

Intensivzerkleinerung von Halmfutter ohne Exaktschnitt

Von Werner Dervedde, Braunschweig *)

DK 631.363.3:633.004.12

Funktionssicherheit, Durchsatz, Arbeitsqualität und Wartungsaufwand sind bestimmende Beurteilungskriterien für landwirtschaftliche Maschinensysteme. Der Exaktfeldhäcksler als eine der Schlüsselmaschinen in der Halmfütterernte konnte diesen Forderungen bisher nicht immer genügen. Dies führte zur Frage, ob sich nicht — analog zu der Entwicklung bei den Mähwerken — ein Freischnitthäckslersystem entwickeln läßt, das den oben genannten Forderungen insbesondere im Hinblick auf die bisher nicht befriedigende Arbeitsqualität besser entspricht. Die nachfolgende Arbeit berichtet über entsprechende Versuche und deren Ergebnisse.

1. Einleitung

Der Exaktfeldhäcksler in der Bauart des Trommelhäckslers hat in den letzten Jahren eine starke Entwicklung erfahren, die insbesondere durch seine konkurrenzlosen Einsatzmöglichkeiten in der Silomaisenernte bedingt ist. Er ist wesentlich stabiler und damit auch funktionssicherer geworden. Hinzu kommt, daß eine weiterhin noch bestehende Empfindlichkeit gegenüber Fremdkörpern wie Steinen oder Wenderzinken bei Silomais keine große Rolle spielt, da keine Pick-up-Vorrichtung solche Fremdkörper aufnimmt. Schwierigkeiten bestehen noch beim Häckseln von angewelktem Gras für die Bereitung von Welksilage. Hier wirken sich mangelnde Schärfe der Messer und ein durch das Schärfen der Messer sich vergrößernder Abstand zwischen Messerkante und Gegenschneide sehr nachteilig auf die Häckselqualität und den Leistungsbedarf

aus. Beides ist nur durch einen erhöhten Wartungs- und Rüstzeit-aufwand zu umgehen. In der Bereitung von Welkeheusilage sowie der übrigen Halmfütterernteketten ergeben sich daher am ehesten Chancen für ein robusteres Schlegelhäckslersystem. Daher wurden mit dem nachfolgend beschriebenen Schlegelhäcksler auch vorwiegend Versuche mit Gras verschiedener Feuchtigkeitsgehalte gefahren und nur wenige Vergleichsversuche mit Silomais.

2. Beschreibung des untersuchten Schlegelhäckslersystems und der Versuchsdurchführung

Zur Beurteilung von Entwicklungsmöglichkeiten wurden Vorversuche mit verschiedenen Freischnittsystemen durchgeführt. Sie ergaben, daß ein System mit gelenkig aufgehängten, geraden Messern für systematische Untersuchungen besonders geeignet ist. Es bietet die Möglichkeit, die Werkzeuge so anzuordnen, daß sie Fremdkörpern ausweichen können. Die Werkzeuge lassen sich leicht austauschen. Durch Erhöhung der Messerzahl kann man in weit stärkerem Maße als beim Trommelhexakthäcksler die wirksame Schneidenlänge vergrößern und damit möglicherweise unter gleichen Einsatzbedingungen die Standzeit der Maschine gegenüber dem Trommelhäcksler verbessern.

Wie beim Exakthäcksler muß für den Schlegelhäcksler gefordert werden, daß man die Schnittlänge den verschiedenen Anforderungen, wie sie etwa für die Bereitung von Silage, Belüftungsheu oder heißluftgetrocknetem Grüngetreide gestellt werden, anpassen kann. Dies ist bisher ein besonderer Mangel der bekannten Schlegelhäcksler, so daß die Möglichkeiten zur Steuerung der Häcksellänge einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten. Daneben war der Einfluß der Werkzeuggeschwindigkeit auf den Schnittvorgang zu untersuchen, da diese sowohl für die Konstruktion wie auch für den Leistungsbedarf von Bedeutung ist. Die gegenüber Exakthäckslern höhere Werkzeuggeschwindigkeit ist bedingt durch die Tatsache, daß bei Freischnittsystemen die Reaktionskraft für den Schnitt nicht durch ein Gegenwerkzeug, sondern theoretisch nur durch die Massenträgheit des zu schneidenden Materials erzeugt wird. Hierfür läßt sich nach Dobler [1] eine kritische Geschwindigkeit definieren, die bei konstantem Schnittwiderstand in erster Linie abhängig ist von der Massenbelegung und der Biegesteifigkeit der Halmes. In Wirklichkeit werden die Zusammenhänge noch dadurch

*) Dr. sc. agr. Werner Dervedde ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig - Völkenrode.

kompliziert, daß der Schnittwiderstand nicht konstant, sondern in starkem Maße vom Feuchtegehalt und der Biegesteifigkeit abhängt. Außerdem wird auch bei vielen Freischnittsystemen wenigstens ein Teil der Reaktionskräfte durch Gegenwerkzeuge abgestützt, die jedoch gegenüber der Schneidkante nicht genau fixiert sind. Für das untersuchte System wurde eine kritische Werkzeuggeschwindigkeit für Gras mit verschiedenen Feuchtegehalten von etwa 50 m/s ermittelt. Bei allen anderen Versuchsparametern wurde daher eine Werkzeuggeschwindigkeit von 60 m/s gewählt, um einen sicheren Schnitt zu gewährleisten. Eine Änderung der Werkzeuggeschwindigkeit und damit der Trommeldrehzahl zur Beeinflussung der Häcksellänge im Bereich unterhalb von 60 m/s scheidet damit aus.

Im Bereich oberhalb von 60 m/s erscheint sie aus Gründen der Sicherheit und des Leistungsbedarfs nicht sinnvoll. Für die Steuerung der Häcksellänge verbleiben die Änderung der Messerzahl, des Messerabstandes, der Zuführgeschwindigkeit sowie der Einbau verschiedener Nachzerkleinerungssysteme. Die Änderung der Zuführgeschwindigkeit setzt ein Zwangszuführungssystem wie bei Exakthäckslern voraus. Für das untersuchte System mit gelenkig aufgehängten radial angeordneten geraden Messern wurde daher ein Zuführsystem mit Scheibenwalzen entwickelt, wie auf dem Bild 1 zu erkennen ist. Die Messer der Trommel zerkleinern das Halmgut während es noch von den Zuführwalzen wenigstens teilweise festgehalten wird. Wie die Versuche ergeben haben, wird hierdurch der Schnitt wesentlich erleichtert und verbessert. Die Versuche haben jedoch auch gezeigt, daß man durch die Änderung der Zuführgeschwindigkeit in einem Bereich von 1 bis 3 m/s die Häcksellänge nur sehr unwesentlich beeinflussen kann. Eine direkte Abhängigkeit ergibt sich dagegen von dem axialen Abstand s der Messer.

Bedingt durch die regellose Richtung des zugeführten Halmgutes wird in grober Näherung eine mittlere Häcksellänge erzeugt, die etwa doppelt so groß ist wie der axiale Messerabstand. Nach den vorliegenden Erfahrungen ist ein geringerer Messerabstand als 20 mm konstruktiv schwierig zu beherrschen. Soll daher mit dem beschriebenen Schlegelhäcksler die Häcksellänge unter 40 mm verringert werden, so ist dies nur mit Nachschneidesystemen – auch Recutter genannt – möglich.

Nachschneidesysteme haben die Aufgabe, den Materialfluß so zu steuern, daß das Halmgut so oft in den Eingriffsbereich der Zerkleinerungswerkzeuge gelangt, bis die gewünschte Häcksellänge erreicht ist. Die Halme mit der gewünschten Länge sollen möglichst schnell abgeschieden werden, um eine weitergehende Zerkleinerung zu vermeiden. Von den Hammermühlen her ist das Mantelsieb seit langem als Nachschneide- und Abscheidesystem bekannt. Es wird neuerdings auch bei Exakttrommelhäckslern zur Nachzerkleinerung der Lieschen bei Mais eingesetzt. Beim Mantelsieb wirken die Lochkanten als Gegenwerkzeug und die Lochgröße bestimmt den Zerkleinerungsgrad. Bei Strohhäckslern wird vielfach ein feststehender Kamm als Nachschneidesystem verwendet. Durch die Zahl der Käme und den Abstand der Käme läßt sich der Zerkleinerungsgrad beeinflussen.

In Bild 2 ist eine Reihe von möglichen Nachschneidesystemen dargestellt, die in die Untersuchungen einbezogen wurden. Gegenüber dem in dem Bild 1 dargestellten Häcksler wurde bei diesen Varianten jeweils die untere Zuführwalze weggelassen. Die Maschinenvariante 2 ist mit einem Mantelsieb ausgestattet, das aus zentrisch zur Achse angeordneten Vierkantstäben mit veränderbarem Abstand gebildet wird. Die Versuchsergebnisse mit diesen drei bekannten Systemen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei trockenem Gras bis zu einem Feuchtegehalt von 65 % ist der Zerkleinerungserfolg gut und der Durchsatz befriedigend. Bei feuchterem Material setzt sich das Mantelsieb ziemlich schnell zu und der Durchsatz geht gegen Null. Auch bei dem System mit mehreren Kämmen nimmt der Durchsatz ab, die Zwischenräume setzen sich zu und die Zerkleinerung wird ungleichmäßig. Die Maschinenvariante 1 befriedigt trotz relativ guter Zerkleinerungswirkung nicht wegen mangelnder Steuerbarkeit der Häcksellänge.

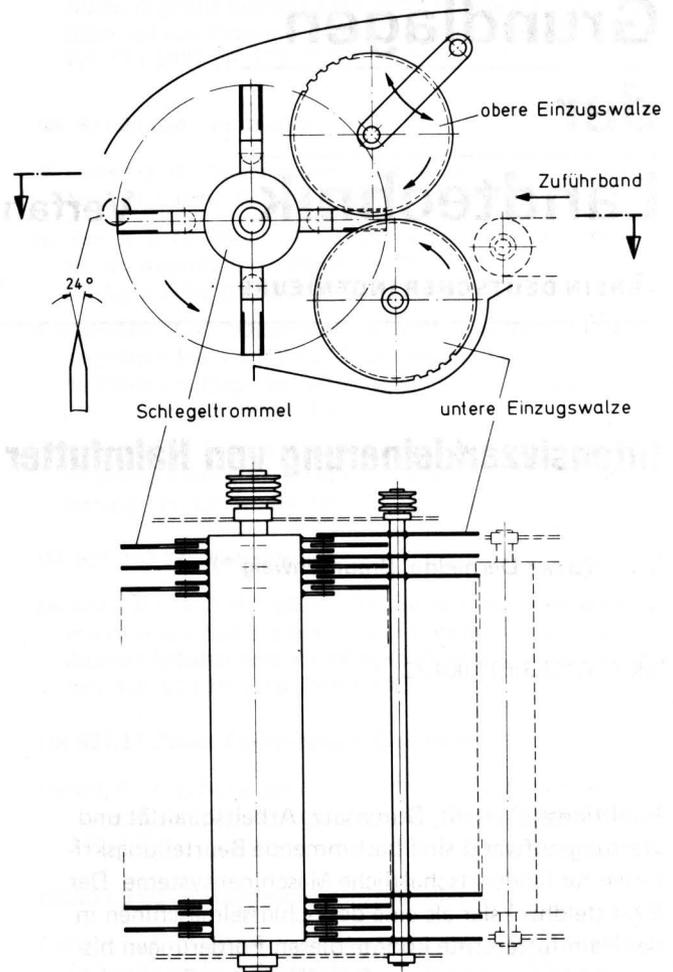


Bild 1. Schematische Darstellung des Versuchsschlegelhäckslers.

Es wurden daher Nachschneidesysteme mit rotierenden Werkzeugen entwickelt und erprobt, die auch bei frischem Gras noch einwandfrei arbeiten. Bei der Maschinenvariante 3 wurde der feststehende Kamm der Variante 1 durch eine aus gezahnten Scheiben bestehende Walze ersetzt. Bei der Variante 5 wurden die Vierkantstäbe der Variante 2 durch ineinandergreifende Zahnwalzen ersetzt. Und schließlich wurden bei der Maschinenvariante 6 die Käme der Variante 4 durch Kammwalzen aus Flacheisensternen ersetzt.

Mit diesen Maschinenvarianten 3, 5 und 6 wurden in allen Versuchen Durchsatzleistungen erzielt, die denen vergleichbarer Exakthäcksler entsprechen. Der spezifische Arbeitsbedarf ist gegenüber den Systemen mit festen Nachschneidesystemen infolge geringerer Reibung wesentlich geringer. Er betrug bei der Maschinenvariante 6 bei frischem Gut $3,5 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ gegenüber $6,5 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ bei der Maschinenvariante 4. Bei trockenem Gras mit Feuchtegehalten bis zu 25 % ist der spezifische Arbeitsbedarf mit etwa $2 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ erheblich niedriger und bei den verschiedenen Systemen nahezu gleich. Der genannte Arbeitsbedarf bezieht sich dabei auf eine Messerschärfe mit einem durchschnittlichen Schneidenradius von 0,07 mm. Dieser Radius ergab sich aus dem Verschleiß nach etwa 8 t Trockenmassedurchsatz bei gehärteten Schlegelmessern mit 24° Watenwinkel. Alle hier beschriebenen Systeme benötigen jedoch noch ein separates Förderorgan, so daß bei Leistungsvergleichen mit Exakthäckslern dessen Leistungsbedarf noch hinzu gerechnet werden muß.

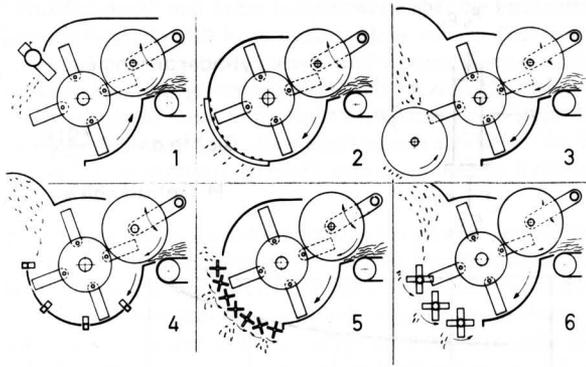


Bild 2. Versuchshäcksler mit verschiedenen Nachschneidesystemen, Maschinenvarianten 1 ÷ 6.

3. Eigenschaften des Häcksels

Als wichtigstes Vergleichskriterium zu den Exakthäckslern ist die Arbeitsqualität, gemessen über die Häckseigenschaften, anzusehen. Für die Beurteilung der Arbeitsqualität sind folgende Häckseigenschaften zu bestimmen, die für die einzelnen Berge- und Konservierungsverfahren von unterschiedlicher Bedeutung sind: die Halmlängenverteilung, die Verdichtbarkeit bei verschiedenen Drücken, die Scherspannung in Haufwerken und die Trocknungsgeschwindigkeit. Die Halmlängenverteilung ist für die Praxis ein weniger aussagekräftiges Kriterium als die übrigen. Sie ergibt jedoch einen guten Vergleichsmaßstab für den Zerkleinerungsgrad der einzelnen Versuchsvarianten. Die Halmlängenverteilung wird üblicherweise mit Hilfe von Siebanalysen ermittelt. Zu den Ergebnissen von Siebanalysen ist anzumerken, daß sie nicht die genaue Halmlängenverteilung ergeben, insbesondere nicht bei Schlegelhäcksler, das eine wollige Struktur aufweist. Man gewinnt jedoch bei Konstanthalten der Probenmenge, des Feuchtegehaltes, der Siebdauer, der Schwingungsamplitude und der Schwingfrequenz eine qualitative Aussage über die Wirkung des untersuchten Parameters auf den Zerkleinerungsgrad.

In den folgenden Bildern soll daher zunächst der Einfluß verschiedener Parameter auf den Zerkleinerungsgrad an Hand von Diagrammen mit den Rückstandskennlinien der Siebanalysen dargestellt werden. Rückstandskennlinien geben an, welcher Anteil der Halmlängen größer ist als der auf der Abszisse aufgetragene Sieblochdurchmesser.

Das Diagramm in **Bild 3** gibt das Zerkleinerungsergebnis der Maschinenvarianten 1, 3, 5 und 6 bei frischem Halmgut wieder. Zum Vergleich ist die Kurve von Exakthäcksler mit 6 mm theoretischer Häcksellänge eingezeichnet. Das Diagramm zeigt, daß Systeme mit einem Kamm als Nachschneideorgan – feststehend und rotierend – eine bessere Wirkung erzielen als die Systeme mit den Zahnwalzen bzw. mit der Scheibenwalze.

Bei trockenem Material wird die Zerkleinerungswirkung bei allen Systemen besser. Durch die mit der Trocknung verbundene Behandlung ist die Verflechtung des Halmgutes größer, wodurch eine Orientierung parallel zu den Messerkanten durch die Zuführwalzen erschwert wird.

Das Diagramm in **Bild 4** zeigt die Möglichkeit, den Zerkleinerungsgrad über die Drehzahl der als Nachschneidesystem benutzten Sternwalzen zu steuern. Mit wachsender Drehzahl im Bereich von 100 - 400 U/min wird das Material schneller abgeschieden. Dadurch nimmt die Zerkleinerung ab. Bei einer Steigerung der Drehzahl über 400 U/min nimmt die Zerkleinerung wieder zu, da jetzt offenbar der Einfluß der wachsenden Zahl von Gegenwerkzeugen den der schnelleren Abscheidung übertrifft. Die beste Zerkleinerung ergibt sich, wenn die Walzen nicht angetrieben werden, da

sich deren Drehzahl dann dem jeweiligen Materialfluß anpassen kann. Auf diese Weise läßt sich eine selbsttätige Regelung des Zerkleinerungsgrades in Abhängigkeit vom Drehmoment an der Trommelwelle ermöglichen.

Wie bereits dargelegt, gibt die Halmlängenverteilung nur einen mittelbaren Wert für die Qualität von Halmguthäcksler an. Aussagekräftiger für die Praxis sind die Eigenschaftswerte, die für den jeweiligen Verwendungszweck des Häcksels bestimmend sind. Eine wichtige Eigenschaft ist beispielsweise die Verdichtbarkeit, sofern das Häcksel siliert oder brikettiert werden soll.

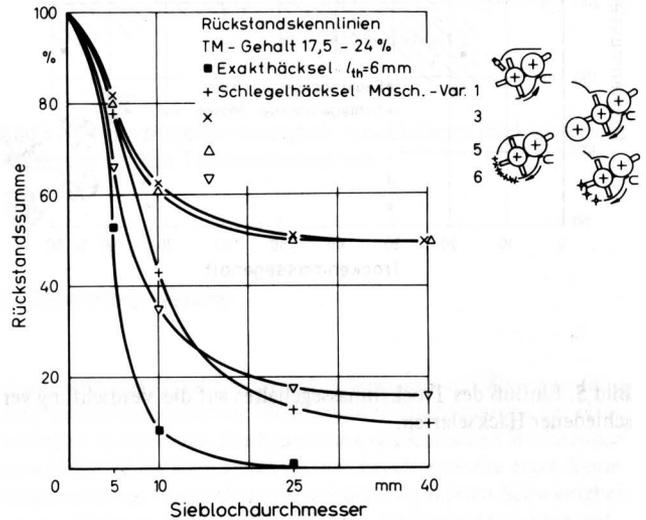


Bild 3. Halmlängenverteilung bei verschiedenen Häckslersystemen, dargestellt als Rückstandssumme in Abhängigkeit von der Größe der Siebbodenöffnungen.

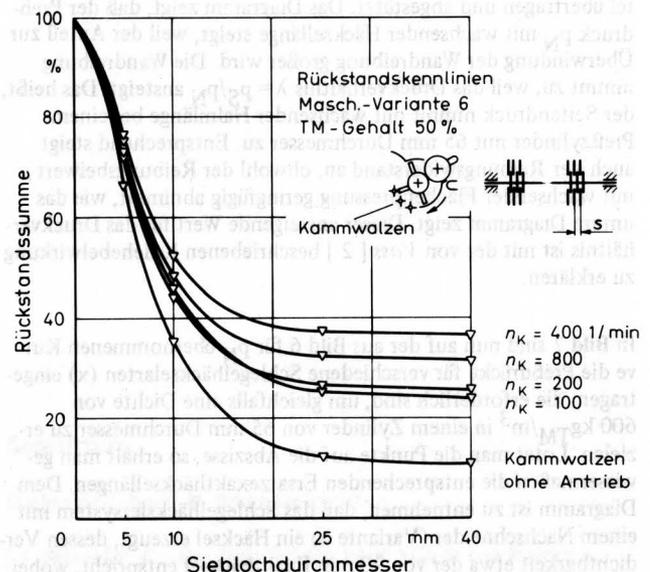


Bild 4. Halmlängenverteilung in Abhängigkeit von der Drehzahl der Kammwalzen, dargestellt als Rückstandssumme in Abhängigkeit von der Größe der Siebbodenöffnungen.

In Bild 5 ist die Verdichtbarkeit der verschiedenen Häckselarten in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt bei einer Flächenpressung von 0,1 bar, wie sie etwa in einem Hochsilo in der oberen Hälfte auftritt, dargestellt. Das Diagramm zeigt, daß die Verdichtbarkeit der verschiedenen Schlegelhäckselvarianten in weiten Bereichen der des 6 mm Exakthäckfels entspricht und nur im Welkbereich eine relative Überlegenheit des Exakthäckfels besteht.

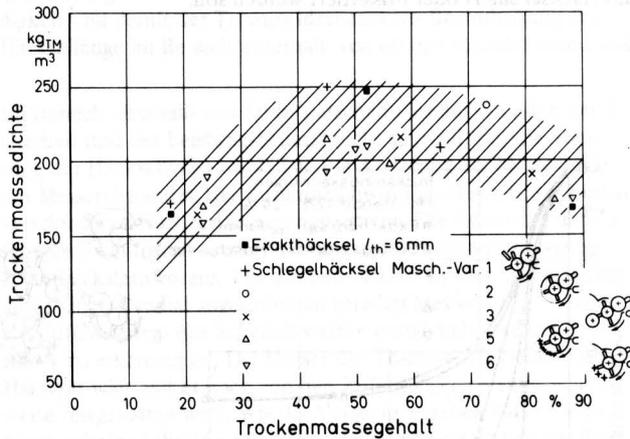
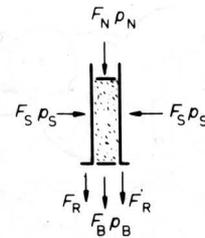


Bild 5. Einfluß des Trockenmassegehaltes auf die Verdichtung verschiedener Häckselarten.

Von Interesse ist auch die Verdichtbarkeit von Häcksel in einer Strangpresse. In Bild 6 sind beispielsweise Meßergebnisse über den Einfluß der Häcksellänge von Exakthäcksel auf die verschiedenen Preßdrücke in einem Zylinder von 65 mm Durchmesser aufgezeichnet. In dem Diagramm sind die jeweils bei einer Dichte von $\rho = 600 \text{ kg}_{\text{TM}}/\text{m}^3$ gemessenen Normaldrücke p_N am Preßstempel und p_B am Preßzylinderboden über der Häcksellänge aufgetragen. Die Differenz zwischen dem Druck am Preßstempel und am Preßboden wird über die Wandreibung auf den Preßzylindermantel übertragen und abgestützt. Das Diagramm zeigt, daß der Preßdruck p_N mit wachsender Häcksellänge steigt, weil der Anteil zur Überwindung der Wandreibung größer wird. Die Wandreibung nimmt zu, weil das Druckverhältnis $\lambda = p_S/p_N$ ansteigt. Das heißt, der Seitendruck nimmt mit wachsender Halmlänge bei einem Preßzylinder mit 65 mm Durchmesser zu. Entsprechend steigt auch der Reibungswiderstand an, obwohl der Reibungsbeiwert μ mit wachsender Flächenpressung geringfügig abnimmt, wie das untere Diagramm zeigt. Dieser ansteigende Wert für das Druckverhältnis ist mit der von Voss [2] beschriebenen Kniehebelwirkung zu erklären.

In Bild 7 sind nun auf der aus Bild 6 für p_N übernommenen Kurve die Preßdrücke für verschiedene Schlegelhäckselarten (x) eingetragen, die erforderlich sind, um gleichfalls eine Dichte von $600 \text{ kg}_{\text{TM}}/\text{m}^3$ in einem Zylinder von 65 mm Durchmesser zu erzielen. Lotet man die Punkte auf die Abszisse, so erhält man gewissermaßen die entsprechenden Ersatzexakthäcksellängen. Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß das Schlegelhäckselersystem mit einem Nachschneider (Variante 6) ein Häcksel erzeugt, dessen Verdichtbarkeit etwa der von 20 mm Exakthäcksel entspricht, wobei die Unterschiede zu dem kürzeren Exakthäcksel sehr gering sind. Die Werte für das System ohne Nachschneidervorrichtung mit den Messerabständen $s = 30$ und $s = 60$ mm liegen entsprechend höher. Die Werte für λ und μ zeigen die gleiche Charakteristik wie die von Exakthäcksel.



Zylinderdurchmesser
d = 65 mm
Dichte $\rho = 600 \frac{\text{kg}_{\text{TM}}}{\text{m}^3}$
TM-Gehalt = 88%

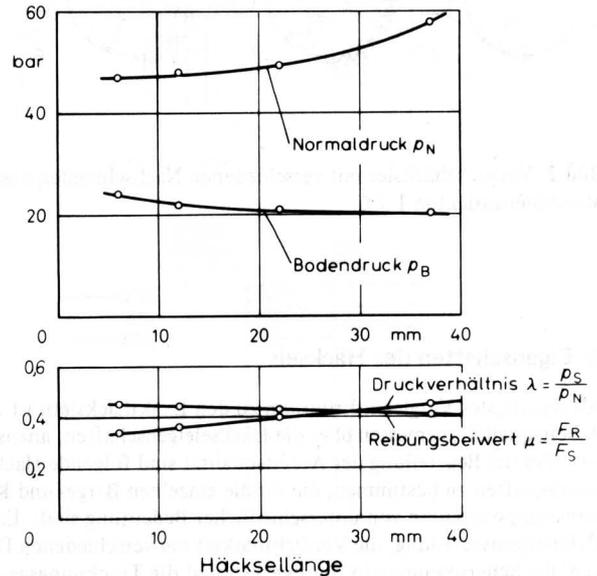
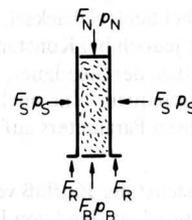


Bild 6. Einfluß der Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit in einem Preßzylinder.



Zylinderdurchmesser
d = 65 mm
Dichte $\rho = 600 \frac{\text{kg}_{\text{TM}}}{\text{m}^3}$
TM-Gehalt = 89%

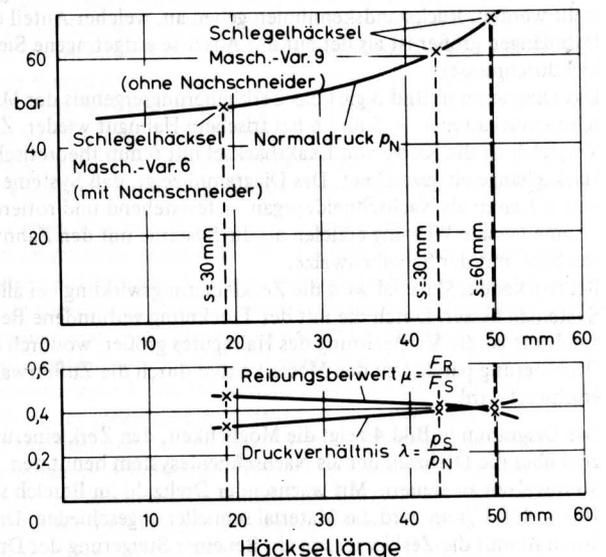


Bild 7. Einfluß der Häckselart auf die Verdichtbarkeit von Halmgut in einem Preßzylinder.

Die Scherspannung in Haufwerken erlaubt eine Aussage über die "Fließfähigkeit" und damit beispielsweise über die Entnehmbarkeit aus Hochsilos. Sie ist in starkem Maße von der Dichte und von dem in der Scherebene herrschenden Normdruck abhängig. Definiert wird die Scherspannung durch die zum Abscheren einer Haufwerksebene notwendige Kraft bezogen auf die Fläche dieser Scherebene. Bezieht man diese Kraft jedoch auf die auf die Ebene drückende Normalkraft, so erhält man einen inneren Reibbeiwert des Haufwerks.

Bei Häcksel nimmt die Scherspannung bei gleicher Dichte mit zunehmender Zerkleinerung ab. Bei gleicher Belastung ergibt sich bei kürzerem Häcksel jedoch eine größere Verdichtung und damit auch eine höhere Scherspannung gegenüber längerem Häcksel. In Bild 8 sind in ähnlicher Weise wie bei der Verdichtungsfähigkeit in Bild 7 Werte für die Scherspannung in Haufwerken von Schlegelhäcksel in den Kurvenverlauf von Exakthäcksel verschiedener Halmlängen eingezeichnet. Die angegebenen Scherspannungen beziehen sich dabei auf eine konstante Dichte von $\rho = 175 \text{ kg}_{\text{TM}}/\text{m}^3$, während der Normdruck bei dem längsten Häcksel mit 0,40 bar gegenüber 0,35 bar bei dem kürzesten Häcksel etwas größer war. Auch hier können durch Herunterloten der Meßpunkte der verschiedenen Schlegelhäckselarten die Ersatzexakthäcksellängen bestimmt werden. Sie liegen bei den Systemen mit Nachschneidern in dem sehr günstigen Bereich unter 10 mm Exakthäcksellänge und ohne Nachschneider bei 20 bzw. 40 mm Exakthäcksellänge.

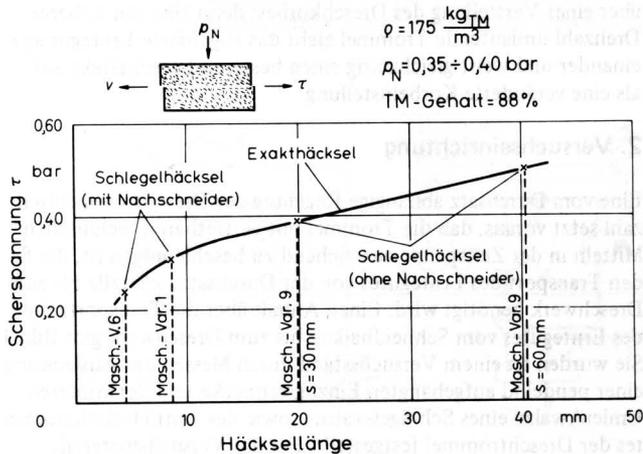


Bild 8. Einfluß der Häcksellänge auf die Scherspannung in Haufwerken.

Zum Abschluß sollen noch die Vergleichswerte für die Trocknungsgeschwindigkeit, die für die moderne Heißlufttrocknung von Bedeutung ist, erläutert werden. In Bild 9 ist die Trocknungsgeschwindigkeit verschiedener Häckselarten in Abhängigkeit von dem sich aus dem Trocknungsverlauf ergebenden Trockenmassegehalt aufgetragen. Die Trocknungsgeschwindigkeit des ausgewählten Schlegelhäcksel liegt zwischen denjenigen des Exakthäcksel mit 12 bzw. 26 mm Halmlänge. Sie entspricht damit ziemlich genau der Exakthäcksellänge die bei Heißlufttrocknern üblich ist. Die Trocknungsgeschwindigkeiten weiterer Schlegelhäckselarten mit teilweise wesentlich größeren mittleren Halmlängen, die hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingetragen wurden, liegen ebenfalls in dem Bereich zwischen den beiden Exakthäckselvarianten. Dies zeigt, daß bei Schlegelhäcksel die Beschädigung der Oberfläche die Trocknungsgeschwindigkeit hauptsächlich beeinflusst. Ein abschließender Versuch zur Trocknung von Schlegelhäcksel der Maschinenvariante 6 in einem Heißlufttrockner ergab keinerlei Schwierigkeiten in der Dosierstation und in der Trocknungstrommel.

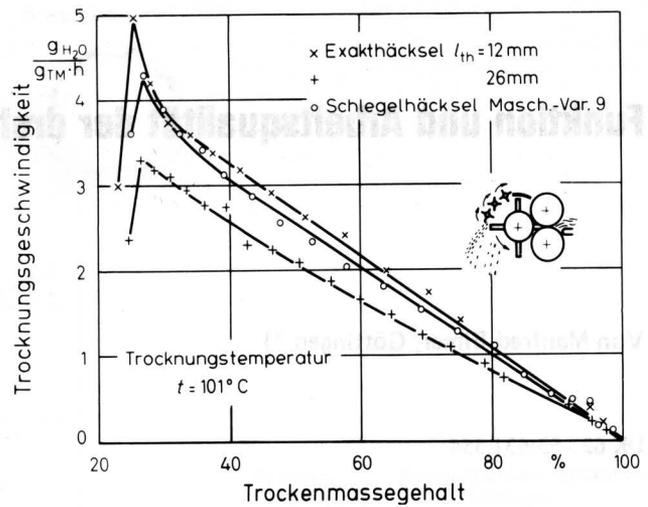


Bild 9. Trocknungsgeschwindigkeit verschiedener Häckselarten in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt.

4. Zusammenfassung

Ausgehend von einem Schlegelhäckselersystem mit Zwangszuführung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Steuerung der Häcksellängen beschrieben. Die Ermittlung der kritischen Werkzeuggeschwindigkeit für Gras verschiedener Feuchtegehalte ergab keine nennenswerten Unterschiede und keine besonderen Schwierigkeiten bei Welkgut. Die Arbeitsqualitäten der Systeme wurden mit Hilfe von verschiedenen Stoffeigenschaften bestimmt und mit denen von Exakthäcksel verglichen. Die Vergleiche zeigen, daß das aus einfachen Elementen aufgebaute Schlegelhäckselersystem in Verbindung mit besonderen Nachschneidevorrichtungen die Arbeitsqualität von Exakthäckseln erreichen kann, ohne daß versucht wurde, die einzelnen Varianten zu optimieren. Einschränkend ist zu sagen, daß solche Systeme ein zusätzliches Förderorgan benötigen. Der Leistungsbedarf liegt zwischen dem der Exakthäcksel und dem der seitherigen Schlegelhäcksel.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● Döbler, K.: Der freie Schnitt beim Mähen von Halmgut. Hohenheimer Arbeiten, Reihe Agrartechnik Heft 62, Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag 1972.
- [2] Voß, H.: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut. Dissertation TU Braunschweig, 1970.