funktionsprinzip dominieren die sogenannten Zellensysteme. Durch Relativbewegungen zwischen Vereinzelungsorgan und dem aufliegenden Saatgut kommt es unter Einwirkung von resultierenden Füllkräften F_F zum Einfallen von Einzelkörnern in durchgängige (Zellenband, -scheibe, -ring) oder kegelförmig auslaufende Bohrungen (Zellenrad). Die bei diesem Vorgang auf ein Einzelkorn wirkenden Kräfte sind in Bild 2 am Beispiel des Zellenrad-Systems dargestellt.

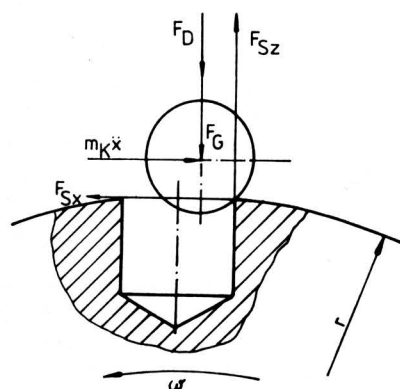


Bild 2. Auf ein Einzelkorn wirkende Kräfte in der Anfangsphase des Füllvorganges bei mechanischen Zellensystemen; nach Thalmann [3].

- F_D resultierende Druckkraft des Saatgutvorrats
- F_G Gewichtskraft des Einzelkorns
- $F_{S,x}$ Stoßkraft in x-Richtung
- $F_{S,z}$ Stoßkraft in z-Richtung
- $m_K \ddot{x}$ Trägheitskraft des Einzelkorns

Die Füllsicherheit wird in erster Linie durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Korn und Zellenöffnung, bestimmt durch den Betrag von ωr , und die Reibungsverhältnisse zwischen Saatgut und Arbeitsorgan beeinflusst. Das Saatgut kann je nach Fruchtart recht unterschiedlich gestaltet sein und in natürlicher oder pillierter Form vorliegen. Während sich einige natürliche Formen aufgrund ungünstiger Verhältnisse von Kornlänge, -breite und -dicke (Formfaktor) im Sämehandhabungsmechanismus nur schwer manipulieren lassen, werden durch Stoffanlagerung an die Saatkörner (Pillierung) wesentlich günstigere Bedingungen geschaffen. Die Mehrzahl der Autoren gibt für Zellenrad-Systeme, je nach verwendeter Saatgutart und -form, maximale Umfangsgeschwindigkeiten v_{Umax} im Bereich von 0,3–0,5 m/s an [2, 4, 5, 6].

Während bei den radial von außen füllenden Zellsystemen die Zentrifugalkraft mit

$$F_Z = m_K \omega^2 r \quad (1)$$

der Füllkraft entgegenwirkt und bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten begrenzend wird, kann bei radialer Innenbefüllung (Zellenring) dadurch der Betrag von F_F und damit die Füllsicherheit erhöht werden (v_{Umax} bis 2,0 m/s).

Fritsch [7] vergleicht den Füllvorgang bei Zellsystemen mit dem Siebvorgang bei Rundloch-Plansiebmaschinen, wobei das Vereinzelnorgan funktionell den Siebboden und der Saatgutvorrat das Siebgut darstellt. Da das Absieben von Korngrößenanteilen in der Reihenfolge zunehmender Siebschwierigkeiten abläuft, werden zuerst die Feinkornanteile und mit zunehmender Siebdauer die Grenzkornanteile abgeschieden, während Übergrößen als Siebrückstand verbleiben.

Aus diesem Zusammenhang läßt sich die Notwendigkeit der Kalibrierung des Saatgutes zur genauen Bemessung und Tolerierung der Passung zwischen Korn und Zelle ableiten, um Fehl- und Doppelbelegungen zu vermeiden. Das Kleinstspiel zwischen Korn und Zellenbohrung wird mit etwa 10 % des Kalibergrößtmaßes angegeben [8].

Im Zeitraum der letzten 20 Jahre hat die Herstellung von Einzelkornsämaschinen mit pneumatischem Funktionsprinzip stark zugenommen. Dabei wird zur Kornerfassung der statische bzw. dynamische Druck einer Saug- oder Druckluftströmung an einer Blende ausgenutzt.

Für entsprechende technische Lösungen führen einzelne Autoren folgende Vorteile an [9 bis 12]:

- geringere Anforderungen an die Saatgutkalibrierung
- größerer Stellbereich des Kornabstandes ohne Wechsel des Arbeitsorgans
- geringer Beschädigungsgrad der Saatkörner und
- höhere Fahrgeschwindigkeit.

Die Mehrzahl dieser Einzelkornsämaschinen arbeitet mit Saugluftströmungen, bei denen je nach Position der Saugbohrungen auf dem trommelförmigen, um die horizontale Achse rotierenden Arbeitsorgan eine radial oder axial gerichtete Kornankopplung erfolgt. Bei diesem dynamischen Vorgang müssen die Einzelkörner entgegen Reib- und Trägheitskräften aus dem Haufwerk entnommen und auf die Umfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden, Bild 3.

Im halbkugelförmigen Geschwindigkeitsfeld der Senkenströmung nimmt mit wachsender Entfernung r von der Saugbohrung die Luftgeschwindigkeit mit $1/r^2$ ab und läßt sich näherungsweise mit

$$v_L = Q/2\pi r^2 \quad (2)$$

berechnen.

Bei $\Delta p = 6$ kPa und $d_B = 1,5$ mm sinkt z.B. v_L von 70 m/s in der Saugbohrung in 2 mm Entfernung schon auf etwa 5 m/s ab [9]. Im Vergleich zu den Schwebegeschwindigkeiten einzelner Saatgutarten (bis zu 18 m/s) wird der geringe Wirkungsbereich der Senkenströmung für die Kornerfassung deutlich.

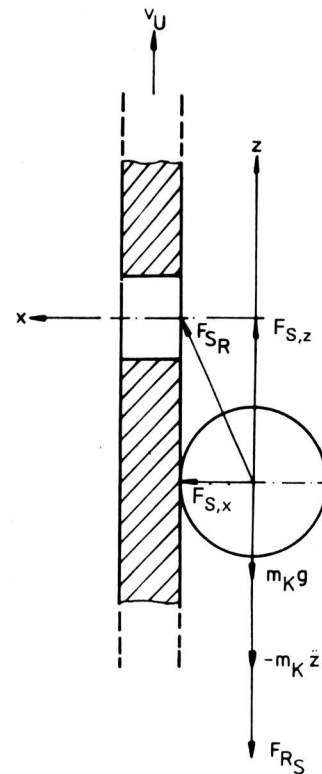


Bild 3. Schematische Darstellung der wichtigsten Kräfte, die bei pneumatischer, axial gerichteter Erfassung auf ein Einzelkorn wirken; Relativbewegung des Kornes in Richtung Saugbohrung wird angenommen.

- $F_{R,S}$ Reibkraft zwischen Korn und Säradoberfläche
- $F_{S,R}$ resultierende Saugkraft mit den Komponenten:
 - $F_{S,x}$ senkrecht zur Säradoberfläche
 - $F_{S,z}$ parallel zur Säradoberfläche
- $m_K g$ Gewichtskraft
- $m_K \ddot{z}$ Trägheitskraft des Einzelkorns
- v_U Umfangsgeschwindigkeit

Die Ansaugkraft F_S hängt von der Druckverteilung beim Umströmen des angesaugten Körpers ab und ist nach dem Stokesschen Gesetz der Luftgeschwindigkeit v_L proportional.

Während bei völliger Abdichtung der Saugbohrung durch das anliegende Saatkorn die Luftgeschwindigkeit null wird und eine rein statische Ansaugkraft mit

$$F_{S,stat} = \Delta p A_B \quad (3)$$

wirkt, stellt sich bei Annäherung eines Kornes dicht vor der Saugbohrung ein "dynamischer" Anteil von F_S ein, der aus einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit durch die Querschnittsverengung resultiert und die statische Ansaugkraft weit übertrifft.

Dadurch kann die zur gesicherten Kornerfassung notwendige Saugkraft, die nach Weller [9] das etwa 20fache des Korngewichts betragen sollte, erreicht werden.

2.2 Untersuchungen zur pneumatischen Kornvereinzelnung

Von den Verfassern wurden spezielle Untersuchungen zur Einzelkornfassung bei pneumatischen Unterdrucksystemen mit axial gerichteter Kornankopplung vorgenommen.

Ausgehend von den geometrischen Verhältnissen zwischen Korn und Saugbohrung, Bild 4, lassen sich die auf das Saatkorn wirkenden Kräfte bei senkrechter Bewegungsbahn einer Saugbohrung hinter dem Kornzentrum wie folgt bestimmen:

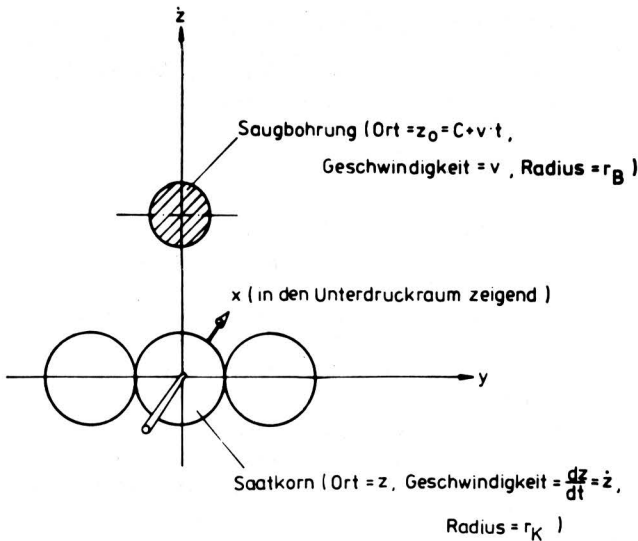


Bild 4. Koordinaten für die Analyse von Kräften und Bewegungen zwischen Korn und Saugbohrung; Bewegungsbahn der Saugbohrung als senkrechte Gerade angenähert.

1. z-Komponente von F_S $F_{S,z} = f_1(z - z_0)$
2. x-Komponente von F_S $F_{S,x} = f_2(z - z_0)$
3. Reibungskraft $-\text{sgn}(\dot{z}) \mu F_{S,x}$
4. Schwerkraft $-m_K g$

Die Kraft F_S , die auf das Korn in Richtung auf die Saugbohrung einwirkt, kann in zwei Komponenten zerlegt werden, die senkrecht bzw. parallel zur Scheibenoberfläche wirken. Während die parallele Komponente $F_{S,z}$ das Korn zur Saugbohrung hin beschleunigt, verursacht die dazu senkrechte Komponente $F_{S,x}$ eine Reibungskraft in z-Richtung, die stets der Relativbewegung zwischen Korn und Scheibe entgegengerichtet ist. Mit der Schwerkraft ($m_K g$) ergibt sich

$$m_K \ddot{z} = F_{S,z} - \text{sgn}(\dot{z}) \mu F_{S,x} - m_K g \quad (4)$$

Die x- und die z-Komponente der Saugkraft sind Funktionen des Abstandes zwischen dem Korn und der Saugbohrung, deren Mittelpunkt die Koordinate z_0 besitzt und die sich auf annähernd geradliniger Bahn mit $v = \text{const.}$ gemäß

$$z_0 = C + v(t - t_0) \quad (5)$$

bewegt, wobei C der Ort der Saugbohrung bei $t = t_0$ ist. Bei Kenntnis der Funktionen $F_{S,x}(z - z_0)$ und $F_{S,z}(z - z_0)$ ergibt sich aus den Gln. (4) und (5) eine Differentialgleichung, mit der die Kornbewegung $z(t)$ berechnet werden kann.

Die Anfangsbedingungen werden dabei zweckmäßigerweise so angenommen, daß sich zum Zeitpunkt $t = 0$ das Korn in der Ruhelage bei $z = 0$ befindet und die Saugbohrung in diesem Moment das Korn passiert:

$$t = 0; \quad z = 0; \quad C = 0.$$

Das Korn wird zur bewegten Saugbohrung beschleunigt, kann diese entweder erreichen und auf ihr zu Ruhe kommen (Normalbelegung) oder zurückfallen (Fehlbelegung).

Da im allgemeinen Gl. (4) bei komplizierten Funktionen $F_{S,x}$ und $F_{S,z}$ nicht analytisch gelöst werden kann, wird eine numerische Lösungsmethode angegeben, bei der die Differentiale durch kleine Differenzen ersetzt werden. Dabei wird dt durch $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ und $\ddot{z} = d\dot{z}/dt$ durch $\Delta\dot{z}/\Delta t$ ersetzt, wobei

$$\Delta\dot{z} = \dot{z}(t + \Delta t) - \dot{z}(t) = \dot{z}(t_{i+1}) - \dot{z}(t_i) \quad (6)$$

die Änderung der Geschwindigkeit nach einem kleinen Zeitintervall Δt ist.

Die Veränderung des Ortes wird näherungsweise mit

$$\Delta z = z(t + \Delta t) - z(t) = \dot{z}(t) \Delta t \quad (7)$$

ausgedrückt.

Wenn die rechte Seite von Gl. (4) mit $S(t)$ abgekürzt wird, erhält man

$$\dot{z}(t_{i+1}) = \dot{z}(t_i) + S(t_i) \Delta t / m_K \quad (8)$$

Beginnend mit $t_0 = 0$, $z(t_0) = 0$ und $\dot{z}(t_0) = 0$ kann damit schrittweise die zeitliche Veränderung von \dot{z} und z berechnet werden.

Unter den Bedingungen, daß sich das anzusaugende Korn in der oberen Kornlage des Haufwerkes befindet, die Saugbohrung hinter dem Kornzentrum anläuft, für das Maximum von $F_{S,x}$ ein völliger Abschluß der Bohrung angenommen und die auf das fixierte Korn wirkende Zentrifugalkraft vernachlässigt wird, ergibt sich der in Bild 5 dargestellte prinzipielle Verlauf von $F_{S,x}$ und $F_{S,z}$.

Für die Komponenten von F_S lassen sich folgende Eigenschaften ableiten:

1. $F_{S,z}$ ändert das Vorzeichen bei $z = z_0$
2. $F_{S,x}$ hat den größten Betrag bei $z = z_0$ mit $\pi r_B^2 \Delta p$
3. mit wachsendem $|z - z_0|$ nimmt $|F_{S,x}|$ ab
4. für größere Werte von $|z - z_0|$ nimmt $|F_{S,z}|$ ab.

Der dargestellte qualitative Verlauf von $F_{S,x}$ und $F_{S,z}$ konnte mit größer dimensionierten Funktionselementen im Experiment bestätigt werden.

Aus den aufgezeigten Zusammenhängen läßt sich folgern, daß die Wahrscheinlichkeit der gesicherten Kornerfassung in erster Linie von der Geschwindigkeit der Saugbohrung und der erzeugten Druckdifferenz abhängt. Beim Erreichen einer Grenzgeschwindigkeit ist die Saugkraft nicht mehr in der Lage, die Trägheitskraft, die das Korn zurückhält, zu überwinden. Mit zunehmender Reibung zwischen Haufwerk und Scheibe wird die Kornmitnahme (Vorbeschleunigung) und damit die Kornerfassung verbessert.

Bei Untersuchungen an einem entsprechenden Arbeitsorgan zur Kornvereinzelung mit Variation der Einflußgrößen Umfangsgeschwindigkeit, Druckdifferenz und Bohrungsdurchmesser konnten für die Fehl-, Doppel- und Normalbelegungen u.a. die in Bild 6 dargestellten Abhängigkeiten nachgewiesen werden.

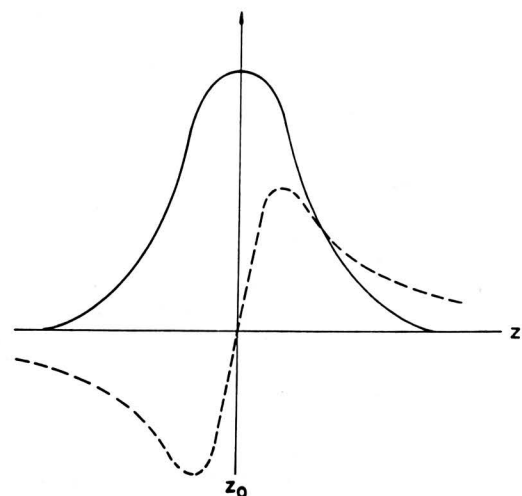


Bild 5. Schematische Darstellung des Verlaufes von $F_{S,x}$ (—) und $F_{S,z}$ (---) bei senkrechtem Durchgang einer Saugbohrung hinter dem Kornzentrum.

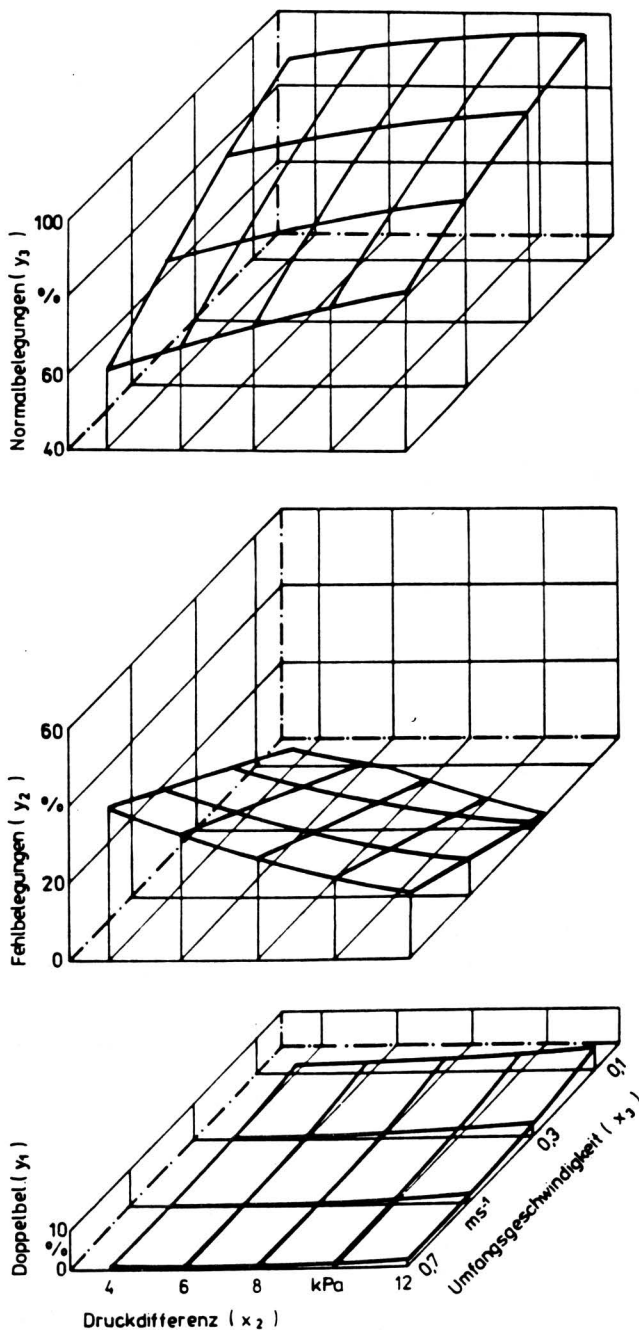


Bild 6. Normal-, Fehl- und Doppelbelegung in Abhängigkeit von der Druckdifferenz und der Umfangsgeschwindigkeit der Saugbohrungen; pilliertes Zuckerrübensaatgut, Kal.: 3,5–4,5 mm, $d_B = 2,5$ mm; nach *Thalmann* [3].

Es wird deutlich, daß mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit und abnehmender Druckdifferenz der Anteil an Fehlbelegungen anwächst, während sich der Doppelbelegungsanteil tendenziell gegenläufig verhält. Die daraus resultierenden Normalbelegungen weisen bei niedriger Umfangsgeschwindigkeit und hoher Druckdifferenz den größten Betrag auf.

Das vorgestellte Modell enthält starke Vereinfachungen, die grundsätzlich beseitigt werden können. So kann z.B. eine seitliche Versetzung der Saugbohrungsbahn gegenüber dem Korn in der mathematischen Beschreibung berücksichtigt werden. Die Kornbewegung erfolgt dann auch in der y , z -Ebene und wird zusätzlich durch zwei gekoppelte Differentialgleichungen analog Gl. (4) beschrieben. Ferner können Kräfte, mit denen das Korn im Hauf-

werk zurückgehalten wird, sowie die Kornmitführung im Haufwerk grundsätzlich in das Modell aufgenommen werden. Trotz des beträchtlichen mathematischen Aufwandes würden aber die o.g. Schlußfolgerungen nicht wesentlich verändert.

3. Zusammenfassung

Der Vorgang der Kornvereinzelung in Einzelkornsämaschinen stellt hohe technische Anforderungen an das betreffende Arbeitsorgan und bestimmt maßgeblich die Qualität der nachfolgenden Arbeitsphasen im Sämechanismus. Zum Abtrennen von Einzelkörnern aus dem als Haufwerk vorliegenden Saatgutvorrat kommen mechanische und pneumatische Funktionsprinzipien zur Anwendung.

Bei den mechanischen Vereinzelungselementen herrschen die Zellsysteme vor, die eine exakte Passung zwischen Korn und Zellenbohrung und damit eine Kalibrierung des zu verarbeitenden Saatgutes erfordern.

Die Kornerfassung bei pneumatischen Systemen basiert auf der Wirkung von statischem bzw. dynamischem Druck von Saug- oder Druckluftströmungen. Dieser Vorgang wird im vorliegenden Beitrag näherungsweise mathematisch beschrieben. Die theoretisch abgeleiteten Zusammenhänge konnten in entsprechenden experimentellen Untersuchungen bestätigt werden.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Thalmann, G. u. P. Jakob*: Analyse der Arbeitsphasen im Sämechanismus von Einzelkornsämaschinen im Hinblick auf die konzeptionelle Gestaltung einer Maschine zur Mehrfachnutzung. agrartechnik (Berlin) Bd. 37 (1987) Nr. 5, S. 228/31.
- [2] *Thalmann, G.*: Systematik und Gestaltung der Arbeitsphasen einer Einzelkornsämaschine. agrartechnik (Berlin) Bd. 33 (1983) Nr. 1, S. 8/10.
- [3] *Thalmann, G.*: Analyse der Arbeitsphasen im Sämechanismus von Einzelkornsämaschinen (EKS) im Hinblick auf das Vorzugsprinzip für eine Maschine der 3. Generation. Diss. A, Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 1985.
- [4] *Kühnberg, L.*: Zur Verbesserung der Ablagegenauigkeit von Einzelkornsämaschinen. Arch. f. Landtechnik (Berlin) Bd. 7 (1967) Nr. 3, S. 210/33.
- [5] • *Fritsch, K.*: Maschinen zum Säen und Pflanzen. In: *Heyde/Kühn* (Hrsg.): Landmaschinenlehre Bd. 2. Berlin: VEB Verlag Technik, 1982.
- [6] *Brinkmann, W.*: Einfluß der Sätechnik auf die Qualität der Zuckerrübe. Die Zuckerrübe Bd. 33 (1984) Nr. 3, S. 173.
- [7] *Fritsch, K.*: Zur technischen Aufbereitung des Saatgutes von Beta-Rüben für die Einzelkornsäat. Habil.-Schrift, Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 1966.
- [8] *Huizing, A.J.*: Das Messen von Zellen in Zellenrädern von Einzelkornsämaschinen. Landtechn. Forschung Bd. 16 (1966) Nr. 2, S. 29/32.
- [9] *Weller, K.*: Die rein pneumatische Gleichstandsäat. Diss. TH München, 1958.
- [10] *Stieger, W.V.*: Einzelkornfassung pneumatischer Mais-einzelkornsägeräte. Diss. Univ. Bonn, 1974.
- [11] *Hempsch, K.*: Eignung pneumatischer Maiseinzelkornsägeräte für die Zuckerrübenaussaat. Diss. Univ. Bonn, 1975.
- [12] *Mülle, G.*: Untersuchungen zur Einzelkornsäat von Getreide. Diss. Univ. Bonn, 1979.