

# Zapfwellengetriebene Packer zum Verdichten und Zerkleinern des Bodens nach dem Pflügen

Von Andreas Baur, Müncheberg\*)

DK 631.31:631.314.5.072.16

Auch für die Rückverfestigung des Bodens bei der Saatbettbereitung ist die direkte Energieübertragung vom Schleppermotor zum Werkzeug über die Zapfwelle vorteilhaft. Wenn dabei zusätzlich eine Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses erzielt werden soll, müssen die für den Zapfwellenantrieb am besten geeigneten Werkzeuge eingesetzt werden. Diese werden mittels Konstruktionsystematik und theoretischer Funktionsanalyse ausgewählt und miteinander verglichen. Es wird eine analytische Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Konstruktions- und Betriebsparametern vorgenommen und experimentell überprüft. Abschließend werden Schlußfolgerungen für die Optimierung zapfwellengetriebener Packer abgeleitet.

## 1. Einleitung

Das Verdichten und Zerkleinern des durch die Grundbodenbearbeitung gelockerten Bodens unterhalb des Saatgutablagebereichs wird durch Packer gegenwärtig insbesondere auf schwer bearbeitbaren grobschollig aufbrechenden Böden nur unzureichend gelöst.

Mit rollenden Packern [1] wird die notwendige Wirtiefe nur bei entsprechend großer Eigenmasse bzw. Zusatzbelastung erreicht [2, 3], was eine hohe Zugkraft bei ungünstigem energetischen Wirkungsgrad [4] erfordert. Nachteilig wirkt sich außerdem die mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit abnehmende Verdichtungswirkung der gezogenen Packerwerkzeuge aus [5].

Eine Möglichkeit, die Nachteile herkömmlicher Packer zu vermindern, bietet der Antrieb dieser Werkzeuge über die Zapfwelle analog zu veröffentlichten Lösungen bei Krümlern [6].

Durch den Einsatz zapfwellengetriebener Werkzeuge ist es möglich, mehr Energie in den Boden einzuleiten als mit gezogenen Werkzeugen. Infolge Radschlupf und Rollwiderstand sind nur 44–63 % der mechanischen Antriebsenergie des Motors auf gezogene Werkzeuge übertragbar, während bei zapfwellengetriebenen Werkzeugen, die selbst keine Zugkraft erfordern, bis zu 85 % als Drehenergie nutzbar sind [7, 8]. Welcher Anteil davon letztlich zur Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses beiträgt und welcher Anteil durch Rollwiderstand, Reibung, unerwünschten Bodentransport und nicht benötigte Bodenbeschleunigung verloren geht, wird neben der Gerätekonzeption und dem Zusammenwirken von Schlepper und Gerät maßgeblich durch die Optimierung der Konstruktions- und Betriebsparameter der Werkzeuge bestimmt.

Es wurden Wege gesucht, die vorteilhafte Energieübertragung zwischen Schleppermotor und angetriebenem Werkzeug auch zur Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse von Packern zu nutzen.

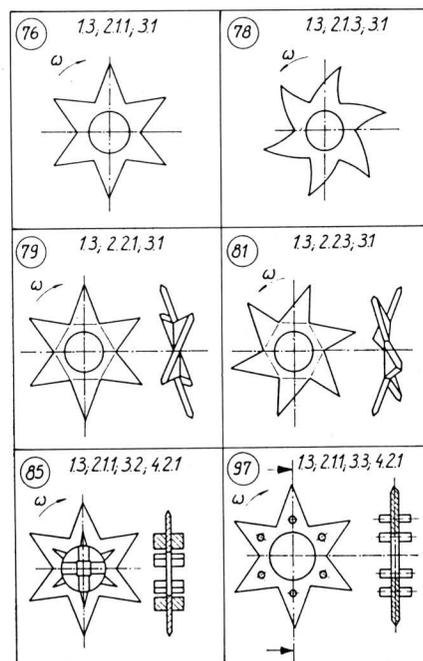
## 2. Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Packerformen

### 2.1 Ergebnisse konstruktions-systematischer Untersuchungen

Um die günstigsten Formen der Werkzeugelemente für zapfwellengetriebene Packer begründet auszuwählen, wurden konstruktions-systematische Untersuchungen zur Variantenfindung genutzt. Die Auswahl der jeweils am besten geeigneten Werkzeugformen [9] erfolgte durch Expertenbefragung und rechnergestützte Bestimmung von Rangfolgen in Abhängigkeit von unterschiedlichen simulierten Einsatzbedingungen und Entwicklungszielstellungen. Die als Ergebnis der Variantensuche, -bewertung und -auswahl gefundenen Packerformen, **Bild 1**, lassen 3 unterschiedliche Grundmerkmale erkennen:

- sternförmige Packerscheiben ohne zusätzliche Wirkelemente (Varianten 76, 78)
- Packer mit geschränkten Sternzacken, ebenfalls ohne zusätzliche Wirkelemente (Varianten 79, 81)
- sternförmige Packer mit axial angeordneten Wirkelementen (Varianten 85, 97).

Die theoretische Auswahl der für eine gezielte Bodenzustandsänderung am besten geeigneten Werkzeugformen war zunächst durch zielgerichtete theoretische und experimentelle Untersuchungen zu überprüfen, bevor eine Optimierung der ausgewählten Lösungsvarianten durch Präzisierung der Einflüsse von Konstruktions- und Betriebsparametern auf den Energieverbrauch sowie die Zerkleinerungs- und Verdichtungswirkung erfolgen konnte.



**Bild 1.** Durch Expertenbefragung ermittelte Werkzeugvarianten, die alle wesentlichen Vorzugsmerkmale beinhalten.

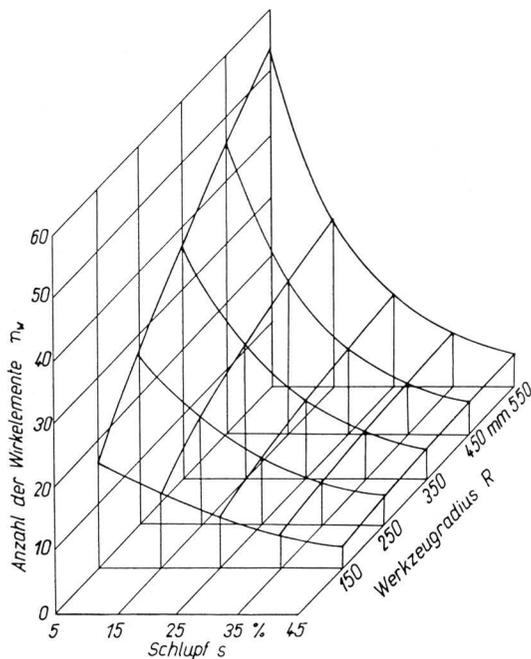
\*) Dr.-Ing. A. Baur ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg (Direktor: Prof. Dr. sc. P. Kundler) der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.



Durch Umstellen von Gl. (5) läßt sich auch die zur Realisierung eines bestimmten Abstandes  $\Delta x$  erforderliche Anzahl der Wirkelemente berechnen:

$$n_w = (1 - s) \pi / [(\Delta x / 2R) + \sqrt{1 - (1 - s)^2}] - (1 - s)(2\pi / 360)(\arccos(1 - s)) \quad (6)$$

Mit zunehmendem Schlupf nimmt die Anzahl der erforderlichen Wirkelemente bei Einhaltung eines konstanten Abstandes  $\Delta x$  ab, **Bild 5**. Bei einer Größe des Werkzeugschlupfes  $< 25\%$  ist ein maßgeblicher Einfluß vom Werkzeugradius auf die Anzahl der Wirkelemente zu verzeichnen, die benötigt wird, um den Abstand zwischen den Bewegungsbahnen zweier aufeinanderfolgender Wirkelemente konstant halten zu können.



**Bild 5.** Anzahl der erforderlichen Wirkelemente in Abhängigkeit von Schlupf und Werkzeugradius; verlängerte Zykloiden mit Abstand  $\Delta x = 50$  mm.

Von besonderem Interesse ist auch die Länge des von einem Wirkelement im Boden zurückgelegten Weges (Durchdringungsweg). Sie beeinflußt die Größe der Reibungsenergie, die als Verlustenergie zu betrachten ist [10].

Die Bewegungsbahn eines beliebigen Punktes am Umfang eines rotierenden Werkzeuges ist stets eine Zykloide. Die Länge  $L$  der Zykloide kann aus der Beziehung

$$L = 2r \int_0^{\varphi_{E,A}} \sqrt{1 + (R/r)^2 - 2(R/r) \cos \varphi} \, d\varphi \quad (7)$$

berechnet werden [11].

Mit der Beziehung für den Wälzkreisradius

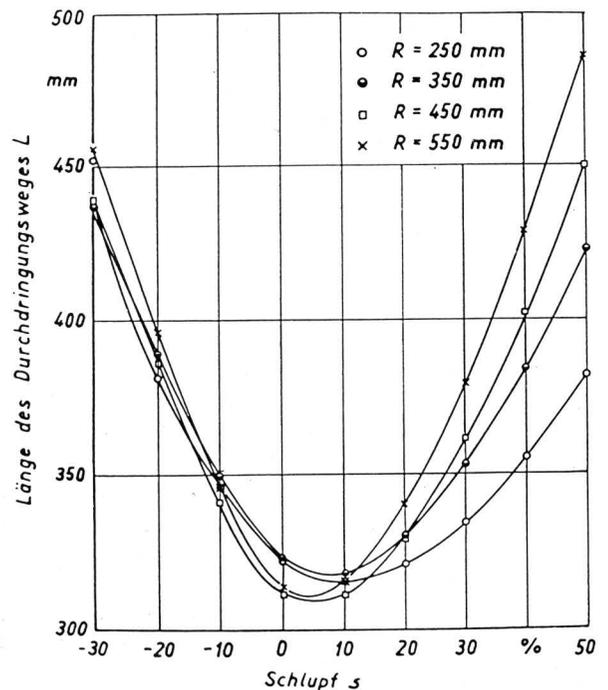
$$r = (1 - s) R \quad (8)$$

läßt sich die Länge des Durchdringungsweges aus Gl. (7) ermitteln:

$$L_D = 2R(1 - s) \int_0^{\varphi_{E,A}} \sqrt{1 + [1/(1 - s)]^2 - [2/(1 - s)] \cos \varphi} \, d\varphi \quad (9)$$

Dieses Integral kann numerisch nach dem Näherungsverfahren von *Runge-Kutta* [12] berechnet werden.

Der Verlauf der Länge des Durchdringungsweges in Abhängigkeit vom Schlupf und vom Werkzeugradius, **Bild 6**, läßt erkennen, daß die Minima des Durchdringungsweges bei kleinen positiven Werten des Schlupfes (zwischen 5 und 15 %) auftreten. Darüber hinaus zeigt sich, daß bei konstanter Eindringtiefe der Werkzeuge bis zu einem Schlupf von ca. +20 % die Länge des Durchdringungsweges nur in geringem Maße vom Werkzeugdurchmesser abhängt. Erst bei einem Schlupf größer +20 % tritt eine deutliche Zunahme der Länge des Durchdringungsweges mit wachsendem Werkzeugdurchmesser auf. Daraus ist abzuleiten, daß auch im Hinblick auf die Realisierung möglichst kurzer Durchdringungswege ein Werkzeugschlupf gewählt werden sollte, der 20 % nicht wesentlich überschreitet.



**Bild 6.** Länge des von einem beliebigen Punkt am Umfang des Werkzeuges im Boden zurückgelegten Weges in Abhängigkeit vom Schlupf; Werkzeugradius  $R$  als Parameter, Eindringtiefe  $t_E = 150$  mm.

### 2.3 Experimentelle Untersuchungen

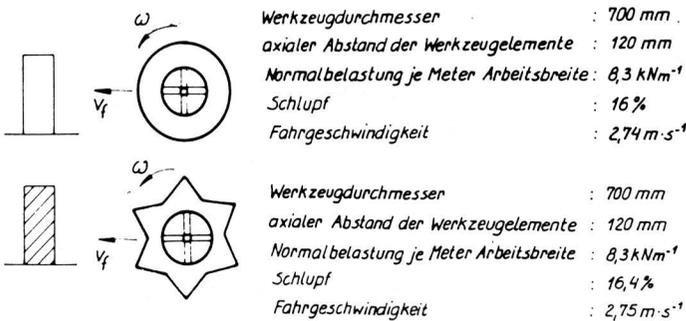
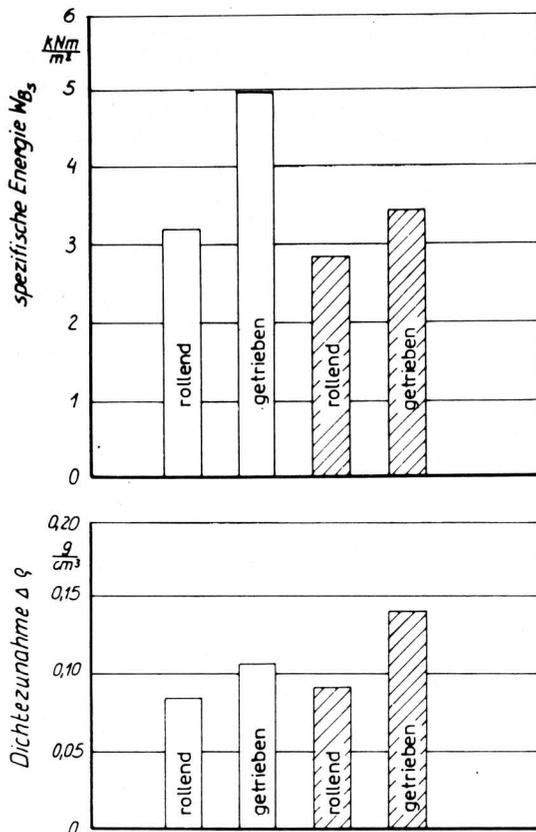
Für die experimentellen Untersuchungen, deren Ziel es ist, die Aussagen der theoretischen Auswahl geeigneter Packerformen zu überprüfen, wurden aufgrund der kinematischen Untersuchungen für die sternförmigen Werkzelemente die Parameter:

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| Werkzeugdurchmesser     | 700 mm   |
| Anzahl der Wirkelemente | 10       |
| Werkzeugschlupf         | bis 25 % |

gewählt.

Zum Vergleich mit den sternförmigen Werkzelementen wurden zunächst auch kreisförmige Werkzeugscheiben ohne zusätzliche Wirkelemente eingesetzt, obwohl diese bei der Vorauswahl im Gegensatz zu den Sternpackern hinsichtlich Einleitung eines Drehmoments als völlig ungeeignet bewertet wurden, **Bild 7**.

Durch die geringeren horizontalen Bodenwiderstände beim Eingriff der sternförmigen Packerwerkzeuge in den Boden und durch die höheren Schubkräfte infolge des auftretenden Form- und Kraftschlusses trat bei gleicher Normalkraft gegenüber den zapfwellengetriebenen kreisförmigen Packerscheiben bei den Sternpackern eine signifikante (Newman-Keuls-Test mit  $\alpha = 0,05$ ) Verringerung des Energieverbrauchs auf. Die mit den angetriebenen Sternpackern erzielte Dichtezunahme lag signifikant höher als bei den angetriebenen kreisförmigen Packerscheiben sowie bei beiden Werkzeugvarianten ohne Drehmomenteinleitung.



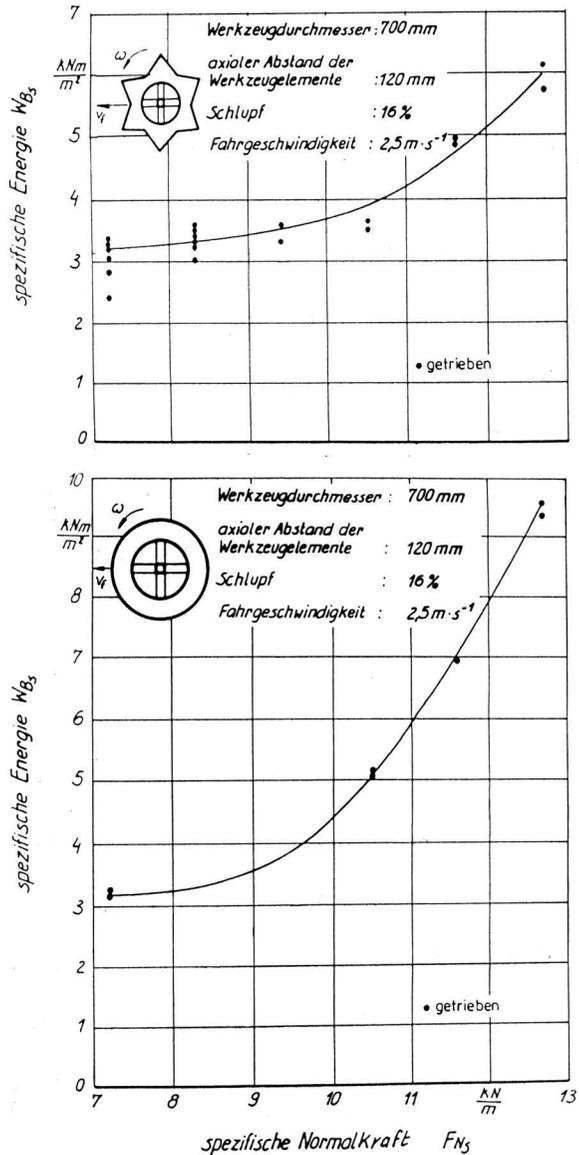
**Bild 7.** Flächenbezogener Energiebedarf und erzielte Dichtezunahme für ein kreis- und ein sternförmiges Werkzeugelement jeweils abrollend und zapfwellengetrieben.

Bodenart: Sand; Bodenfeuchte: 85,0 % der Feldkapazität

Ein Vergleich beider Werkzeugformen bei unterschiedlichen Werten der Normalkraft, **Bild 8**, führte zu gleichen Ergebnissen. Der Energieverbrauch der kreisförmigen Packerscheiben steigt mit wachsender Normalkraft sehr viel stärker an. Das resultiert daraus, daß die infolge des Kraftschlusses zwischen Boden und Werkzeugelementen übertragbare Schubkraft begrenzt ist. Unter den gegebenen Bedingungen war bei einer Normalkraft von ca. 9 kNm/infolge der zunehmenden Eindringtiefe der Rollwiderstand derart angestiegen, daß die durch das eingeleitete Drehmoment entstehende Schubkraft kleiner als der Rollwiderstand wurde und somit zusätzlich noch eine Zugkraft aufgebracht werden mußte.

Um einen hohen Wirkungsgrad der Energieübertragung zu erreichen, muß die infolge des eingeleiteten Drehmoments entstehende Schubkraft größer als der Rollwiderstand sein. Es wird dann das Werkzeug nur durch das Drehmoment fortbewegt und benötigt keine Zugkraft. Das konnte zielgerichtet beim Einsatz der Sternpacker genutzt werden, wo aufgrund des realisierten Form- und Kraftschlusses höhere Stützkkräfte erzeugt werden (**Bild 8**). Der Energiebedarf der Sternpacker erhöhte sich trotz zunehmender Normalkraft im Bereich 7–10,5 kNm nur geringfügig. Die von

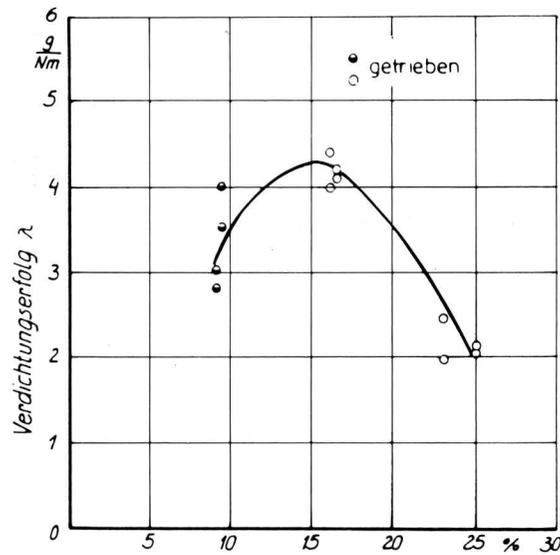
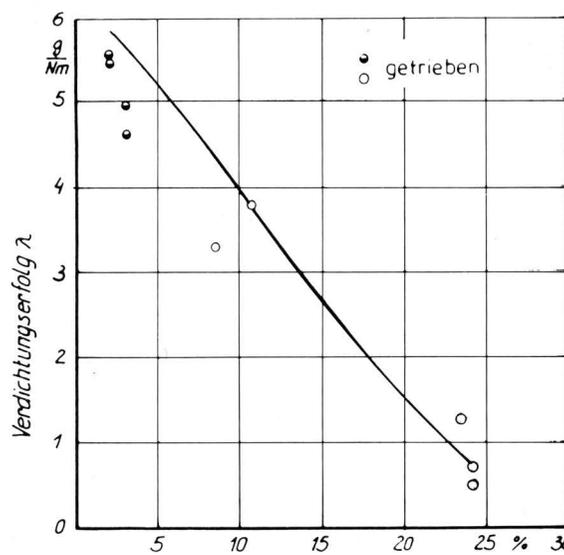
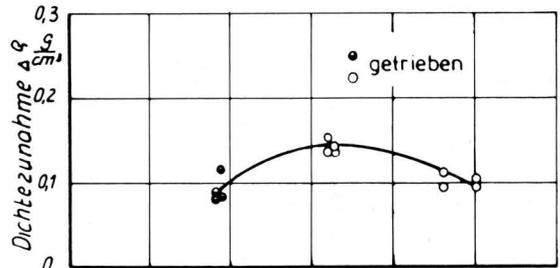
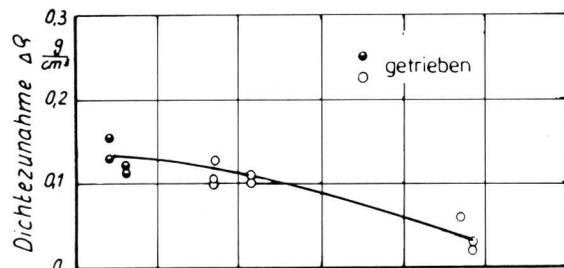
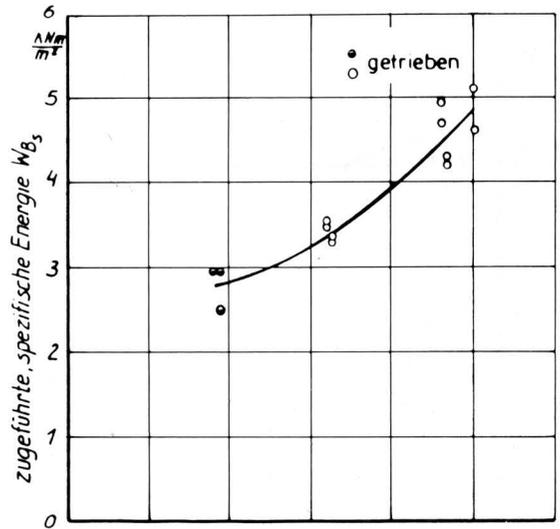
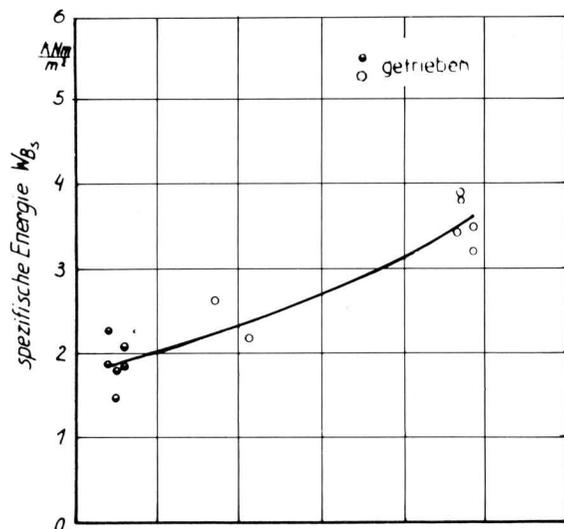
Theiner [14] nachgewiesene Grenzbelastung der Walzen, die durch einen sprunghaften Anstieg der Zugkraft gekennzeichnet ist, wurde bei den sternförmigen Werkzeugen somit erst bei höherer Normalkraft erreicht als bei den kreisförmigen Packern. Das bedeutet aber auch, daß die Normalkraft entsprechend den vorliegenden Bodenbedingungen zu variieren ist, und zwar so, daß die für die notwendige Tiefenwirkung erforderliche Eindringtiefe der Packer erreicht, ihre durch die Werkzeuggeometrie bestimmte maximal nutzbare Eindringtiefe jedoch nicht überschritten wird.



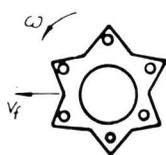
**Bild 8.** Flächenbezogener Energiebedarf in Abhängigkeit von der auf die Arbeitsbreite bezogenen Normalkraft für sternförmige und kreisförmige Werkzeugelemente.

Bodenart: Sand; Bodenfeuchte: 58,6 % der Feldkapazität

Zusätzliche axiale Wirkelemente an den sternförmigen Packerscheiben führten beim Einsatz ohne Zapfwellenantrieb durch die fast ganzflächige Bearbeitung zu einer höheren Dichtezunahme, **Bild 9**. Infolge der axialen Wirkelemente verringerte sich die Arbeitstiefe auf 80 mm gegenüber 103 mm ohne zusätzliche Wirkelemente, was zu einer Verminderung des Rollwiderstands und damit der Zugenergie um fast 1 kNm führte. Die Abstützung der Packerscheiben auf den axialen Wirkelementen führte aber auch dazu, daß bei Einleitung eines Drehmoments die Verdichtungswirkung abnahm.

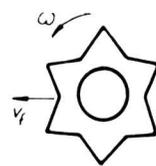


a)



Werkzeuggestrichmesser : 700 mm  
 axialer Abstand der  
 Werkzeugelemente : 120 mm  
 Normalbelastung  
 je Meter Arbeitsbreite : 8,3 kNm<sup>-1</sup>  
 Fahrgeschwindigkeit : 2,5 m s<sup>-1</sup>

b)



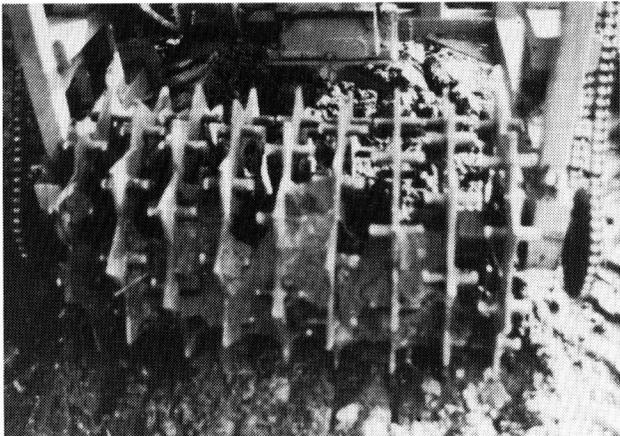
Werkzeuggestrichmesser : 700 mm  
 axialer Abstand der  
 Werkzeugelemente : 120 mm  
 Normalbelastung  
 je Meter Arbeitsbreite : 8,3 kNm<sup>-1</sup>  
 Fahrgeschwindigkeit : 2,5 m s<sup>-1</sup>

**Bild 9.** Flächenbezogener Energiebedarf, Dichtezunahme und Verdichtungserfolg in Abhängigkeit vom Schlupf für sternförmige Werkzeugelemente mit (links) und ohne axiale Wirkelemente (rechts).

Bodenart: Sand; Bodenfeuchte: 66,92 % der Feldkapazität

Durch das Einklemmen von Boden zwischen Packerscheiben und zusätzlichen Wirkelementen erhöhte sich der Bodentransport, **Bild 10.** Besonders deutlich wurde der dadurch eintretende Lokierungseffekt bei höherem Werkzeugschlupf.

Aufgrund der stärkeren Verstopfungsneigung und des größeren Bodentransports ist der Einsatz von Packer und nachfolgendem Krümmler als vorteilhafter anzusehen als eine Kombination von Packer und Krümmler in einem Werkzeug.



**Bild 10.** Sternförmige Werkzeugelemente mit zusätzlichen axialen Wirkelementen bewirken verstärkten Bodentransport und neigen zu Verstopfungen.

### 3. Schlußfolgerungen

Anhand der theoretischen und experimentellen Untersuchungen läßt sich hinsichtlich der Optimierung zapfwellengetriebener Packer folgendes abschätzen:

- Die durch Einleitung eines Drehmoments von den zapfwellengetriebenen Packern zu nutzende Energie kann nur zum Teil für die Zerkleinerung und Verdichtung des Bodens aufgewendet werden, da neben der Erzeugung von Schubkräften durch Reibung, Bodenbeschleunigung und Bodentransport Energie verbraucht wird, die nicht oder nur unbedeutend an der Zerkleinerung und Verdichtung des Bodens beteiligt ist.
- Durch geeignete Wahl der Konstruktions- und Betriebsparameter der Werkzeuge kann der Bewegungsablauf bei der Durchdringung des Bodens so gestaltet werden, daß zielgerichtet eine Verbesserung des Arbeitseffektes bei Minimierung der auftretenden Energieverluste möglich ist.
- Eine energetisch vorteilhafte, teilweise Nutzung der auftretenden Bodenwiderstände zum Erzeugen von Schubkräften ist durch geeignete Wahl der Konstruktions- und Betriebsparameter der Packer möglich. Der mit sternförmigen Packern realisierbare Form- und Kraftschluß zwischen Werkzeug und Boden ist Voraussetzung für den energetisch effektiven Einsatz zapfwellengetriebener Packer.
- Der Schlupf der Werkzeuge hat entscheidenden Einfluß auf deren Energiebedarf. Als vorteilhaft erweist sich ein geringfügig positiver Schlupf von ca. 20 %.
- Durch Optimieren der Konstruktions- und Betriebsparameter der zapfwellengetriebenen sternförmigen Packer in weiterführenden Untersuchungen sind Energieverluste infolge Bodenbeschleunigung auf ein Minimum einzuschränken.
- Zielgerichtet muß eine Minimierung der horizontalen, gegen die Fahrtrichtung wirkenden Bodenwiderstände

erreicht werden, um die an zapfwellengetriebenen Packern auftretenden Bearbeitungswiderstände weitestgehend zur Verdichtung und Zerkleinerung des Bodens sowie zum Erzeugen hoher Schubkräfte nutzen zu können.

- Zum Verringern von Energieverlusten durch Bodentransport ohne Verdichtungswirkung sowie zum Vermeiden des Lockerns der oberen Bodenschicht sollte durch Optimierung der Parameter Werkzeugdurchmesser, Anzahl der Wirkelemente, Schlupf und Arbeitstiefe erreicht werden, daß zwischen den Bewegungsbahnen zweier nacheinander im Boden eingreifender Wirkelemente (Sternzacken) ein von diesen nicht durchdrungenes Bodenstück der Länge  $\Delta x$  verbleibt, welches zunächst verdichtet wird und dann als Gegenlager für die Abstützung der Wirkelemente fungiert. Dabei muß auch eine solche Tiefenwirkung der Verdichtung erreicht werden, daß die nach der Grundbodenbearbeitung entstandenen Hohlräume wieder beseitigt werden.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] *Kalk, W.-D. u. O. Bosse:* Darstellung der an rotierenden Bodenbearbeitungswerkzeugen mit horizontalen Drehachsen wirkenden Kräfte und Drehmomente. *Grundl. Landtechnik* Bd. 35 (1985) Nr. 4, S. 118/26.
- [ 2 ] *Köller, K.:* Packerkombinationen im Vergleich. *Top agrar* 1984, Nr. 8, S. 56/60.
- [ 3 ] *Kalk, W.-D.:* Untersuchungen zum Bewerten von Bodenbearbeitungswerkzeugen. Diss. B, TU Dresden 1987 (unveröffentlicht).
- [ 4 ] *Steinkampf, H. u. M. Zach:* Leistungsbedarf und Krümelungseffekt von gezogenen und zapfwellengetriebenen Geräten zur Saatbettbereitung. *Landbauforsch. Völknerode* Bd. 24 (1974) Nr. 1, S. 55/62.
- [ 5 ] *Aboaba, F.O.:* Effects of time on compaction of soils by rollers. *Trans. ASAE* Bd. 12 (1969) Nr. 3, S. 301/304.
- [ 6 ] *Konzack, J.:* Energieaufwand für Saatbettbereitungswerkzeuge in Abhängigkeit von der Antriebsart. *agrar-technik, Berlin*, Bd. 32 (1982) Nr. 10, S. 452/54.
- [ 7 ] *Steinkampf, H., C. Sommer u. M. Zach:* Möglichkeiten der Energieeinsparung beim Schleppereinsatz, insbesondere bei der Bodenbearbeitung. *Landbauforsch. Völknerode, Sonderheft 49* (1979) S. 42/55.
- [ 8 ] *Stoppel, A.:* Energie- und Arbeitszeitbedarf für gezogene Geräte der Bodenbearbeitung bei unterschiedlicher Schleppermotorauslastung. *Grundl. Landtechnik* Bd. 30 (1980) Nr. 4, S. 135/39.
- [ 9 ] *Baur, A., W.-D. Kalk, K. Busch u. K.-D. Feige:* Variantensuche, -bewertung und -auswahl – dargestellt am Beispiel angetriebener Packer. *Grundl. Landtechnik* Bd. 36 (1986) Nr. 4, S. 123/29.
- [ 10 ] *Baur, A.:* Untersuchungen zu aktiv rotierenden, scheibenförmigen Werkzeugen für die Verdichtung und Zerteilung des Bodens. Diss. A, TU Dresden, 1981 (unveröffentlicht).
- [ 11 ] *Soucek, R.:* Zu einigen Problemen von Theorie und Praxis der Bodenbearbeitung. *agrar-technik, Berlin*, Bd. 30 (1980) Nr. 2, S. 69/70.
- [ 12 ] ● *Autorenkollektiv:* Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 1, Grundlagen, Berlin: VEB Verlag Technik 1965.
- [ 13 ] *Baur, A. u. W.-D. Kalk:* Getriebene Zahnpacker zum Verdichten und Zerkleinern des Bodens. FZB-Report 1988, (im Druck).
- [ 14 ] *Theiner, J.:* Untersuchung der Walzenverdichtungsvorgänge mit gezogenen und selbstfahrenden Glattwalzen auf kohäsionslosen und bindigem Boden. *Baummaschinen und Landtechnik* Bd. 6 (1959) H. 1–6, 8, 9 und 11.