

Zusammenfassung

Unter vergleichbaren Bedingungen wurde der Leistungsbedarf typischer Schneidenausbildungen bei einem Ladewagenschneidwerk mit feststehenden Messern im neuen und gebrauchten Zustand untersucht. Dabei erfolgte die Abnutzung der Messer durch das Laden und Schneiden von je 100 dz Stroh. Trotz dieser relativ geringen Mengen (etwa 12 Wagenladungen) lassen die Meßergebnisse doch eindeutig Unterschiede erkennen.

Die Messer mit glattem Schliff erfordern in neuem Zustand den geringsten Leistungsbedarf, benötigen aber nach kurzem Gebrauch bereits eine bis zu 40% höhere Leistung für den Förder- und Schneidvorgang. Demgegenüber verhalten sich die profilierten Messer mit Stufenschliff und Feilenhieb wesentlich günstiger: gebrauchte Messer zeigten sich leistungssparender als neue. Ähnliche Relationen ergaben sich bei den Drehmomentspitzen; hier verursachten die gebrauchten Messer mit glattem Schliff den ungleichmäßigsten Drehmomentenverlauf. Von den profilierten Messern verhielten sich unter Berücksichtigung aller Ergebnisse die Messer mit Stufenschliff etwas günstiger als die gezahnten Messer mit dem Feilenhieb.

Da in früheren Untersuchungen die gleichen Zusammenhänge auch bei Ladewagenschneidwerken mit bewegten Messern nachgewiesen wurden, wird daher empfohlen, möglichst Messer mit zweckmäßiger Profilierung zu verwenden. Bei Großserien können außerdem Messer mit Stufenschliff durch die spanlose Fertigung des Profils billiger hergestellt werden als der arbeitsaufwendige glatte Schliff. Auch für den praktischen Einsatz des Ladewagens

bringen die untersuchten Schneidenprofile Vorteile, da die Standzeit erfahrungsgemäß eine ganze Saison beträgt, die Gefahr des häufigen Ansprechens der Überlastsicherung wegen der niedrigeren Drehmomentspitzen verringert wird und ein Nachschärfen mit den in der Landwirtschaft vorhandenen Schleifeinrichtungen möglich ist.

Schrifttum

- [1] Brenner, W. G.: Der Ladewagen — erfreuliche Erscheinung der Landtechnik. Landtechn. **21** (1966) H. 22, S. 762, 764/66, 768/770.
- [2] Dohne, E.: Bauarten der Ladewagen. Landtechn. **22** (1967) H. 9, S. 275/78.
- [3] Grimm, A.: Einsatzmöglichkeiten und Leistungen des Ladewagens bei den verschiedenen Ladegütern. Landtechn. **22** (1967) H. 9, S. 258, 260, 262.
- [4] Schulz, H., H. Herppich und M. Wagner: Untersuchungen über den Leistungsbedarf von Ladewagen. Landtechn. Forsch. **16** (1966) H. 2, S. 33/40.
- [5] Schulz, H.: Konstruktion, Einsatzmöglichkeiten und Arbeitsketten des Ladewagens. Grundle. Landtechn. **17** (1967) Nr. 1, S. 23/28.
- [6] Schulz, H., und K. H. Kromer: Untersuchungen an Schneidvorrichtungen im Ladewagen. Landtechn. Forsch. **17** (1967) H. 3, S. 61/68.
- [7] Schulz, H., A. Grimm und K. H. Ulrich: Der Ladewagen, Technik, Einsatz und Folgeeinrichtungen. KTL-Flugschrift Nr. 17. Wolfratshausen: Neureuter-Verl. 1968.

DK 631.363.3.072

Ein Beitrag über die Häckselgutförderung durch die Schneid-Wurf-Trommeln der Exaktfeldhäcksler

Von Karl-Hans Kromer, Weihenstephan

Aus den Arbeiten des Instituts für Landtechnik der Technischen Hochschule München-Weihenstephan

Die Wurfweite ist eine wichtige Kenngröße der Feldhäcksler und bei der Trommelbauart oft nicht ausreichend. Um die Einflüsse auf die Wurfweite zu klären, wurde mittels Zeitlupenaufnahmen der Materialfluß verschiedenen Häckselgutes durch das Trommelinnere von der Übernahme durch die Wurfschaufel bis zum Auswurf in den Förderturm für verschiedene Schaufelformen experimentell untersucht. Ferner wurde in einem Wurfprüfstand die Auswurfgeschwindigkeit des Gutes und damit die Wurfweite in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit der Trommel, der Wurfschaufelzahl und -form und der Luftgeschwindigkeit gemessen. Abschließend werden aufgrund der Versuchsergebnisse Konstruktionshinweise für die Schneid-Wurf-Trommeln gegeben.

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Theoretische Betrachtung der Gutförderung
 - 2.1 Aufnahmephase
 - 2.2 Schleppphase
 - 2.3 Abwurfphase
- 3 Experimentelle Untersuchungen
 - 3.1 Kinematographische Erfassung der Gutförderung
 - 3.2 Experimentelle Ermittlung der Einflüsse auf die Wurfweite
 - 3.21 Einfluß der Trommelumfangsgeschwindigkeit
 - 3.22 Einfluß der Wurfschaufelzahl
 - 3.23 Einfluß der Luftgeschwindigkeit
 - 3.24 Einfluß der Wurfschaufelform
- 4 Zusammenfassung
- 5 Schrifttum

Dr.-Ing. Karl-Hans Kromer ist Oberingenieur am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. W. G. Brenner) der Technischen Hochschule München in Weihenstephan und weilt zur Zeit als Assistent Professor am Department of Agricultural Engineering der Purdue University in Lafayette/Indiana (USA).

1 Einleitung

Die Doppelfunktion der werfenden Messertrommeln der Exaktfeldhäcksler besteht darin, das als Preßstrang zugeführte halmartige Material zu schneiden und es anschließend über eine gewisse, durch die Aufgabenstellung vorbestimmte Entfernung zu werfen, d. h. weiterzuführen. Da nun beide Funktionen von einem Arbeitselement übernommen werden, muß es sich bei dessen Gestaltung notwendigerweise um einen Kompromiß zwischen Messer und Wurfschaufel handeln, wobei leider die günstigste Ausbildung des Messers der der Wurfschaufel konträr gegenübersteht. Die Arbeitsgüte einer Schneid-Wurf-Trommel ist durch die bestmögliche Erfüllung beider Funktionen gekennzeichnet, nämlich bei minimalem Schneidleistungsbedarf eine größtmögliche Förderweite zu erzielen.

Wenn bis vor kurzem, insbesondere auch in Deutschland, der Trommelhäcksler trotz seiner unbestrittenen Vorteile nur gering verbreitet war, so lag dies nicht zuletzt an der ungenügenden Erfüllung einer ausreichenden Wurfweite. Demnach befaßte sich die Forschung in den letzten Jahren mit dem Materialfluß durch die Trommel mit dem Ziel, den bestmöglichen Abwurf zu erreichen [2; 5; 14; 17; 23 bis 26]. Bei diesen Arbeiten blieb die Übernahme des Häckselgutes durch die Trommel weitgehend unberücksichtigt. Aus diesem Grunde erschien es nützlich, die Aufnahme des Gutes durch die Wurfschaufel zu untersuchen, wobei die theoretischen Ergebnisse durch Zeitdehn-Filmaufnahmen belegt bzw. eingeschränkt wurden.

Für eine theoretische Betrachtung der Gutförderung werden anhand einer schematischen Darstellung in **Bild 1** die Winkel und Bezeichnungen einer Schneid-Wurf-Trommel erläutert. Das auf das Drei- bis Vierfache vorgepreßte Halmgut wird von rechts (Pfeil!) über den Hackbock der Trommel zugeführt, von der Schneide der Trommel zerhackt, beschleunigt, in der Trommel gefördert und an der Leitklappe in den anschließenden Auswurfurm nach oben (gestrichelter Pfeil!) ausgeworfen. Die

Gutförderung in der Trommel läßt sich demnach in drei Hauptphasen unterteilen: die Aufnahmephase $\varphi_1 + \varphi_2$, die Schleppphase φ_3 und die Abwurfphase φ_4 .

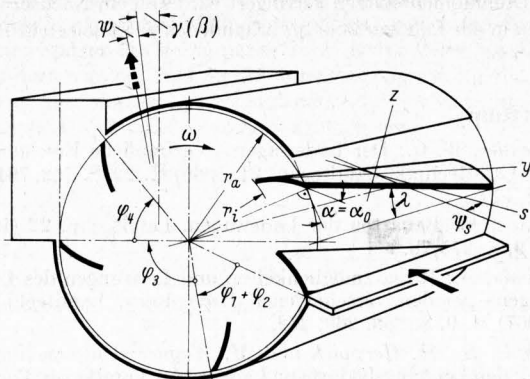


Bild 1. Schematische Darstellung einer Schneid-Wurf-Trommel. Bedeutung der Formelgrößen siehe „Verwendete Formelzeichen“

Da die Förder- bzw. Wurfweite von der kinetischen Energie des Häckselns beim Abwurf in der gewünschten Richtung und dem Widerstand, den das Gut nach dem Abwurf erfährt, abhängt, werden folgende Faktoren die Wurfweite beeinflussen:

1. Umfangsgeschwindigkeit der Trommel,
 2. Messerwinkel und Wurfgeschauelform,
 3. Wurfgeschauelform, also Gutmenge/Wurfgeschauelform,
 4. Abstand Wurfgeschauelform—Gehäuse,
 5. verfügbare Gehäusewinkel,
 6. Ausbildung des Abstreifbleches,
 7. Abwurfrichtung und Anpassung des Auswurfsturms,
 8. Form des Auswurfkrümmers
- und in Abhängigkeit vom Häckselgut
9. Reibungsbeiwerte Halmgut-Wurfgeschauelform und Halmgut-Gehäuse bzw. Turm,
 10. physikalisch-chemische sowie technologische Eigenschaften des Häckselgutes.

Um auf die Konstruktion der Schneid-Wurf-Trommel über die vorgenannten zehn Größen Einfluß nehmen zu können, ist in erster Linie die Kenntnis der Gutförderung durch die Trommel und, soweit möglich, deren theoretische Erfassung erforderlich.

2 Theoretische Betrachtung der Gutförderung

Um eine theoretische Betrachtung zu erleichtern bzw. zu ermöglichen, ist es notwendig, einige vereinfachende Annahmen zu treffen.

Wenngleich im Vorhergehenden von Wurftrömmeln gesprochen wurde, so handelt es sich doch in Wirklichkeit um Wurfgebläse, für deren Leerlauf sich die zugehörigen Gebläsekennlinien und der Wirkungsgrad bestimmen lassen. Wegen der weitgehenden Aufhebung der Gebläsetheorie bei Zuführung und Förderung von Gut wird der Strömungszustand im folgenden als stationär angesehen, wobei angenommen wird, daß sich eine kreisförmige Luftströmung beim Rotieren der Trommel ausbildet. Dies ist besonders dann zulässig, wenn das „Gebläse“ mit weitgehender saugseitiger Drosselung, also minimaler Luftförderung betrieben werden. Zeitdehn-Filmaufnahmen bestätigen, daß diese Vereinfachung zulässig ist.

Des weiteren wurde der durch den Schnitt frei werdende Massehaufen in einem Massepunkt vereinigt gedacht und so das Problem auf die Bewegung eines vom umgebenden Medium unbeeinflussten Massepunktes zurückgeführt.

Bei einer in Exaktfeldhäckseln heute gebräuchlichen Umfangsgeschwindigkeit der Trommel von etwa 30 m/s (Trommeldurchmesser 500 bis 600 mm), einer Einzugs geschwindigkeit um 1 m/s und einer theoretischen Häckselhöhe von 5 bis 10 mm kann weiterhin vereinfachend angenommen werden, daß sich der Massepunkt des geschnittenen Guts bei der Übernahme durch die Trommel auf dem Trommelaußenradius in Ruhe befindet, da die theoretische Häckselhöhe viel kleiner als der Trommelradius und die Gutgeschwindigkeit viel kleiner als die Umfangsgeschwindigkeit der Trommel ist. Infolge der gegenüber der Zentrifugalbeschleunigung des Guts viel kleineren Erdbeschleunigung kann die Schwerkraft bei der Aufstellung des Kräfte-

gleichgewichtes unberücksichtigt bleiben. Da ferner die meist gebräuchlichen Neigungswinkel λ weniger als 15° betragen, werden bei der theoretischen Betrachtung die Kraft- und Bewegungskomponenten in y -Richtung vernachlässigt, wodurch sich ein ebenes Problem in der Radialebene ergibt.

2.1 Aufnahme phase

Bei der Gutaufnahme durch die Schaufel handelt es sich um einen Stoßvorgang, gekennzeichnet durch die Stoßzahl k und die Stoßrichtung. Da dieser Vorgang während eines kleinen Trommeldrehwinkels $\Delta\varphi$ erfolgt, kann der Stoßvorgang translatorisch in der Messernormalen betrachtet werden.

Nimmt man als Grenzfall einen vollplastischen Stoß an und läßt die Stoßzeit bei einer erfolgten Verzögerung der Trommel durch den Schnittstoß gegen Null gehen, so lassen sich unter Berücksichtigung der oben genannten Annahmen ein Kräftegleichgewicht nach Bild 2 und die Bewegungsgleichungen aufstellen. Die Massenkraft ist in Komponenten in s - und z -Richtung aufgeteilt. Bei ausreichend kleinem α_0 und $\alpha = f(r)$ bewegt sich dann das Gut infolge $m \dot{s}$ sowie $-2\mu m \omega \dot{s}$ relativ zur Trommelmitte hin, wobei r_1 unterschritten werden kann¹⁾. Die umgekehrte Analogie zur Gutbewegung nach außen ist offensichtlich (Bild 4).

¹⁾ Bedeutung der Formelgrößen siehe „Verwendete Formelzeichen“

Verwendete Formelzeichen

E_T	kp/mm	Eichfaktor für den Prallplattenschrieb
$G_{1 \text{ bis } 11}$	kg	Massenanteile des Häckselgutes
h_0	mm	Höhe der Wagenplattform über der Fahrbahn
h_A	mm	Höhe der Grundfläche des Auswurfsturms über der Fahrbahn
h^*	mm	mittlere Diagrammhöhe des Prallplattenschriebs
k	—	Stoßfaktor zwischen Häckselgut und Wurfgeschauelform
K	mm/t/h	Wurfaktor (zur Beurteilung der Wurfweite)
l_0	m	Abstand zwischen Wagen und Feldhäckslers
$l_{1 \text{ bis } 11}$	m	Wurfweiteklassen
m	kg	Masse eines Gutteilchens
m_T	kg	Masse der Trommel
M_T	kpm	Antriebsdrehmoment der Trommel
N_b	PS	Beschleunigungsleistung des Häckselgutes
P_n	kp	senkrecht auf die Prallplatte wirkender Strahlendruck (Prallplatten-Normale)
Q	t/h	Gutdurchsatz
r	mm	Radius eines beliebigen Punktes der Wurfgeschauelform von der Trommelachse
r_a	mm	Außenradius der Wurfgeschauelform (Trommelradius)
r_i	mm	Innenradius der Wurfgeschauelform
s	—	Richtung auf der Wurfgeschauelfläche
s_w	m	mittlere effektive Wurfweite
\dot{s}	m/s	Geschwindigkeit eines Gutteilchens in s -Richtung
\ddot{s}	m/s ²	Beschleunigung eines Gutteilchens in s -Richtung
u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Wurfgeschauelform in 0
u_z	m/s	u_z Komponente in z -Richtung
u_T	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Trommel
U	%	Feuchtegehalt des Häckselgutes
v	m/s	Geschwindigkeit eines Gutteilchens in 0
v_r	m/s	Komponente in radialer Richtung
v_s	m/s	Komponente in s -Richtung
v_z	m/s	Komponente in z -Richtung
$v_{z, \mu}$	m/s	$v_{z, \mu}$ z -Komponente unter Berücksichtigung der Ablenkung infolge μ
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit am Ende des Auswurfsturms
v_M	m/s	Abwurfgeschwindigkeit eines Gutteilchens unter Berücksichtigung der Ablenkung ψ auf der Schaufel infolge des Neigungswinkels λ
$v_{M, 0}$	m/s	Abwurfgeschwindigkeit eines Gutteilchens für $\lambda = 0$ ($\psi = 0$)
y, z	—	Richtungen auf der Wurfgeschauelfläche
\ddot{z}	m/s ²	Beschleunigung eines Gutteilchens in z -Richtung
α	Grad	Winkel zwischen Wurfgeschauelfläche und Tangentialebene an den Trommelzylinder
α_0	Grad	Wattenwinkel α des Häckselmessers in r_a (in der Radialebene der Trommel)
α''	Grad	Ablenkung der Bewegungsrichtung eines Gutteilchens auf der Wurfgeschauelform infolge μ
β, γ	Grad	Ablenkung der Abwurfrichtung in der Radialebene s, z
δ	Grad	Anstellwinkel der Prallplatte
λ	Grad	Neigungswinkel zwischen Häckselmesser- und Gegenschneide
μ	—	Reibungsbeiwert zwischen Häckselgut und Wurfgeschauelfläche
$\varphi_{1, 2}$	Grad	Gehäusewinkel
φ_s	Grad	Ablenkung der Gutsbewegung in Wurfgeschauelfläche
ψ	Grad	Ablenkung der Abwurfrichtung in der Tangentialebene an den Trommelzylinder
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Trommel

Beziehung für die Gutgeschwindigkeit v_s längs der Wurfchaufel angegeben wird:

$$v_s = \frac{\omega}{2} \left\{ \left(1 - \frac{\mu}{k_1} \right) \left[\frac{v_{s,0}}{\omega} - r_1 (\cos \sigma + \mu \sin \sigma) (k_1 + \mu) \right] e^{(k_1 - \mu) \varphi} + \left(1 + \frac{\mu}{k_1} \right) \left[\frac{v_{s,0}}{\omega} + r_1 (\cos \sigma + \mu \sin \sigma) (k_1 - \mu) \right] e^{-(k_1 + \mu) \varphi} \right\} \quad (10)$$

mit den folgenden Voraussetzungen:

$$b_t = 2 \dot{r} \omega = 2 \omega s; \quad b_r = \ddot{r} = \omega^2 r; \quad \varphi = \omega t; \quad k_1 = \sqrt{1 + \mu^2}.$$

Demnach ist die Gutgeschwindigkeit v_s längs der Wurfchaufel proportional der Winkelgeschwindigkeit ω , der Anfangsgeschwindigkeit des Guts auf der Wurfchaufel, dem Wurfchaufelwinkel σ ($\approx \alpha$), dem Radius und dem Gehäusewinkel φ , hingegen umgekehrt proportional dem Reibungsbeiwert μ . Der für die Abwurfphase erforderliche Gehäusewinkel φ_4 wird durch das am weitesten zu r_1 gelegene Gut bestimmt.

2.2 Schleppphase

Aufgrund der vorstehenden theoretischen Betrachtungen der Aufnahmephase bestätigt sich die allgemeine Annahme nicht, daß die Schleppphasenlänge gleich dem Trommelumfang vom Hackbock bis zum Abwurf ist. Vielmehr wird der effektive Schleppphasenwinkel und damit Reibungsweg und -zeit wesentlich von dem Wurfchaufelwinkel α , dem Trommelradius r , dem Stoßfaktor k und dem Reibungsbeiwert μ beeinflusst.

In Kenntnis der Phasenwinkel der Aufnahme und des verfügbaren Gehäusewinkels wird es möglich, den Schleppphasenwinkel φ_3 zu bestimmen und nachfolgend die Reibungsleistung zu ermitteln. Über letztere, wie auch deren Einflußfaktoren, liegen zahlreiche Untersuchungen vor [4; 8; 17; 25], so daß an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

2.3 Abwurfphase

Die Geschwindigkeitsverhältnisse beim Abwurf sind in **Bild 5** dargestellt. Danach erfolgt bei einem freien Abwurf und einer Gutbewegung von r_1 nach r_a der Abwurf des Guts mit einer zusammengesetzten Geschwindigkeit v_M . In Abhängigkeit von Gehäusewinkel φ_4 und der Geschwindigkeitsablenkung ψ_s auf der Wurfchaufel ergeben sich die Abwurfwinkel β und ψ . Nachdem

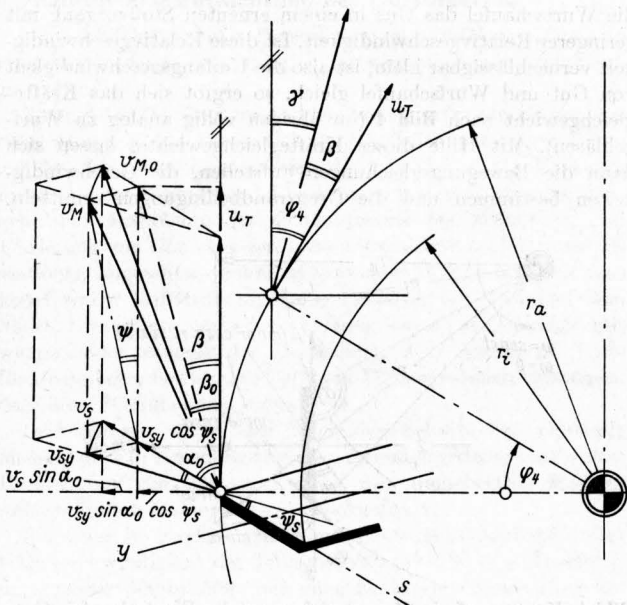


Bild 5. Geschwindigkeitsverhältnisse beim Abwurf.
 φ_4 Gehäuseabwurfwinkel

über dem Abwurf, insbesondere von *Kampf* [17] und *Reznik* [24] grundlegende Untersuchungen vorliegen, werden nachfolgend nur die Beziehungen für die effektive Abwurfgeschwindigkeit des Guts sowie die Ablenkungen in der Radial- und Tangentialebene angegeben:

$$v_m = \sqrt{v_{sy}^2 \sin^2 \alpha_0 + (u_T + v_{sy} \cos \alpha_0)^2} \quad (11),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_{sy} \cos \psi_s \sin \alpha_0}{u_T + v_{sy} \cos \psi_s \cos \alpha_0} \quad (12),$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{v_{sy} \sin \psi_s}{u_T \cos \psi_4} \quad (13).$$

Unter der eingangs gemachten vereinfachenden Annahme, daß der Neigungswinkel λ vernachlässigbar klein sei, entfällt die Ablenkung der Gutgeschwindigkeit in der Wurfchaufelenebene und damit auch in der Tangentialebene. Mit $\psi_s = 0$ ergibt sich die Gutgeschwindigkeit zu

$$v_{m,0} = \sqrt{v_s^2 \sin^2 \alpha_0 + (u_T + v_s \cos \alpha_0)^2} \quad (14)$$

sowie die Ablenkung in der Radialebene zu

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{v_s \sin \alpha_0}{u_T + v_s \cos \alpha_0} \quad (15)$$

womit Untersuchungen an Wurfgebläsen [17] bestätigt werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

Zur Überprüfung der eingangs gemachten vereinfachenden Annahmen wie auch der theoretischen Ergebnisse war es erforderlich, den Häckselgutfluß in der Trommel experimentell mit Hilfe von Zeitdehn-Filmaufnahmen zu erfassen. Zur Ermittlung der effektiven Größe verschiedener Einflußfaktoren auf die Wurfweite mußten des weiteren umfangreiche Versuchsreihen mit vorzugsweise Stroh, Klee gras und Silomais angestellt werden.

Als Versuchstrommel wurde hierbei die Schneid-Wurf-Trommel eines Trommelfeldhäckslers verwendet, deren Aufbau in **Bild 6** dargestellt ist. Entsprechend den in der Einleitung erwähnten Einflußgrößen war eine Änderungsmöglichkeit der Randbedingungen vorgesehen. Zur Simulation verschiedener Wurfchaufelformen wurden alle Messer mit Wurfblechen der vorgegebenen Form ausgerüstet.

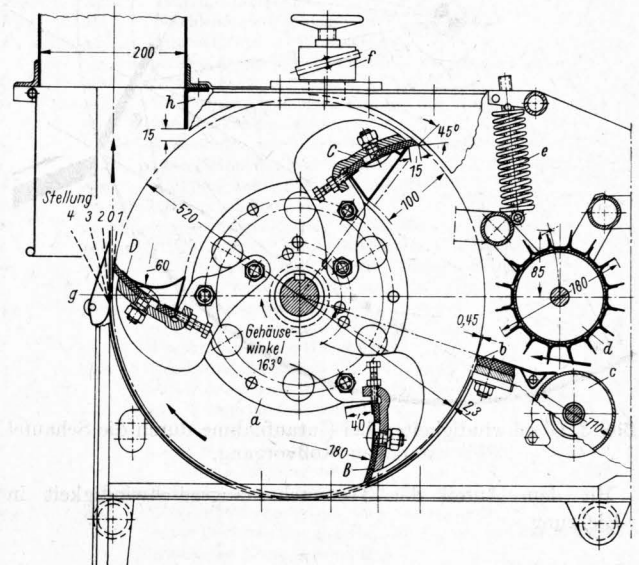


Bild 6. Aufbau der Versuchstrommel mit drei Wurfblechformen B, C und D, den Einzugsrollen und dem Auswurfschacht.

- Messernzahl 1 bis 6
Ausführung der Wurfchaufelform A: Messer ohne Wurfblech
Neigungswinkel $\lambda = 10^\circ$
Schnittbreite 370 mm
Breite des Trommelgehäuses 400 mm
- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| a Schneid-Wurf-Trommel | e Federbelastung der Preßwalze |
| b Gegenschneide | f Schleifvorrichtung |
| c Glatzwalze | g Leitklappe |
| d Einzugsrolle | h Abstreiblech |
- Leitklappenstellung 1 — 5° zur Abwurf tangente
2 + 5°
3 + 15°
4 + 30°

- Wurfblech-(Messer)-Formen A ohne Wurfblech, $r = 180$ mm
B mit Wurfblech
C mit Wurfblech, radial
D mit Wurfblech, $r = 60$ mm

3.1 Kinematographische Erfassung der Gutförderung

Während die Gutaufnahme mit offener Blende und Stroboskopbelichtung bestimmter Frequenz [17; 21] der Bestimmung der effektiven Teilchengeschwindigkeit insbesondere am Auswurfkrümmende galt, erfolgte die Bestimmung des Materialflusses durch die Trommel mittels Zeitdehn-Filmaufnahmen. Beiden Verfahren ist in den vorliegenden Untersuchungen insofern eine wesentliche Einschränkung gemeinsam, als die Aufnahmen nur zweidimensional sind und den vorderen, eventuell durch Wandreibung beeinflussten Gutstrom bevorzugen. Aus diesem Grunde wurden dann, wie im folgenden Abschnitt 3.2 erläutert, die umfassenden Untersuchungen der Einflüsse auf die Wurfweite über die mittlere effektive Gutgeschwindigkeit angestellt.

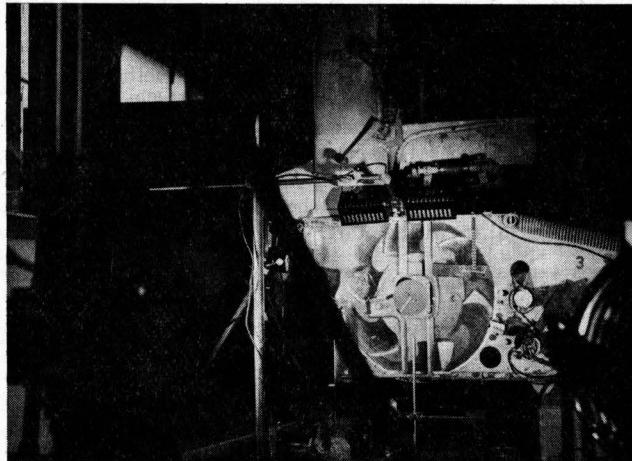


Bild 7. Versuchsanordnung der kinematographischen Untersuchungen; im Vordergrund die Zeitdehn-Filmkamera.

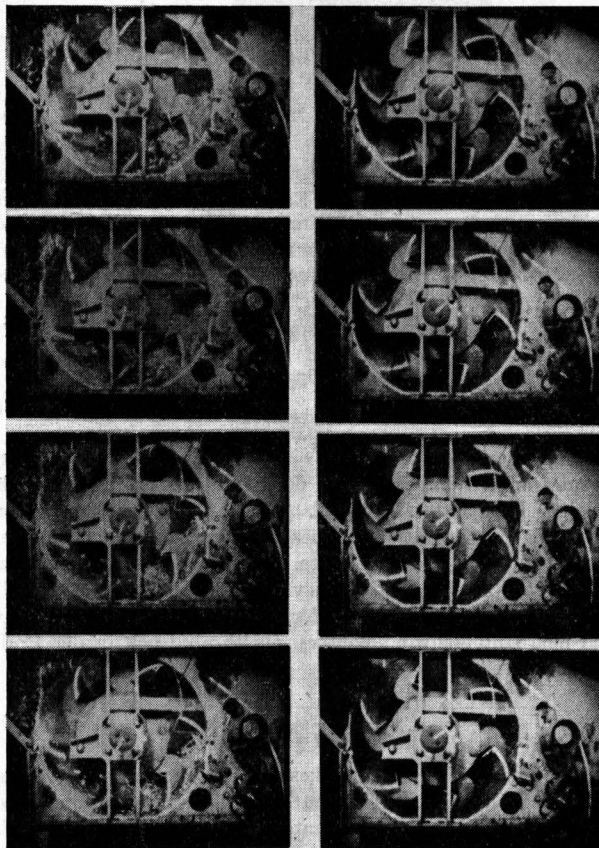


Bild 8. Zeitlupenaufnahmen vom Materialfluß in der Trommel.
links: Wurfblech C, Leitklappenstellung 0; Stroh mit 15% Feuchtegehalt; Durchsatz etwa 6 t/h
rechts: Wurfblech B, Leitklappenstellung 0; Klee gras mit 85% Feuchtegehalt; Durchsatz 8 t/h

Für die Zeitdehn-Filmaufnahmen der Gutförderung in der Trommel wurde es erforderlich, den Feldhäcksler entsprechend

umzurüsten. Es mußten möglichst alle tragenden Elemente aus dem Bildbereich verlegt und eine Seitenwand des Trommelgehäuses durch Plexiglas ersetzt werden. Die derart vorbereitete Versuchsmaschine zeigt Bild 7, ebenso die Beleuchtung, die Anordnung der Filmkamera (Objektivöffnung in der Höhe der Trommelmitte) sowie der Zeitmarkengeber auf der Trommelwelle. Um praxisnahe Aufnahmen des Materialflusses zu erhalten, wurden die Versuche mit geringer axialer Zuluft angestellt. Die repräsentativen Gutarten waren Stroh mit einem mittleren Durchsatz von 4 t/h, Klee gras mit 8 t/h und Silomais mit 12 t/h. Die mit 6 Wurfblechen gleicher Form ausgerüstete Trommel hatte bei allen Versuchen eine Umfangsgeschwindigkeit von 29,4 m/s bei einer theoretischen Häcksellänge von 15,2 mm. Da die Preßstranghöhe eine gute Kenngröße für den Durchsatz eines Feldhäckslers ist [18], wurde diese über eine Marke am Schwingarm hinter einem Wegraster im Bildbereich registriert. Die Bildfrequenz betrug überwiegend 2000, z. T. 4000 Bilder/s. Bild 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem aufgenommenen Forschungsfilm [34].

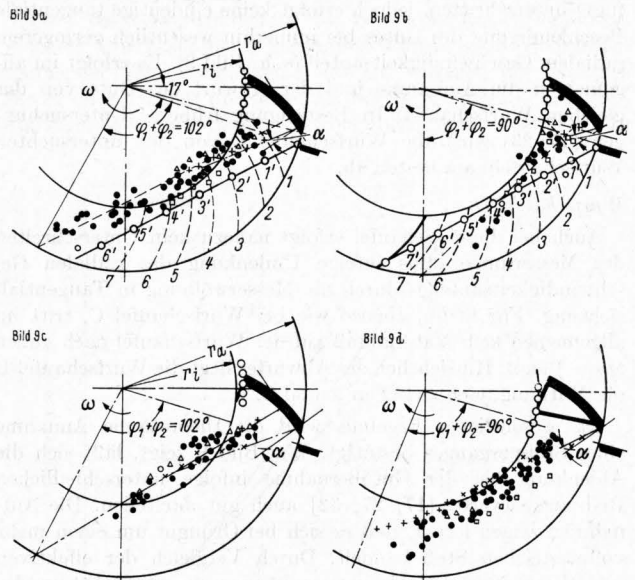


Bild 9. Graphische Darstellung der Teilchenbewegung in der Trommel bei verschiedenen Wurf schaufelformen und unterschiedlichem Schnittgut nach Zeitlupenaufnahmen.

Bild	Wurf schaufelform	Häckselgut	Stoßfaktor	1 bis 7 Messerstellungen 1' bis 7' theoretischer Weg eines Gutteilchens nach Gl. (3)
9a	A	Stroh	0,5	$r_a = 260 \text{ mm}$ $r_1 = 172 \text{ mm}$ (Wurf schaufel A)
9b	A	Grü ngut	0,1	$r_1 = 160 \text{ mm}$ (Wurf schaufel B und C)
9c	B	Stroh	0,35	$\omega = 113 \text{ 1/s}$
9d	C	Stroh	0,37	

Die Aufnahmen wurden mit einem Filmbetrachtungsgerät ausgewertet, wobei bevorzugte Gutteilchen in ihrer Bahn verfolgt und graphisch aufgetragen wurden, Bild 9. Für die Wurf schaufelform A und die Materialarten Stroh und Grü ngut ist außerdem die theoretische Bahn des Gutes nach Abschnitt 3.1 unter Verwendung des noch zu erläuternden Stoßfaktors eingezeichnet. In Kenntnis des Forschungsfilmes läßt sich demnach für die verschiedenen Wurf schaufelformen folgendes zusammenfassend sagen:

Wurf schaufel A

Bei etwa gleicher Preßstranghöhe und damit etwa gleicher Bauausnutzung der Maschine ist die Aufnahmephase bei Stroh und Klee gras grundverschieden. Infolge des geringeren Reibungswertes und der größeren Stoßzahl erhält Stroh eine größere radiale und insbesondere tangentielle Geschwindigkeitskomponente, löst sich daher stärker von der Wurf schaufel und unterschreitet z. T. den Messerinnenradius. Das Stroh wird dann nicht ausschließlich von dem Messer ausgeworfen, von dem es

geschnitten und beschleunigt wurde. Die Reibungsphase kann u. U. entfallen. Bei hohen Strohdurchsätzen bildet sich schließlich durch Übergleiten der Messer und einen unvollkommenen Abwurf ein Strohring in der Trommel aus. Weder für Kleegras noch für Stroh war der verfügbare Abwurfgehäusewinkel unter allen Umständen ausreichend. Kleegras unterschreitet den Messerinnenradius nicht, da es infolge nur geringer Voreilung bald wieder von der Wurfchaufel übernommen wird.

Wurfchaufel B

Bei Strohförderung ist gleichfalls Unterschreiten des Messerinnenradius möglich. Dabei kann das Wurfblech am Ende der Wurfchaufel den Strohmassenhaufen zerreißen, da es in der Bahn des Gutes liegt. Dies führt dann zu einer stärkeren Verwirbelung des Häckselgutes. Für die Länge der Aufnahme- und den Abwurf ergibt sich im wesentlichen der gleiche Materialfluß, wie bei der Wurfchaufel A.

Wurfchaufel C

Der Messerinnenradius wird von dem Strohhäcksel nur geringfügig unterschritten, jedoch erfolgt keine eindeutige tangential Beschleunigung des Gutes bei immerhin wesentlich geringerem radialem Geschwindigkeitsanteil (s. a. Bild 9). Es erfolgt im allgemeinen die Aufnahme und der Abwurf des Gutes von der gleichen Wurfchaufel. In Bestätigung früherer Untersuchungen [17; 23] wirft die Wurfchaufel C von den untersuchten Wurfchaufeln am besten ab.

Wurfchaufel D

Auch bei dieser Schaufel erfolgt nahezu kein Unterschreiten des Messerinnenradius infolge Umlenkung des radialen Geschwindigkeitsanteiles durch die Messerwölbung in Tangentialrichtung. Für Stroh, ebenso wie bei Wurfchaufel C, tritt im allgemeinen kein Materialfluß auf der Wurfchaufel nach außen ($\varphi_2 = 0$) auf. Hinsichtlich des Abwurfes liegt die Wurfchaufel D der Wirkung nach zwischen A und C.

Als wesentliches Ergebnis wird die theoretische Annahme eines Stoßvorganges bestätigt. Wie Bild 9 zeigt, läßt sich die Ablenkung bei der Gutübernahme infolge unterschiedlichen Reibungsbeiwertes [17; 27; 32] auch gut darstellen. Die Aufnahmen zeigen ferner, daß es sich bei Grüngut um einen mehr vollplastischen Stoß handelt. Durch Vergleich der effektiven und theoretischen Gutbewegung können die Stoßfaktoren der verwendeten Gutarten bestimmt werden. Diese betragen für Strohhäcksel 0,35 bis 0,5 und für Grünguthäcksel etwa 0,1.

Sowohl für Stroh wie für Grüngut weichen die Gehäusewinkel der Aufnahme- und Abwurfphase für die verschiedenen Wurfchaufelformen nur gering voneinander ab. Nach Bild 9 wird ferner der Materialfluß nach der Aufnahme und unter Berücksichtigung der Preßstranghöhe gut durch die theoretisch bestimmte Bewegungsgleichung dargestellt. Dies läßt den Schluß zu, daß die Bahn des Gutes nach der Aufnahme bei gleichem Watenwinkel und kleiner theoretischer Häcksellänge weitgehend unabhängig von der Wurfchaufelform ist; sie beeinflusst jedoch entscheidend den Abwurf, was durch die Untersuchungen an Wurfgebläsen bestätigt wird. Diese Aussage gilt für die durch die Wurfchaufelkonstruktion bestimmten Randbedingungen. Tatsächlich muß das Gut nicht von der beschleunigenden Wurfchaufel abgeworfen werden; jedoch ist der Abwurf abhängig vom Reibungsbeiwert und dem Stoßfaktor.

3.2 Experimentelle Ermittlung der Einflüsse auf die Wurfweite

Um die vorstehenden theoretischen und kinematographischen Untersuchungen zu untermauern, wurden weitere experimentelle

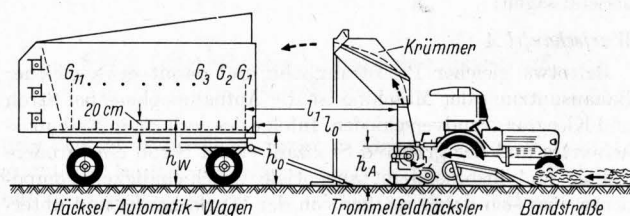


Bild 10. Wurfprüfstand zur Ermittlung der effektiven mittleren Wurfweite und deren Streuung.

Versuche mit repräsentativem Häckselgut (Welkgut, Rübsen, Stroh und Heu) angestellt.

Das Kriterium der Fördergüte einer Schneid-Wurf-Trommel für Feldhäcksler ist die erzielte Wurfweite; die Meßmethode für die effektive Wurfweite zeigt Bild 10. Nachteilig ist, daß Randeinflüsse das Ergebnis verfälschen bzw. geringe Unterschiede verdecken können und daß zur Sicherung der Ergebnisse eine relativ große Gutmenge erforderlich ist. Ein wesentlicher Vorteil ist jedoch bei dieser Meßmethode, daß neben der mittleren effektiven Wurfweite

$$s_w = \frac{G_1 l_1 + G_2 l_2 + \dots + G_n l_n}{\sum_1^n G_n} \text{ [m]} \quad (16)$$

auch die Streuung der Wurfweite erfaßt wird.

Da sich die Versuche nach der vorgenannten Methode schlecht nachfahren ließen, wurde ein elektronisches Meßverfahren entwickelt, das darin bestand, in einem Wurfprüfstand nach Bild 11 die Teilimpulse der Gutmasse am Auswurfkrümmerende zu messen. Dieses Meßprinzip hatte sich schon bei umfangreichen Untersuchungen der pneumatischen Förderung bei Barth und Mitarbeiter [3; 15; 31] bewährt.

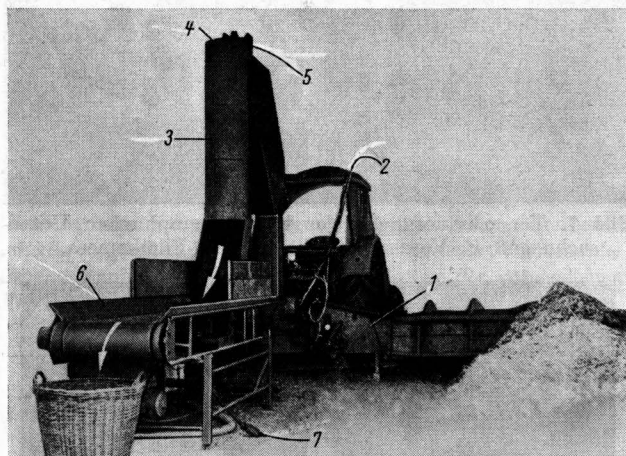


Bild 11. Wurfprüfstand zur Ermittlung der mittleren Gutgeschwindigkeit am Auswurfkrümmerende mittels Messung eines Teilimpulses der bewegten Gutmasse.

- 1 Versuchsfeldhäcksler
- 2 Meßkabel für Drehmoment der Trommel, Preßstranghöhe und Trommeldrehzahl
- 3 Versuchskrümmer und Abwurf
- 4 Prallplatte
- 5 Meßkabel für Prallplatten-Impuls
- 6 Bandwaage
- 7 Meßkabel für Bandwaage

Unter der Voraussetzung eines kontinuierlichen Massenstromes am Krümmerende ist der Strahldruckanteil senkrecht zu einer Prallplatte (Teilimpuls) ein Maß für die effektive Geschwindigkeit der Gutmasse. Diese wiederum bestimmt aufgrund der Wurfparabel die Wurfweite. Bei hoher Gutbeladung kann nach Weber [31] der Luftimpuls vernachlässigt werden. So ergibt sich für einen Anstellwinkel δ der Prallplatte, einen Durchsatz Q und eine Gutgeschwindigkeit v_M ein Strahldruck in der Prallplatten-Normalen zu

$$P_n = \frac{Q}{3,6 g} v_M \sin \delta \text{ [kp]} \quad (17)$$

Zur Messung des Strahldruckes wird die Prallplatte als Biegestab ausgebildet; die registrierte mittlere Diagrammhöhe h^* des Prallplattenschriebes ist unter Berücksichtigung des Eichfaktors E_I

$$h^* = \frac{Q v_M \sin \delta}{3,6 E_I g} \text{ [mm]} \quad (18)$$

und bei Zusammenfassung der Konstanten

$$h^* = c_1 Q v_M \text{ [mm]} \quad (19)$$

Demnach ist die mittlere Meßgröße h^* dem Durchsatz und der mittleren Materialgeschwindigkeit proportional. Auf eine Um-

rechnung von h^* in die Gutgeschwindigkeit v_M wurde verzichtet, da für die Abschätzung der Größe der Wurfeinflüsse die Dimension der Meßgröße unbedeutend ist.

Um die Meßgröße h^* unabhängig vom Durchsatz zu machen, führt man zweckmäßigerweise den Wurffaktor K ein:

$$K = \frac{h^* \left[\frac{\text{mm}}{t/h} \right]}{Q} = \frac{c_1 Q v_M}{Q} = c_1 v_M \quad (20),$$

der demnach der Auswurfgeschwindigkeit des Guts am Krümmerende direkt proportional ist.

Bei den Versuchen wurden außerdem gleichzeitig das Trommeldrehmoment, die Preßstranghöhe und die Trommeldrehzahl gemessen. Der Durchsatz wurde anfangs mit einer Bandwaage, später jedoch über die Menge in der Zeiteinheit als mittlerer Durchsatz bestimmt.

Die Vorteile des Wurfprüfstandes nach dem Prinzip der Messung des Teilimpulses unter Verwendung einer Prallplatte sind der kleinere bauliche Aufwand, die exakten Meßwerte auch bei geringen Unterschieden sowie geringere erforderliche Gutmengen. Nachteilig ist, daß nur die effektive mittlere Auswurfgeschwindigkeit, jedoch nicht deren Streuung erfaßt wird.

Von den eingangs erwähnten zehn Einflußfaktoren auf die Wurfweite sollen nur vier, die für die Verwendung einer Schneid-Wurf-Trommel in Exaktfeldhäckslern von besonderer Bedeutung sind, herausgegriffen werden: die Trommelumfangsgeschwindigkeit, die Anzahl der Wurfchaufeln, die Luftgeschwindigkeit und die Wurfchaufelform. Dabei wird versucht, die mögliche Beeinflussung dieser Größen im Sinne einer Optimierung abzuschätzen.

3.21 Einfluß der Trommelumfangsgeschwindigkeit

Bedingt durch den Zusammenhang von Wurf- und pneumatischer Förderung ist bei einer Untersuchung des Einflusses der Trommelumfangsgeschwindigkeit auf die Wurfweite stets auch der der Luftförderung mit zu berücksichtigen. Im Hinblick auf einen möglichst geringen Leistungsbedarf kommt der Wahl der Trommelumfangsgeschwindigkeit eine besondere Bedeutung zu. Nach Bild 12 sinkt offensichtlich mit steigender Umfangsgeschwindigkeit deren Einfluß, was in Widerspruch zu dem Untersuchungsergebnis von Wurfgebläsen steht, nachdem die Förderhöhe proportional dem Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit ist. Aus Gründen der Funktionssicherheit sollte der Arbeitspunkt einer Feldhäckslertrommel möglichst im flach ansteigenden Bereich der Kurven in Bild 12 liegen, damit sich ein oftmals unvermeidlicher Drehzahlabfall nur geringfügig auswirkt, d. h., die Trommelumfangsgeschwindigkeit muß mindestens 28,5 m/s betragen. (Der heute übliche mittlere Drehzahlabfall im Einsatz der Feldhäckslertrommel beträgt etwa 4% [18].)

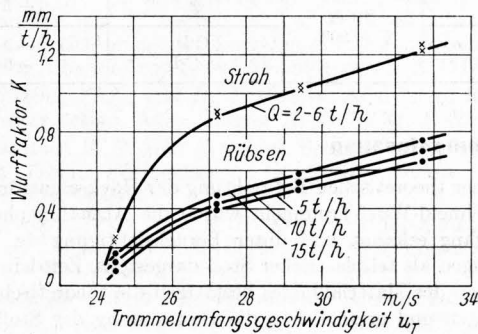


Bild 12. Abwurfgeschwindigkeit des Guts, ausgedrückt durch den Wurffaktor K nach Gl. (20), in Abhängigkeit von der Trommelumfangsgeschwindigkeit.

Feuchtegehalt des Strohes $U = 20\%$
 Feuchtegehalt der Rübsen $U = 91\%$

Ist die Wurfweite nicht ausreichend und der Kurvenanstieg im flachen Bereich zu gering, so verschiebt z. B. eine geeignete Wurfblechform oder eine erhöhte Luftförderung die Kurve nach oben. Dabei wird sich der Knick in den Kurven nicht unwesentlich verschieben. Amerikanische Untersuchungen ermittelten die

erforderliche Umfangsgeschwindigkeit für ausgeführte Konstruktionen zu 30 bis 33 m/s.

Die in Abhängigkeit von der Trommelumfangsgeschwindigkeit gemessene Gutgeschwindigkeit (ausgedrückt durch den Wurffaktor K) deckt sich sehr gut mit den Untersuchungsergebnissen der Wurfgebläse von *Raney* und *Liljedahl* [23] und denen von *Kampf* [17] im Bereich bis 25 m/s, womit auch die Brauchbarkeit der Teilimpulsmessung nachgewiesen wird.

Auffallend ist die bei Rübsen mit dem Durchsatz ansteigende Abwurfgeschwindigkeit (ausgedrückt durch K), während Stroh hiervon unbeeinflusst ist. Da ein erhöhter Durchsatz auch eine größere Gutmenge je Wurfchaufel bedeutet, deutet die vorgenannte Tendenz auch den Einfluß der Wurfchaufelzahl auf die Wurfweite an.

3.22 Einfluß der Wurfchaufelzahl

In Bild 13 ist die Abwurfgeschwindigkeit des Guts in Abhängigkeit vom Durchsatz bei verschiedener Wurfchaufelzahl dargestellt. In Bestätigung der Tendenz von Bild 12 steigt bei Rübsen die Geschwindigkeit des Guts am Auswurfeinde bei gleichem Durchsatz bei 3 gegenüber 6 Messern (d. h. mit zunehmender Wurfchaufelbeladung) an, wogegen ein einzelnes Messer offensichtlich überlastet ist und der verfügbare Gehäusewinkel zum einwandfreien Abwurf nicht mehr ausreicht. In

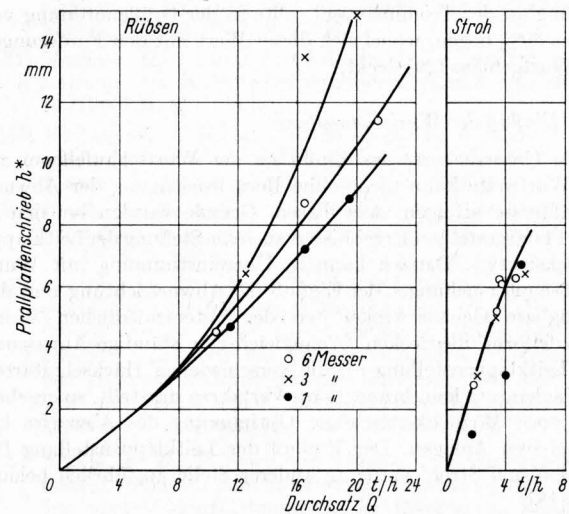


Bild 13. Abwurfgeschwindigkeit des Guts, ausgedrückt durch die Meßschreibhöhe h^* nach Gl. (18), in Abhängigkeit vom Durchsatz bei verschiedener Anzahl der Wurfchaufeln.

Wurfchaufel A; kein Krümmer
 Leitklappenstellung 1 (— 5 Grad)

Zusammenfassung der Ergebnisse läßt sich als grober Richtwert für Grüngut eine optimale Wurfchaufelbeladung zu etwa 0,1 kg/Wurfchaufel angeben. Bei Stroh wirkt sich die größere Luftförderung und damit Luftgeschwindigkeit bei steigender Messerzahl aus, so daß sich keine meßbaren Unterschiede bei verschiedener Wurfchaufelbeladung ergeben.

3.23 Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Zur Abschätzung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit wurde die Vergrößerung der Wurfweite Δs_W bei zunehmender Luftförderung mit der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit Δv_L am Auswurfurmende ins Verhältnis gesetzt. Hierbei erfolgt die Bestimmung der Luftgeschwindigkeit nach den bekannten Verfahren [1], während die Änderung der Wurfweite auf dem Prüfstand nach Bild 10 ermittelt wurde. Für verschiedene Feuchtegehalte ergeben sich die folgenden Durchschnittswerte, welche die Vergrößerung der Wurfweite pro Luftgeschwindigkeitserhöhung von 1 m/s angeben:

für $U = 60\%$ Feuchtegehalt (Gras angewalzt)

$$\Delta s_W / \Delta v_L = 0,204 \left[\frac{\text{m}}{\text{m/s}} \right]$$

für $U = 20\%$ Feuchtegehalt (Stroh)

$$\Delta s_w / \Delta v_L = 0,283 \left[\frac{\text{m}}{\text{m/s}} \right]$$

Demnach ist einer Steigerung der Wurfweite durch Erhöhung der Luftgeschwindigkeit eine Grenze gesetzt und nur bei Trokengut wirkungsvoller zu erreichen.

Im Zusammenhang damit sei noch etwas über die bislang starke saugseitige Luftdrosselung bei Trommelfeldhäckslern gesagt. Der Gebläsewirkungsgrad lag infolge der für die Förderung aller Gutarten erforderlichen konzentrischen Gehäuse sowie dem Spalt zwischen Wurfchaufel und Gehäuseseitenwand und der unregelmäßigen Luftansaugung und Ausblasung in der Größenordnung von 0,1 bis 0,15. Die Wirkungsgrade bei reinen Wurfgebläsen mit konzentrischen Gehäusen erreichen bei optimaler Wurfchaufelzahl immerhin etwa 0,45. Da nun bei Trommelfeldhäckslern die Senkung der saugseitigen Drosselung eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit um etwa 6 m/s bei einer Verdoppelung des Gebläsewirkungsgrades und relativ geringem Mehrleistungsbedarf bringt, sollten Schneid-Wurf-Trommeln in Trommelfeldhäckslern mit möglichst geringer Luftdrosselung eingesetzt werden. Diese Tendenz ist im übrigen auch in den letzten Jahren bei neueren deutschen und amerikanischen Trommelfeldhäckslern erkennbar geworden. Um so mehr, als erst mit erhöhter Luftförderung die sichere Förderung von Heu und Stroh möglich wurde. Der Flächenanteil der axialen Luftansaugöffnung an der Trommelwand sollte in der Größenordnung von 40 bis 50% liegen, wobei sich dieser Wert mit den Forderungen für Wurfgebläse [29] deckt.

3.24 Einfluß der Wurfchaufelform

Die Untersuchung des Einflusses der Wurfchaufelform auf die Wurfweite kann nicht ohne Berücksichtigung der Abwurfverhältnisse erfolgen. Aus diesem Grunde wurden bei den in Bild 14 dargestellten Ergebnissen auch die Stellung der Leitklappe berücksichtigt. Danach kann in Übereinstimmung mit Wurfgebläseuntersuchungen der Einfluß der Abwurfrichtung und der verfügbare Gehäusewinkel den der unterschiedlichen Wurfchaufelform überdecken. Wenngleich eine ständige Anpassung der Leitklappenstellung an die verschiedenen Häckselgutarten im Feldeinsatz kein brauchbares Verfahren darstellt, so ergeben sich doch Möglichkeiten einer Optimierung des Abwurfes bei stationären Anlagen. Der Einfluß der Leitklappenstellung für Rübsen und Stroh wurde an anderer Stelle ausführlich behandelt [18].

Unter der Voraussetzung einer für alle Häckselgutarten tauglichen Wurfchaufelform, sind nach Bild 14 für den Abwurf, insbesondere für Stroh, die Wurfchaufelform C und D den Formen A und B vorzuziehen. Dies war in Kenntnis analoger Wurfgebläseuntersuchungen [23] sowie der Zeitdehn-Filmaufnahmen zu erwarten.

Faßt man alle Ergebnisse zusammen und berücksichtigt alle möglichen Häckselgutarten, so ist bei stärker gewölbten Messern eine Erhöhung der Wurfweite um 15 bis 25% zu erwarten. *Alichaskin* und *Chomenko* [2] kommen auf einen Wert von 10 bis 20%. Ergänzend sei vermerkt, daß die Wurfchaufelform B keine Verbesserung der Wurfweite bringt und bei Stroh infolge dem bei den Zeitdehn-Filmaufnahmen ersichtlichen Zerreißen des Materials sogar verschlechternd wirken kann. Die Erhöhung der Gutgeschwindigkeit bei den Formen C und D ist bei Stroh in gewissem Umfang auf die größere Luftförderung zurückzuführen.

Bild 14 zeigt, daß das Trommeldrehmoment, besonders bei Rübsen, bei den Wurfblechformen C und D infolge der größeren Verlustreibung beim Schleppen des Gutes am Gehäuse, der z. T. größeren Gutbeschleunigung und in geringerem Maße der höheren Luftförderung um etwa 15 bis 25% über dem der Formen A und B liegt. Damit werden entsprechende Untersuchungen von *Kampf* [17] und *Reznik* [24; 25] bestätigt. Eine Vergrößerung der Messerwölbung verschiebt den Drehmomentbedarf offensichtlich in den Bereich radialer Wurfchaufeln. Bei Verringerung der Schleppphasenlänge ist dieser Einfluß weniger deutlich.

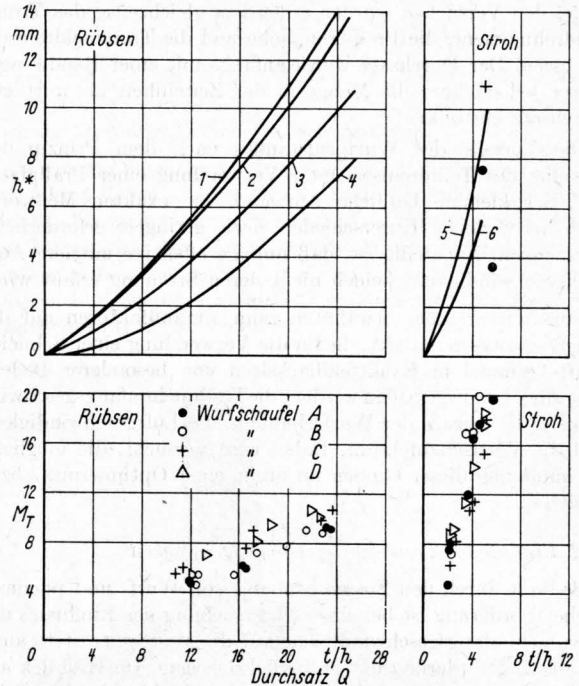
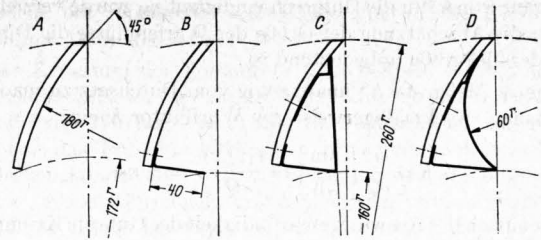


Bild 14. Abwurfgeschwindigkeit des Gutes, ausgedrückt durch die Meßschriebhöhe h^* nach Gl. (18), und Antriebsdrehmoment M_T in Abhängigkeit vom Durchsatz bei verschiedener Wurfchaufelform und Leitklappenstellung.

Kurve	Gutart	Wurfchaufelform	Leitklappenstellung (nach Bild 6) Grad
1	Rübsen $U = 91\%$	A B	+ 5
2		A B C D	- 5
3		C	+ 5
4		D	+ 5
5	Stroh $U = 20\%$	A B	- 5
		B	+ 5
6		C D	- 5
		A C D	+ 5

4 Zusammenfassung

Bei einer theoretischen Betrachtung der Häckselgutförderung durch Schneid-Wurf-Trommeln wurde die Aufnahmephase als Stoßvorgang erkannt und unter Berücksichtigung der Randbedingungen als teilplastischer Stoß dargestellt. Zeitdehn-Filmaufnahmen des Materialflusses bestätigen die theoretischen Betrachtungen und ermöglichen die Bestimmung der Stoßzahlen von Stroh zu etwa 0,4, und von Grüngut zu etwa 0,1. Die theoretischen und kinematographischen Untersuchungen ergaben, daß bei entsprechender Wurfchaufelform, geringem Reibungsbeiwert zwischen Häckselgut und Wurfchaufel sowie einer bestimmten Stoßzahl das Gut über die aufnehmende Wurfchaufel gleitet und so erst von einer der nachfolgenden abgeworfen wird.

In experimentellen Untersuchungen mittels eines Wurfprüfstandes nach dem Prinzip der Teilimpuls-Messung wurden die theoretischen Ergebnisse bestätigt und erweitert. Von den Einflußfaktoren auf die Wurfweite wurden die Trommelumfangsgeschwindigkeit, die Wurfchaufelzahl, die Luftgeschwindigkeit,

