

Die pneumatische Zuteilung von Getreide in Sämaschinen

Jürgen Mahlstedt und Hermann J. Heege*)

DK 631.331.5:631.33.021.4:621.867.8

In pneumatisch arbeitenden Sämaschinen kann die Saat den Scharen dann gleichmäßig zugeteilt werden, wenn die Körner über den Querschnitt des sog. Förderrohrs rotationssymmetrisch verteilt sind. Einflüsse von Zellenrad und Krümmern können diese Symmetrie stören. Durch Einbau von Blenden gelang es jedoch, die Körner so gleichmäßig zu verteilen, wie man es von Drillmaschinen mit Särädern verlangt. Die Kornfolge am Auslauf der pneumatischen Saatleitungen entspricht derjenigen von Drillmaschinen mit Särädern. Die Kornabstände folgen bei beiden Bauarten einer Exponentialverteilung.

Außer der bisher vorherrschenden Saatgutzuteilung durch Säräder haben sich in den letzten Jahren pneumatische Saatgutzuteiler für die Getreidebestellung eingeführt. Die Samen gelangen bei der Zuteilung durch Säräder im freien Fall zu den Säscharen. Beim

pneumatischen Saatgutzuteilen hingegen entfallen diese Beschränkungen auf den freien Fall; die Samen können mit dem pneumatischen Gerät auch beliebig in horizontaler Richtung gefördert werden. Dieses Verfahren bietet daher neue Möglichkeiten hinsichtlich der räumlichen Anordnung von Saatgutbehälter und Säscharen.

Der Saatgutbehälter kann verhältnismäßig schmal ausgeführt und mittig hinter dem Schlepper angeordnet sein. Es ist möglich, ihn ohne wesentliche Handarbeit durch freien Fall aus einem Hochkipper-Fahrzeug oder mit einem Förderer zu beschicken. Das Verteilen des Saatgutes in die üblichen, über die gesamte Arbeitsbreite reichenden Saatgutbehälter entfällt damit.

Die Säschare kann man bei der pneumatischen Saatgutzuteilung unabhängig vom Behälter anordnen. Diesen Vorteil der pneumatischen Saatgutzuteilung nutzt man bereits bei Geräten mit großen Arbeitsbreiten, **Bild 1**, und bei Gerätekombinationen, **Bild 2**, aus. Für Geräte mit kleinen Arbeitsbreiten war die pneumatische Saatgutzuteilung bislang zu aufwendig.

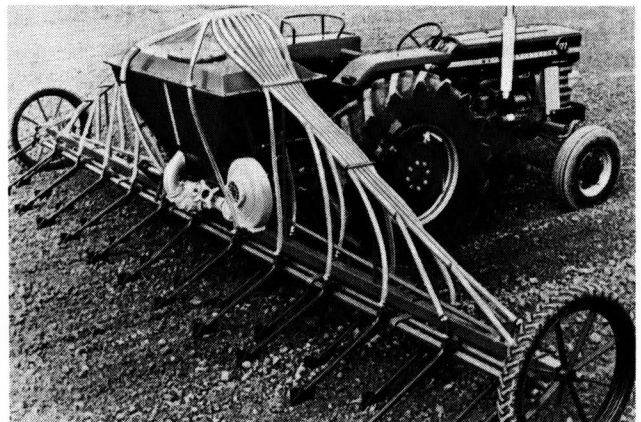


Bild 1. Pneumatische Saatgutzuteilung bei einer Drillmaschine mit 6 m Arbeitsbreite.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn-Bad Godesberg, stellte dankenswerterweise die Mittel für diese Arbeit zur Verfügung.

*) Dr. agr. Jürgen Mahlstedt war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik der Universität Bonn und ist jetzt wissenschaftlicher Angestellter der Abteilung Beratung Pflanzenschutz der Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen; Prof. Dr. agr. Hermann J. Heege MSAE ist am Institut für Landtechnik der Universität Bonn tätig.

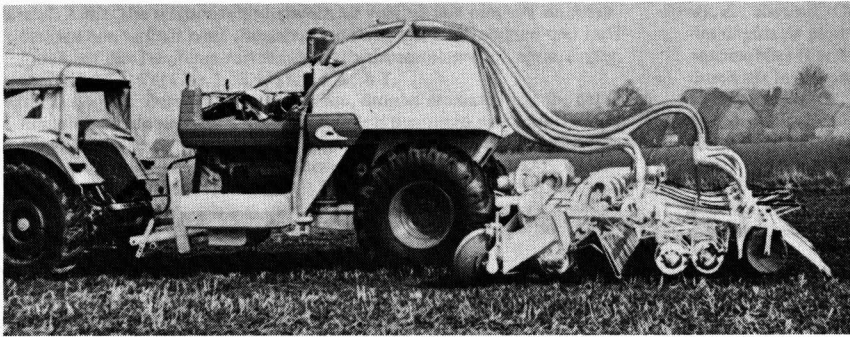


Bild 2. Gerätekombination für Bodenbearbeitung, Säen, Ausbringen von Dünger und Pflanzenschutzgranulaten in einem Arbeitsgang.

Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzgranulate werden pneumatisch zuteilt. Eine Fräse dient der Bodenbearbeitung.

Die pneumatische Saatgut-zuteilung bietet darüber hinaus neue Möglichkeiten für eine Getreidebreitensaat mit gleichmäßiger Tiefenlage der Körner [1]. Hierüber soll in einem späteren Beitrag in dieser Zeitschrift berichtet werden.

Die vorliegende Arbeit behandelt

- die Gleichmäßigkeit der Kornverteilung auf die Saatleitungen, die zu den Säscharen führen, und
- die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge am Ausgang der einzelnen Saatleitungen.

1. Versuchsausführung

Das in den Versuchen benutzte pneumatische Zuteilungssystem arbeitet nach dem Prinzip *Weiste*¹⁾: Das Saatgut wird aus einem zentralen Vorratsbehälter mit einer Zellenradschleuse in ein Förderrohr eingespeist. Ein von einem Gebläse erzeugter Luftstrom transportiert es zu einem Verteilerkopf, verteilt es auf die radial daran angeschlossenen Schläuche und leitet es durch diese Schläuche zu den Scharen.

Das in **Bild 3** skizzierte Zuteilungssystem wurde im Institut für Landtechnik der Universität Bonn angefertigt. Der Verteilerkopf *a* ist aus Aluminium gedreht, das Förderrohr *b* aus nahtlosen Stahlrohren hergestellt. Der Verteilerkopf *a* ist als Diffusor ausgebildet und oben durch eine Stoßplatte abgeschlossen. Darunter liegt als Füllstück zentral ein paraboloider Rotationskörper *c*. Der Verteilerkopf hat 31 Anschlußstutzen *d* für die Saatgutleitungen mit einer Weite von 22 mm.

Die Zellenradschleuse *e* ist oberhalb des horizontalen Rohrabschnittes mit der Achse des Zellenrades parallel zur Rohrachse angeordnet.

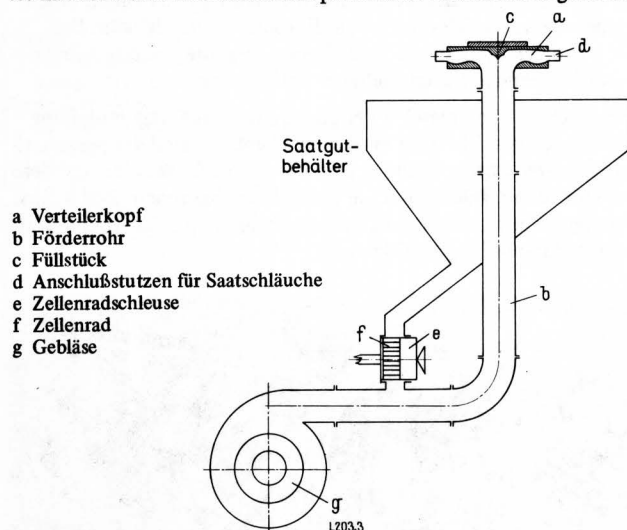


Bild 3. Versuchsausführung des pneumatischen Zuteilungssystems (ohne Saatleitungsschläuche).

Förderrohr-Durchmesser	89 mm
Länge des horizontalen Rohrabschnittes	280 mm
Länge des vertikalen Rohrabschnittes	840 mm
Krümmerradius	1,1 X Förderrohr-Durchmesser

¹⁾ Vgl. *Weiste, H.*: Erfahrungen mit der pneumatischen Sätechnik. In diesem Heft S. 39/40.

Das Zellenrad *f* hat 16 muldenförmige Zellen, deren wirksame Breite durch Einschieben von Füllstücken stufenlos verstellt werden kann. Seine Drehrichtung ist – soweit nicht anders angegeben – vom Gebläse *g* aus gesehen dem Uhrzeigersinn entgegengesetzt. Zum Beurteilen der Gleichmäßigkeit der Saatgutverteilung über die Arbeitsbreite beim Prüfen von Drillmaschinen setzt man die Masse m_i des an n Scharen je Zeiteinheit aufgefängenen Getreides zur mittleren Getreidemasse $\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n}$ in Beziehung. Dabei wird meist die

„maximale Abweichung“ c in Prozent von der mittleren je Auslauf ausgebrachten Getreidemasse angegeben [2]. Um diesen Wert zu ermitteln, stellt man zunächst die Abweichung der Getreidemasse m_i jedes Auslaufs in Prozent des Mittelwerts \bar{m} der Getreidemasse aller Ausläufe fest. Der am weitesten von 100 % abweichende Einzelwert ist dann die maximale Abweichung c . Als Konvention gilt bislang, daß sie nicht größer als $\pm 7\%$ sein soll [2].

Die maximale Abweichung c ist als Einzelwert durch das Meßergebnis nur eines einzigen Auslaufs festgelegt. Eine auf den Mittelwert bezogene Maßzahl, die die Meßergebnisse aller Ausläufe zugleich berücksichtigt, ist der Variationskoeffizient

$$v = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 \cdot \frac{100}{\bar{m}}}$$

mit m_i als der Getreidemasse je Auslauf, \bar{m} als arithmetischem Mittelwert aus allen m_i und n als Anzahl der Ausläufe.

Der Variationskoeffizient v ist die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung in Prozent und damit eine von der Anzahl n der Einzelwerte nicht wesentlich beeinflusste Größe [3]. Sie wird daher für diese Arbeit als Maßzahl herangezogen.

Ein Vergleich der bei den Versuchen erhaltenen Variationskoeffizienten v mit den Abweichungen c ergab im Mittel die Relation $v = 0,57 c$.

Wenn nun entsprechend der Konvention die maximale Abweichung c nicht größer als 7% sein soll [2], so darf demnach der Variationskoeffizient v den Wert 4% nicht übersteigen. Dieses Limit für den Variationskoeffizienten v wurde daher als Zielgröße gewählt.

Eine wichtige Einflußgröße bei der pneumatischen Saatgut-zuteilung ist die Geschwindigkeit der Förderluft. In dieser Arbeit wird jeweils die mittlere Geschwindigkeit angegeben.

Für einen kontinuierlichen Transport war bei einem Durchsatz von 100 g Weizen je s eine Luftgeschwindigkeit von mindestens 16,8 m/s erforderlich. Bei kleineren Geschwindigkeiten lagerten sich Körner im Krümmer ab. Nach Stillstand der Zellenradschleuse endete die Förderung dann nicht schlagartig, sondern es traten noch längere Zeit einzelne Körner an den Stutzen aus. Bei den anderen Getreidearten lagen die Mindestwerte für die Luftgeschwindigkeit geringfügig unter 16,8 m/s.

Die Geschwindigkeit wird nach oben durch die Gefahr von Kornbeschädigungen begrenzt. Nach *Segler* [4] sollte eine Luftgeschwindigkeit von 24 bis 26 m/s nicht überschritten werden. In Untersuchungen von *Schulten* [5] verminderte sich die Keimfähigkeit bei 14% Kornfeuchte und 25,2 m/s Luftgeschwindigkeit im Förderrohr der pneumatischen Saatgut-zuteilung bei den unbespelzten

Getreidearten Weizen und Roggen um 2 bis 3 % und bei den bespelteten Getreidearten Gerste und Hafer um 1 bis 2 %. Steigerte man die Luftgeschwindigkeit weiter, nahm die Keimfähigkeit noch mehr ab. In dieser Arbeit wird daher – von Ausnahmen abgesehen – der Einfluß der Geschwindigkeit auf die Saatgutzuteilung im Bereich von 16,8 bis 25,2 m/s untersucht.

2. Die Kornverteilung auf die Saatlösungen

2.1. Einbautenfreies Förderrohr

Zuerst wurde die Verteilung des Saatgutes auf die Ausläufe bei einbautenfreiem Förderrohr untersucht. Die Ergebnisse sind in **Bild 4** zusammengefaßt: Bei Weizen und Roggen nahmen die Variationskoeffizienten mit steigender Luftgeschwindigkeit ab. Für Hafer dagegen wurde der Variationskoeffizient zunächst kleiner und dann wieder größer. Die Wahl einer extrem hohen Förderluftgeschwindigkeit könnte das Ergebnis nicht verbessern. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 42 m/s im Förderrohr stieg der Variationskoeffizient auch für Roggen wieder an. Für Weizen betrug der kleinste Wert 19,5 %, für Roggen 17,0 %, für Gerste 17,7 % und für Hafer 15,0 %. Die Variationskoeffizienten lagen damit erheblich über der Zielgröße von 4 %.

Die Kornverteilung auf die Ausläufe kann man anschaulich im polaren Koordinatensystem darstellen. Seine Sektoren stellen die Ausläufe mit der entsprechenden Numerierung dar. Die an den einzelnen Ausläufen anfallenden Getreidemassen in Prozent ihres Mittelwerts werden in die Sektoren eingezeichnet. Der mit \bar{m} bezeichnete Kreis entspricht dem Mittelwert. Davon ausgehend trägt man in Richtung der Peripherie des Koordinatensystems die Werte $> 100\%$ und in Richtung des Pols die Werte $< 100\%$ ein und verbindet die einzelnen Punkte durch Linien. Stellt man sich das polare Koordinatensystem als Draufsicht des Verteilerkopfes vor,

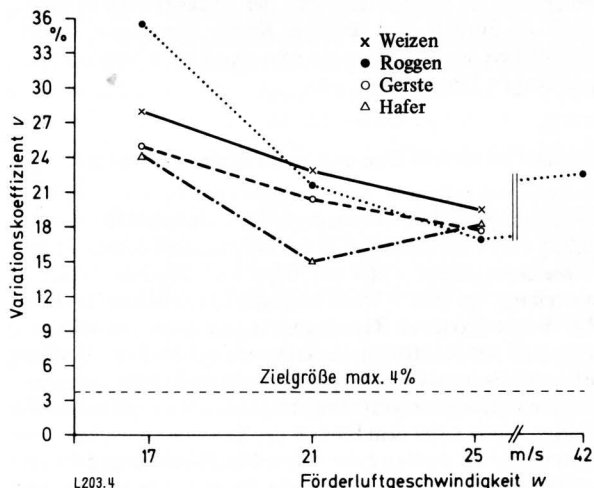


Bild 4. Variationskoeffizient v in Abhängigkeit von der Förderluftgeschwindigkeit w .

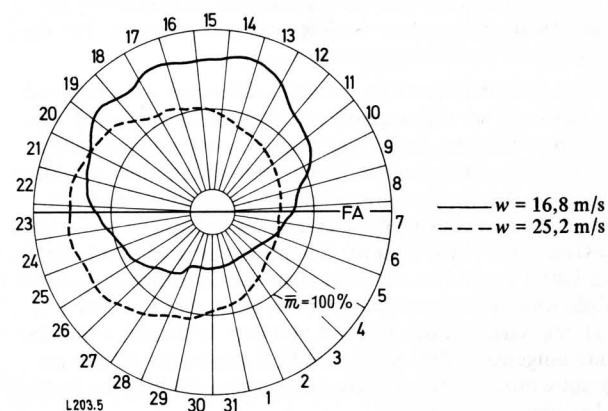


Bild 5. Verteilungsrings für Weizen bei zwei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten w .

so verläuft die verlängerte Achse des horizontalen Förderrohr-Abschnitts als Linie FA unterhalb der Zeichenebene. Zwei der mit Weizen erzielten Verteilungsrings sind in **Bild 5** enthalten. Als Ursachen für die mangelhafte rotationssymmetrische Verteilung des Saatgutes auf die Ausläufe des Verteilerkopfes kommen in Betracht

- der Einfluß des Krümmers,
- eine einseitige Korneinspeisung durch das Zellenrad in den horizontalen Förderrohrabschnitt.

In einem Krümmer wirkt auf das Fördergut und das Fördermedium die Zentrifugalkraft. Auf seiner Außenseite steigt der Druck, während auf der Innenseite die Strömung unter gleichzeitiger Bildung von Gegenwirbeln meist abreißt [6]. Das Druckgefälle bewirkt eine senkrecht zur Hauptströmungsrichtung gerichtete Sekundärströmung.

Waren Luft und Fördergut bereits vermischt, so entmischen sie sich im Krümmer wieder weitgehend. Die Gutteilchen werden zur Außenseite des Krümmers geschleudert und bilden eine Strähne, so daß der größte Teil des Krümmers von Fördergut frei bleibt. Mit Getreide durchgeführte Untersuchungen zeigen, daß am Ausgang eines 90° -Krümmers (Krümmungsradius gleich $10 \times$ Förderrohr – Durchmesser) fast das gesamte Fördergut durch das äußere Rohrdrittel transportiert wird [7].

Wie sich die einseitige Guteinspeisung durch das Zellenrad in das Förderrohr, **Bild 6**, auswirkt, ist erkennbar, wenn man die Kornverteilung bei den beiden möglichen Zellenrad-Drehrichtungen mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit vergleicht. **Bild 7** zeigt diesen

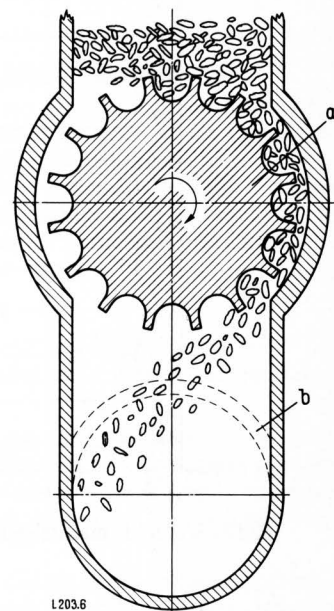


Bild 6. Einseitige Guteinspeisung in das Förderrohr.

a Zellenrad
b Förderrohr

Förderluftgeschwindigkeit 17,9 m/s
Zellenrad-drehzahl 90 U/min
— Drehrichtung entgegen Uhrzeigersinn
- - - Drehrichtung im Uhrzeigersinn

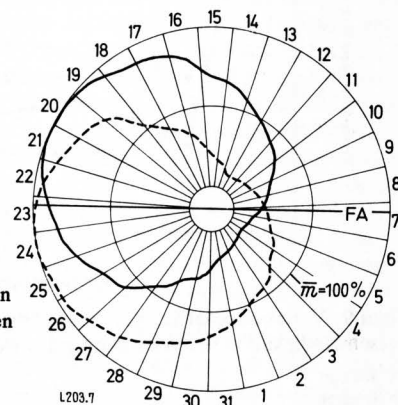


Bild 7. Verteilungsrings bei Wechsel der Zellenrad-Drehrichtung.

Vergleich für Weizen. Die Verteilungsringe liegen nahezu spiegelbildlich zur horizontalen Förderrohrachse FA. Offensichtlich werden die Körner je nach Drehrichtung und Umfangsgeschwindigkeit des Zellenrades überwiegend links oder überwiegend rechts von der Förderrohrachse FA eingescleust.

Die einseitige Einspeisung des Körnerstromes in das Förderrohr läßt sich auch bei einem Zellenrad, dessen Achse senkrecht zur Förderrohrachse steht, nicht völlig vermeiden, wenn die Förderleistung des Zellenrades durch Anpassen der wirksamen Zellenbreite eingestellt wird, da sich bei einem solchen Zellenrad jeweils der Ort der Korneinspeisung verändert. Lediglich bei einer wirksamen Zellenbreite ist eine symmetrische Korneinspeisung beiderseits der Förderrohrachse zu erwarten. Aus diesem Grunde wurde die ursprüngliche Lage des Zellenrades (Zellenradachse parallel zur Förderrohrachse) beibehalten. Somit lag es nahe, mit Hilfe von Einbauten in das Förderrohr sowohl den Einfluß des Krümmers als auch die einseitige Korneinspeisung durch das Zellenrad auszugleichen.

2.2. Wellrohr im vertikalen Förderrohr

Beim System *Weiste* ist das Förderrohr unterhalb des Verteilerkopfes als Wellrohr ausgebildet. Das Wellrohr soll eine gleichmäßige Verteilung der Samen auf die Kornausläufe bewirken. Ein solches Wellrohr, Bild 8, wurde auch in das Versuchsgerät eingebaut. Die nach Einbau des Wellrohrs erhaltenen Variationskoeffizienten zeigt Bild 9.

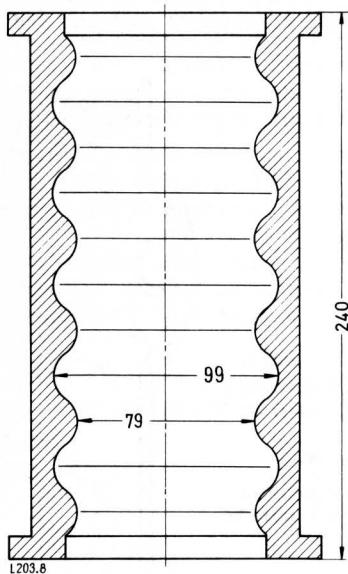


Bild 8. Wellrohr (maßstabgerecht, Maße in mm).

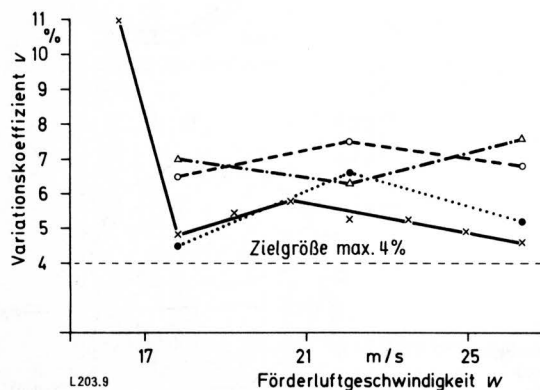


Bild 9. Variationskoeffizient ν in Abhängigkeit von der Förderluftgeschwindigkeit w bei Verwendung des Wellrohrs.

- x Weizen
- Roggen
- Gerste
- △ Hafer

Bei einbautenfreiem Förderrohr nahmen im Bereich von 16,8 bis 25,2 m/s Förderluft-Geschwindigkeit die Variationskoeffizienten für Weizen, Roggen und Gerste mit wachsender Luftgeschwindigkeit ab, vgl. Bild 4. Mit dem Wellrohr dagegen nahmen sie im Bereich über 17,9 m/s Luftgeschwindigkeit zunächst zu und wurden dann wieder kleiner. Für Hafer wurden sie wie bei einbautenfreiem Rohr zuerst kleiner und dann wieder größer. Eine für alle Getreidearten einheitliche Tendenz ist also nicht erkennbar. Nach Einbau des Wellrohrs betrug der kleinste Variationskoeffizient mit Weizen 4,6, mit Roggen 4,5, mit Gerste 6,5 und mit Hafer 6,3%. Verglichen mit den Ergebnissen bei einbautenfreiem Rohr sind damit die Variationskoeffizienten also erheblich kleiner geworden, sie liegen allerdings noch über der Zielgröße von 4%.

2.3. Trichter oder Blenden im vertikalen Förderrohr

Wenn die Samen hinter dem Krümmer ungleichmäßig über den Querschnitt des vertikalen Förderrohres verteilt sind, so wäre durch kurzzeitiges Ablenken aller Samen zum Rohrzentrum hin eine Beseitigung dieses Nachteiles vorstellbar. Aus diesem Grund untersuchte man, wie verschiedene Trichter und Blenden im vertikalen Förderrohr auf das Verteilungsergebnis wirken. Um weitere Einflüsse auf die Bahn der Körner auszuschließen, wurde dabei das Wellrohr wieder gegen das glatte Rohr gleicher Länge ausgetauscht.

Diese Einbauten lieferten Variationskoeffizienten, die – wie die des bereits behandelten Wellrohres – meist im Bereich von 4 bis 10% lagen [1]. Eine Ausnahme machten lediglich trichterförmige Einbauten, deren Kegelmantel mit einem Baumwollgewebe bespannt war. Diese ergaben bei einer Luftgeschwindigkeit von 21 m/s oder mehr Variationskoeffizienten $< 4\%$. Entscheidend war hierbei anscheinend die geringe Rückprallelastizität des Baumwollgewebes, die weitgehend die Bewegungsenergie der im peripheren Bereich des vertikalen Förderrohres verteilten Körner vernichtete. Da die Abriebfestigkeit derartiger Gewebe sehr gering ist, scheiden sie für den praktischen Einsatz leider aus.

2.4. Blenden im horizontalen und im vertikalen Förderrohr

Die Einflüsse von Zellenrad und Krümmer auf die Kornverteilung am Verteilerkopf sind unterschiedlich: Eine einseitige Korneinspeisung durch das Zellenrad in das horizontale Förderrohr ergibt – wie oben gezeigt – eine zur Achse FA unsymmetrische Kornverteilung, vgl. Bild 7. Wenn hingegen das Zellenrad die Körner über den horizontalen Rohrabchnitt gleichmäßig verteilt einschleusen und somit lediglich der Krümmer auf die Kornverteilung einwirken würde, so wäre bei vertikalem Steigrohr eine symmetrische Anordnung des Verteilungsrings zur Symmetrieachse FA zu erwarten. Denn unter dem Einfluß des Krümmers verschiebt sich das Verteilungsbild entlang der Achse FA. Zellenrad und Krümmer wirken also in um 90° voneinander abweichenden Richtungen auf die Kornverteilung ein.

Wenn nun Zellenrad und Krümmer die Kornverteilung nach unterschiedlichen Richtungen hin beeinflussen, so läßt auch eine getrennte Richtungskorrektur des Körnerstroms erwarten, daß sie günstig auf das Verteilungsergebnis wirkt.

Es wurde deshalb untersucht, ob die Einflüsse von Zellenrad und Krümmer nicht am wirkungsvollsten getrennt voneinander korrigiert werden können. Zur Korrektur der Einwirkung des Zellenrades wurde eine Blende von 50 mm Dmr. unmittelbar vor dem Zellenrad in den horizontalen Förderrohrabschnitt eingesetzt. Diese Blende bewirkt eine Kontraktion des Luftstroms und erhöht seine Geschwindigkeit. Dadurch nimmt der statische Druck unmittelbar hinter der Blende ab. Sinkt er an der Guteinspeisungs-Stelle im Rohr unter den Atmosphärendruck, dann wird Luft aus dem Zuführungsschacht angesaugt und von dem Luftstrahl hinter der Blende mitgerissen. Die angesaugte Luft nimmt die Körner zur Rohrmittle mit, wo diese stärker in Strömungsrichtung der Förderluft beschleunigt werden.

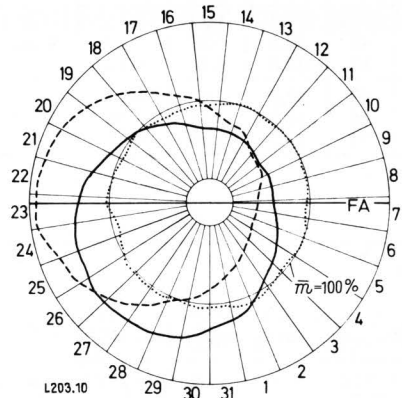
Die Wirkung der Blende vor dem Zellenrad auf die Lage des Verteilungsrings im polaren Koordinatensystem zeigt Bild 10. Ohne

Bild 10. Verschiebung des Verteilungsringes durch Einbauten im horizontalen und vertikalen Förderrohr.

Versuchsgut Roggen

Förderluftgeschwindigkeit 21,0 m/s

- ohne Einbauten
- - - Blende mit 50 mm Dmr. vor der Zellenradschleuse
- Blende mit 50 mm Dmr. vor der Zellenradschleuse und Blende mit 70 mm Dmr. im Steigrohr



Einbauten im Förderrohr entsteht ein Verteilungsring, der unsymmetrisch zur Achse FA liegt. Die Blende vor dem Zellenrad im horizontalen Förderrohr beseitigt im wesentlichen diese Unsymmetrie und somit den nachteiligen Einfluß der Zellenradschleuse. Die Unsymmetrie des Verteilungsringes senkrecht zur Achse FA wird durch diese Blende aber nicht aufgehoben.

Um auch diese Unsymmetrie zu vermindern, wurde nun eine weitere Blende in das vertikale Förderrohr (Steigrohr) eingesetzt. Durch Variieren des Befestigungsortes und Durchmessers dieser Blende konnte man den Körnerstrom verschieden stark ablenken. Damit war es möglich geworden, den Körnerstrom auf das Zentrum des Verteilerkopfes zu richten und die Verteilungsringe weitgehend mit dem Mittelkreis des Diagramms zur Deckung zu bringen (vgl. Bild 10).

Mit einer Blende von 70 mm Dmr., 710 mm nach dem Krümmende in das Steigrohr eingesetzt, betrug bei einer Luftgeschwindigkeit von 21 m/s der Variationskoeffizient für Weizen 3,0, für Roggen 1,2, für Gerste 2,0 und für Hafer 2,2%, Bild 11.

Das Ziel, den Variationskoeffizienten für die Verteilung der Körner auf die Saatgutleitungen unter die Zielgröße von 4% zu senken, war damit erreicht. Der Variationskoeffizient war allerdings auch in diesem Fall wieder von der Förderluftgeschwindigkeit abhängig.

2.5. Schräglage des Sägerätes

Für den praktischen Einsatz ist von Bedeutung, inwieweit die Gleichmäßigkeit der Saatgutverteilung auf die Ausläufe beeinträchtigt wird, wenn man am Hang arbeitet.

Bei allen bisherigen Untersuchungen war das Steigrohr lotrecht und damit der Verteilerkopf waagrecht angeordnet. Im Steigrohr

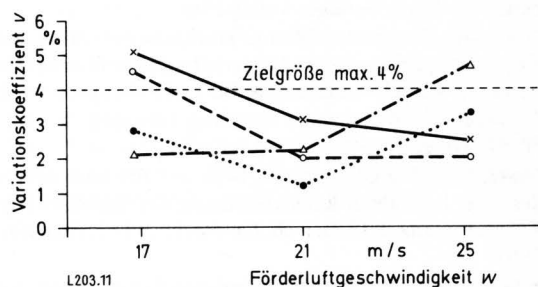


Bild 11. Variationskoeffizient v in Abhängigkeit von der Förderluftgeschwindigkeit w .

Blende mit 50 mm Dmr. vor dem Zellenrad, Blende mit 70 mm Dmr. 710 mm nach Krümmende im Steigrohr.

wirkte also die Gravitation genau entgegengesetzt zur Förderrichtung auf die Körner. Demnach veränderte die Gravitation die Kornverteilung über den Querschnitt des Steigrohrs nicht.

Zur Untersuchung der Hangtauglichkeit wurde das Sägerät auf dem Prüfstand nach links, rechts, vorn und hinten jeweils um 7,5 und 15° geneigt. Mit 7,5° Neigung sind schon recht schwierige Geländeverhältnisse unterstellt, mit 15° kommt man im Ackerbau nahezu an die Einsatzgrenze eines Schleppers mit normaler Ausrüstung [8].

Wie erwartet beeinflusste die Neigung die Saatgutverteilung auf die Ausläufe. Die Körner traten vermehrt an der nach unten geneigten Seite des Verteilerkopfes aus. Mit größerer Neigung wurde die Saatgutverteilung auf die Ausläufe ungleichmäßiger. In Einzelfällen konnte eine schwache Neigung allerdings auch den Variationskoeffizienten verringern. Wenn nämlich diejenige Seite des Verteilerkopfes nach unten geneigt wird, an der bei waagerechter Stellung anteilmäßig zu wenig Getreide austrat, so wird die Kornverteilung auf die Ausläufe zunächst verbessert. Diese Situation ergibt sich allerdings nur aus einer verbesserungsbedürftigen Ausgangsverteilung bei waagrechtem Verteilerkopf und ist deshalb als Ausnahmefall zu werten [1].

Im Vergleich zu den mit lotrechtem Steigrohr und waagrechtem Verteilerkopf erzielten Werten erhöhte sich der Variationskoeffizient für Weizen durchschnittlich bei 17 m/s Luftgeschwindigkeit und 7,5° Neigung um 2,5%, bei 15° Neigung um 6,1%. Er vergrößerte sich bei 25 m/s Luftgeschwindigkeit und 7,5° Neigung um 1,0% und bei 15° Neigung um 1,8%. Der nachteilige Einfluß von geneigtem Gelände auf die Kornverteilung kann also durch eine vergleichsweise hohe Luftgeschwindigkeit verringert werden.

3. Die Körnerfolge am Ende der Saatleitungen

Die üblichen Drillmaschinen mit Säradern legen die Körner keineswegs in gleichen Abständen in der Saatreihe ab. Die Kornabstände unterliegen vielmehr wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesetzmäßigkeiten. Es konnte an Hand zahlreicher Versuche nachgewiesen werden [9], daß die Häufigkeitsdichte der Abstände zwischen benachbarten Körnern entlang der Saatreihe von Drillmaschinen mit Säradern der Exponentialverteilung

$$p(z) = \frac{1}{\bar{z}} e^{-\frac{z}{\bar{z}}}$$

folgt mit z als dem Kornabstand und \bar{z} als dem mittleren Kornabstand.

Beim Versuchsgerät für die pneumatische Zuteilung bewirkten Form und Anordnung des Zellenrades, daß das Saatgut schubweise in das Förderrohr eingespeist wird. Es wurde deshalb untersucht, welche Kornabstände sich am Auslauf der Saatleitungsschläuche ergeben.

Zu diesem Zweck befestigte man die Ausläufe der Saatleitungsschläuche abwechselnd in einem Abstand von 20 mm senkrecht über einem Leimstreifen, der mit einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s unter dem Auslauf entlanggezogen wurde. Der Leim fixierte die Körner unmittelbar bei ihrem Auftreffen. Die Förderleistung des Sägerätes lag zwischen 30 und 120 g/s. Bei drei Versuchsreihen wurde die Zellenradzahl mit 90 U/min konstant gehalten und die Förderleistung durch Verschieben der Füllstücke im Zellenrad variiert. Obwohl man also die „Schubfolge“ des Zellenrades beibehielt, änderte sich die Förderleistung und somit auch der mittlere Kornabstand \bar{z} auf dem Leimstreifen. In drei weiteren Versuchsreihen hielt man das Zellenradvolumen konstant, änderte aber die Drehzahlen in den Stufen 18, 45 und 150 U/min. Jede Variante wurde dreimal wiederholt. Die Kornabstände längs des Leimstreifens faßte man für die Auswertung zu Klassen zusammen.

Wenn die Häufigkeitsdichte der Abstände zwischen benachbarten Körnern der erwähnten Exponentialverteilung $p(z)$ folgt – wie zunächst als Hypothese angenommen – so erhält man die Häufigkeit $P(z)$ für Kornabstände innerhalb der Klassengrenzen a und b durch Integration der Häufigkeitsdichtefunktion $p(z)$ zwischen

Tafel 1. Prüfung der Wahrscheinlichkeitsfunktion $P(z)$ für die Kornabstände z am Auslauf eines Saatleitungsschlauches nach dem χ^2 -Test.

Zellenrad- drehzahl U/min	\bar{z} cm	Kornabstände z in cm										χ^2	P bei 3 FG	χ_g^2 bei 9 FG	P_g
		0 bis 2		2 bis 4		4 bis 6		6 bis 8		> 8					
		V	H	V	H	V	H	V	H	V	H				
18	4,994	88	77,6	48	52,0	29	34,8	17	23,3	53	47,3	5,06	0,15	7,90	0,50
	6,148	66	59,2	40	42,7	29	30,9	18	22,3	60	57,9	1,97	0,60		
	7,236	47	48,5	36	36,8	26	27,9	25	21,2	67	66,6	0,87	0,80		
90	6,651	69	61,8	37	45,7	30	33,9	31	25,1	71	71,5	4,33	0,15	11,62	0,30
	5,566	64	63,7	47	44,5	27	31,0	24	21,7	49	50,1	0,93	0,80		
	7,060	51	53,6	37	38,7	21	27,9	17	20,2	67	52,6	6,36	0,80		
90	3,683	152	139,5	79	81,1	33	47,1	30	27,4	39	37,9	5,67	0,15	8,11	0,50
	4,086	132	128,9	80	79,0	45	47,5	30	30,6	46	47,0	0,25	0,96		
	3,911	132	133,3	78	80,0	52	47,9	34	28,8	37	43,0	2,19	0,50		

$\chi^2 = \sum \frac{(V-H)^2}{H}$ V Zahl der Abstände im Versuch
 H Zahl der Abstände nach Hypothese $P(z)$
 Annahmehereich $P \geq 0,05$ FG Anzahl der Freiheitsgrade

*) χ_g^2 und P_g gelten für das in je drei Versuchen mit gleicher Einstellung erhaltene Zahlenkollektiv.

Tafel 2. Prüfung der Wahrscheinlichkeitsfunktion $P(z)$ für die Kornabstände z am Auslauf eines Saatleitungsschlauches nach dem χ^2 -Test.

Zellenrad- drehzahl U/min	\bar{z} cm	Kornabstände z in cm										χ^2	P bei 3 FG	χ_g^2 bei 9 FG	P_g
		0 bis 1		1 bis 2		2 bis 3		3 bis 4		> 4					
		V	H	V	H	V	H	V	H	V	H				
90	1,705	147	142,9	81	79,5	43	44,2	21	24,6	30	30,8	0,77	0,80	15,06	0,10
	1,702	165	144,0	67	80,0	36	44,5	28	24,7	28	30,9	7,51	0,05		
	1,641	175	155,1	68	84,4	42	45,9	22	24,9	33	29,7	6,78	0,05		
45	2,542	125	111,7	72	69,2	43	49,1	21	33,2	71	68,8	7,01	0,05	16,11	0,05
	2,654	118	101,7	63	69,8	48	47,9	28	32,9	67	71,7	4,31	0,20		
	2,593	117	107,2	79	72,9	42	49,5	25	33,7	72	71,7	4,79	0,20		
150	1,603	158	149,5	63	79,7	47	43,3	16	23,0	38	26,5	11,42	0,01	15,48	0,10
	1,830	140	133,9	68	77,5	47	44,9	28	26,0	35	35,7	1,83	0,60		
	1,701	156	146,3	72	81,2	46	45,1	27	25,0	28	31,4	2,23	0,50		

$\chi^2 = \sum \frac{(V-H)^2}{H}$ V Zahl der Abstände im Versuch
 H Zahl der Abstände nach Hypothese $P(z)$
 Annahmehereich $P \geq 0,05$ FG Anzahl der Freiheitsgrade

*) χ_g^2 und P_g gelten für das in je drei Versuchen mit gleicher Einstellung erhaltene Zahlenkollektiv.

den Grenzen a und b :

$$\int_a^b \frac{1}{z} e^{-(z/\bar{z})} = e^{-(a/\bar{z})} - e^{-(b/\bar{z})}$$

Nach dieser Gleichung berechnete man die hypothetischen Häufigkeiten der einzelnen Klassen. Mit Hilfe des χ^2 -Tests nach Pearson [10] wurde geprüft, ob diese Werte mit den empirisch gefundenen Häufigkeiten gut übereinstimmen. Die Ergebnisse sind in der **Tafel 1** für mittlere Kornabstände $\bar{z} < 3,0$ cm und in **Tafel 2** für $\bar{z} > 3,0$ cm aufgeführt.

Die empirischen Häufigkeiten stimmen mit den hypothetischen gut überein. Von einer Ausnahme abgesehen sind die Differenzen zwischen ihnen nicht signifikant.

Bei dieser Ausnahme (**Tafel 2**) handelt es sich um eine Wiederholung des Versuchs mit der Zellenradzahl 150 U/min. Auch bei dieser Wiederholung ist jedoch eine zufällige Abweichung von der angenommenen Verteilung nicht auszuschließen, da der Wert P für χ_g^2 (letzte Spalte der **Tafel 2**) nicht im Ablehnungsbereich liegt.

Die Häufigkeit der Kornabstände bei der pneumatischen Saatgut-zuteilung folgt also – wie diejenige der üblichen Drillmaschinen mit Särädern – der Exponentialverteilung $p(z)$.

Das schubweise Einspeisen der Körner führt auch bei vergleichsweise niedrigen Zellenrad-Drehzahlen nicht zu einer signifikanten Änderung der Verteilung der Kornabstände in der Saatreihe. Dies ist wohl darin begründet, daß beim Transport durch das Förderrohr und die Saatleitungen die vom Zellenrad verursachten Körneranhäufungen auseinandergezogen werden. Eine solche Wirkung wurde bereits bei Drillmaschinen mit Särädern festgestellt [11], obgleich deren Saatleitungen wesentlich kürzer sind. L 203

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] **Mahlstedt, Jürgen:** Pneumatische Saatgut-zuteilung bei Sämaschinen für die Getreidebreitsaat. Dissertation Bonn 1971.
- [2] National Institute of Agricultural Engineering. Test-Report for Users No. 484. Silsoe, England, 1965.
- [3] • **Mudra, A.:** Statistische Methoden für landwirtschaftliche Versuche. Berlin, Hamburg: Parey 1958.
- [4] **Segler, G.:** Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Schr. d. Reichskuratoriums f. Technik i. d. Landwirtschaft, H. 60. Berlin: Beuth-Verlag 1934.
- [5] **Schulten, H.:** Keimbeschädigungen bei Getreide an pneumatischen Sägeräten. Diplomarbeit, Institut für Landtechnik, Bonn 1969.
- [6] • **Eck, B.:** Technische Strömungslehre. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1966.
- [7] **Morikawa, Y.:** Druckabfall und Bewegung der Gutteilchen in Krümmern pneumatischer Förderleitungen bei kleiner Gutbeladung. Grundle. Landtechnik Bd. 16 (1966) Nr. 2, S. 65 ff.
- [8] **Rühmann, H.:** Anbauzonen am Hang. Landtechnik Bd. 13 (1957) Nr. 9, S. 259.
- [9] **Heege, H.J.:** Die Gleichstand-, Drill- und Breitsaat des Getreides unter besonderer Berücksichtigung der flächenmäßigen Kornverteilung. KTL-Ber. üb. Landtechnik 112, Frankfurt/M. 1967.
- [10] • **Snedecor, G.W.:** Statistical Methods. 5. Aufl. Ames, Iowa: State University Press 1956, S. 18 ff.
- [11] **Gohlke, H.:** Theoretische Grundlagen für die konstruktiven Maßnahmen zur Beeinflussung der Verteilung des Samens bei Drillmaschinen. Dissertation TH München 1952, S. 38 ff.