

Vergleich des Energieaufwands für die Bodenbearbeitung mit verschiedenen Werkzeugen

Die Höhe des Energieverbrauchs zur Bodenbearbeitung hängt bekanntlich von Art und Zustand des Bodens, von den Arbeitsparametern sowie vom Typ und von den Konstruktionsparametern der Bodenbearbeitungsgeräte ab. Bis jetzt gibt es keine genaue Bestimmung dieser Abhängigkeit in Form einer Formel, die alle diese Faktoren berücksichtigen würde. Deshalb müssen wir uns mit Teilformeln begnügen, die die Abhängigkeiten des Energieverbrauchs von nur einigen dieser Faktoren umfassen.

Der Vergleich des Energieverbrauchs durch Bodenbearbeitungsgeräte wäre wesentlich einfacher, wenn die zur Bearbeitung der verschiedenen Bodenarten in ihren unterschiedlichen Zustandsstufen (vor und nach der Bearbeitung) notwendige Minimalenergie bekannt wäre. Diese Minimalenergie stellt eine objektive Grundlage zur Beurteilung der Werkzeuge hinsichtlich des Energieverbrauchs dar. In Anbetracht des Fehlens dieser objektiven Bezugsgrundlage sind wir beim Vergleich von Werkzeugen zur Bodenbearbeitung gezwungen, ein Werkzeug als Vergleichsgrundlage anzunehmen. Am häufigsten wird als Vergleich das Standard-Pflugschar herangezogen.

Berechnung der spezifischen Arbeit

Der Energieverbrauch kann durch verschiedene Kennziffern ausgedrückt werden, von denen die spezifische Arbeit A am geeignetsten ist. Sie bestimmt den Arbeitsaufwand in kpm, der zum Bearbeiten von 1 dm^3 Boden notwendig ist. Die spezifische Arbeit A_p für solche Geräte wie es der Pflug ist, wird durch den spezifischen Bodenwiderstand k ausgedrückt:

$$A_p = 0,1 k \left[\frac{\text{kpm}}{\text{dm}^3} \right] \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

$$k = \frac{F_m}{t \cdot b} \left[\frac{\text{kp}}{\text{dm}^2} \right]$$

F_m mittlerer Bodenwiderstand in kp

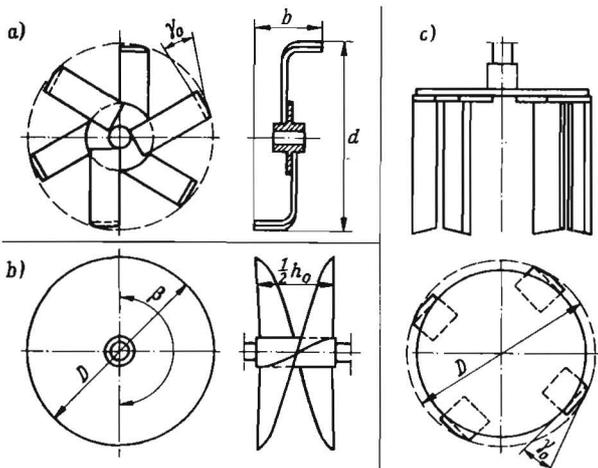
t mittlere Arbeitstiefe in dm

b mittlere Arbeitsbreite in dm

* Institut für Mechanisierung und Elektrifizierung der Landwirtschaft, Warschau

Bild 1. Rotierende Bodenbearbeitungsgeräte

- a) Bodenfräse mit parallel zur Fahrtrichtung und waagerechter Drehachse; b) Schraubepflug mit zwei Messern an der Schraubenfläche und einer zur Fahrtrichtung parallelen Drehachse; c) Kreiselpflug mit einer senkrecht zur Fahrtrichtung liegenden Drehachse



Die spezifische Arbeit der rotierenden Bodenbearbeitungsgeräte wird aus dem mittleren Drehmoment M und der waagerechten resultierenden Kraft F_x bei der Bodenzerkleinerung berechnet.

$$A = \frac{2 \pi M}{l t b z} \pm 0,1 \frac{F_x}{t b} \left[\frac{\text{kpm}}{\text{dm}^3} \right] \quad (2)$$

Darin sind

l Länge der Bodenbissen in dm

z Anzahl der an einem Werkzeugsatz vorhandenen Arbeitselemente.

Die Kraft F_x kann nach hinten gerichtet sein und stellt dann den Widerstand (+ Zeichen) dar oder sie kann auch entgegengesetzt wirken. In diesem Fall wird die Maschine geschoben (- Zeichen).

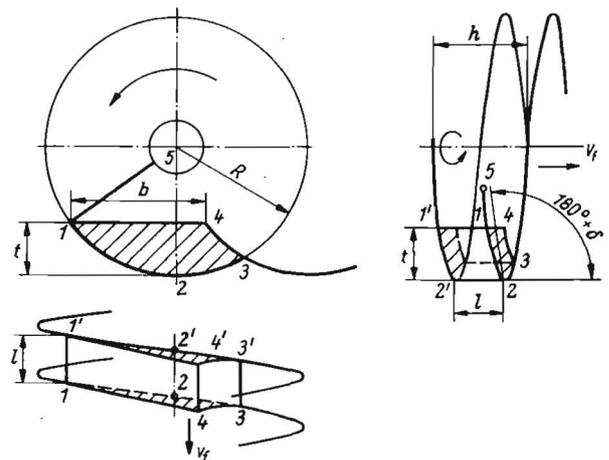
Der Vergleich der spezifischen Arbeit verschiedener Werkzeuge liefert kein vollständiges Bild, weil ihr Arbeitseffekt oft sehr unterschiedlich ist. Am besten bestimmt man den Arbeitseffekt der Werkzeuge annähernd durch die Qualität der Bodenkrümelung. Alle Untersuchungen ergeben, daß eine Abhängigkeit zwischen dem Energieverbrauch und der Qualität der Krümelung besteht. Es gelang bisher jedoch nicht, diesen Zusammenhang genauer zu bestimmen. Die allgemeine Behauptung, daß mit einem höheren Energieaufwand bei Bodenbearbeitungsgeräten eine bessere Krümelung des Bodens erreicht wird, ist zu ungenau und in manchen Fällen unrichtig.

Zuerst werden kurz die Ergebnisse der Untersuchungen in der Bodenrinne von drei verschiedenen rotierenden Werkzeugen, die in ihrer Wirkungsweise tatsächlich unterschiedlich sind, dargestellt.

Untersuchungen an drei rotierenden Werkzeugen

Die erste Art des rotierenden Werkzeugs hat eine waagerechte, rechtwinklig zur Fahrtrichtung liegende Drehachse und stellt eine normale Bodenfräse dar (Bild 1a). Das zweite Werkzeug ist ein Schraubepflug mit einer zur Fahrtrichtung parallelen Achse, es ist mit zwei Messern ausgestattet (Bild 1b). Die dritte Variante bezeichnet man als Kreiselwerkzeug, sie besitzt eine senkrechte Drehachse (Bild 1c).

Bild 2. Schnittbahnen des Schraubepflugs durch den Boden (Erklärung im Text)



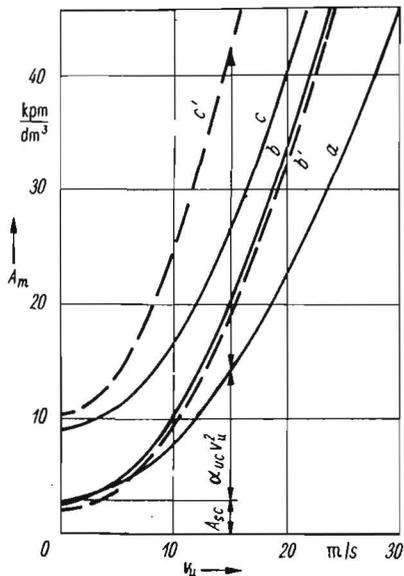


Bild 3
Abhängigkeit der spezifischen Arbeit A_m von der Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Werkzeugs beim Betrieb in der Bodenrinne:
a Schraubenspflug $z = 2$, b Fräse $z = 2$, b' Fräse $z = 3$, c Kreisel-pflug $z = 2$, c' Kreiselpflug $z = 4$

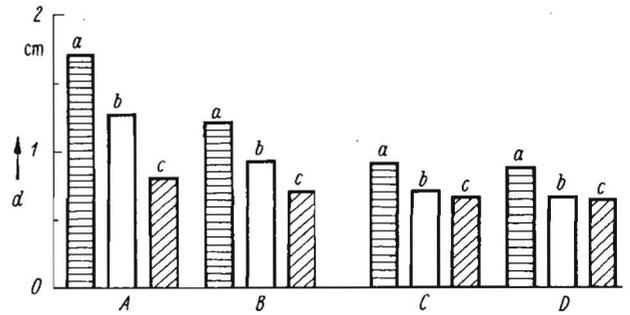


Bild 4. Mittlere Längen der Kluten nach der Bearbeitung in der Bodenrinne durch drei rotierende Geräte:

a Schraubenspflug, b Fräse, c Kreisel-pflug:
A: $v_f = 0,4$ m/s, $l = 10$ cm, $v_u = 5$ m/s;
B: $v_f = 1,2$ m/s, $l = 10$ cm, $v_u = 15$ m/s;
C: $v_f = 0,4$ m/s, $l = 4$ cm, $v_u = 12,5$ m/s;
D: $v_f = 1,2$ m/s, $l = 4$ cm, $v_u = 37,5$ m/s

Diese drei Varianten sollen verschiedene Typen von rotierenden Werkzeugen repräsentieren. Die Wirkung der Fräse und des Kreisel-pflugs ist bekannt. Die Messer dieser Werkzeuge beschreiben während der Bodenzerkleinerung zyklidenförmige Bahnen. Die Messer des Schraubenspflugs bewegen sich auf Schraubenlinien (Bild 2) und schneiden die Bissen längs der seitlichen Flächen 1-2-3-4. Die untere Bogenfläche eines jeden Bissens 1-1'-2-2'-3-3' wird durch die hintere Fläche des Messers unter dem Winkel $180^\circ + \delta$ abgetrennt.

Bei der Arbeit der rotierenden Geräte können wir drei Phasen unterscheiden. In der ersten Phase werden Bissen des Bodens abgetrennt und gleichzeitig teilweise zerbröckelt. In der zweiten Phase erfolgt die Ablage der Kluten in unterschiedliche Richtungen, je nach Drehrichtung des Werkzeugs. In der dritten Phase folgt ein Mischen der Klutenteile, die auf den Furchenboden fielen und nicht außerhalb des Wirkungsbereichs der nachfolgenden Messer abgeworfen wurden. Dabei zerbröckeln die Kluten weiter.

Der Kreisel-pflug mischt den Boden am intensivsten. Der Schraubenspflug mischt dagegen im allgemeinen den Boden nicht, weil die Kluten durch seine besondere Arbeitsweise mit einem Messer abgetrennt werden und dann außerhalb des Wirkungsbereichs des nächsten Messers liegen. Die gesamte spezifische Arbeit A , die zum Abtrennen, Abwerfen

und Mischen der Kluten angewendet wird, hängt vor allem von der Umfangsgeschwindigkeit der Messer nach folgender Gleichung ab

$$A = A_s + 0,001 \alpha_u \cdot v_u^2 \quad [\text{kpm/dm}^3] \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

- A_s statische Arbeit in kpm/dm^3
- α_u Beiwert der dynamischen Arbeit in $\text{kp s}^2/\text{m}^4$
- v_u Umfangsgeschwindigkeit in m/s

Die statische Arbeit A_s bei der theoretischen Schnittgeschwindigkeit gleich Null wird nicht nur auf das Abtrennen der Bissen selbst angewendet, sondern ebenfalls auf das Mischen des Bodens. Der zweite Teil der Formel stellt die dynamische Arbeit dar, die im Moment des Zusammenpralls der Messer mit dem Boden, wenn das Abtrennen der Bissen beginnt, beim weiteren Zerkleinern und anschließend beim Ablegen und Mischen der Kluten bei gegebener Umfangsgeschwindigkeit v_u auftritt. Es wäre jedoch schwierig, diese einzelnen Teile der spezifischen Arbeit zu messen. Die Untersuchungsergebnisse würden nur die Größenordnung der spezifischen Arbeit angeben, die zum Mischen des Bodens notwendig ist.

In der Formel für die gesamte spezifische Arbeit der rotierenden Bodenbearbeitung kann man die Arbeit des Bodenmischens berücksichtigen:

$$A = A_{sc} + A_{sm} + (\alpha_{uc} + \alpha_{um}) v_u^2 \quad [\text{kpm/dm}^3] \quad (4)$$

Darin bedeuten:

- A_{sc} statische spezifische Arbeit beim Abtrennen und Ablegen der Bissen
- A_{sm} statische Arbeit des Bodenmischens
- α_{uc} dynamischer Beiwert des Abtrennens und Ablegens der Bissen

Näherungsweise können wir annehmen, daß die Beiwerte A_{sc} und α_{uc} für jede Variante der rotierenden Geräte gleich sind. Da die Schnecke den Boden nicht mischt (für Schnecke $A_{sm} = 0$ und $\alpha_{um} = 0$), kann man annehmen, daß sich die spezifische Arbeit der Fräse oder des Kreisel-pflugs von der Arbeit des Schraubenspflugs durch die Arbeitseinheit des Bodenmischens A_m unterscheidet:

$$A_m = A_{sm} + \alpha_{uc} \cdot v_u^2 \quad [\text{kpm/dm}^3] \quad (5)$$

Aus Bild 3 ist zu ersehen, daß die Arbeit des Bodenmischens A_m des Kreisel-pflugs mit 4 Messern sehr groß ist. Zum Beispiel bei der Umfangsgeschwindigkeit $v_u = 15$ m/s ist sie zweimal größer als die spezifische Arbeit $A_{sc} + \alpha_{um} v_u^2$, die zum Abtrennen und Ablegen der Bissen erforderlich ist. Die

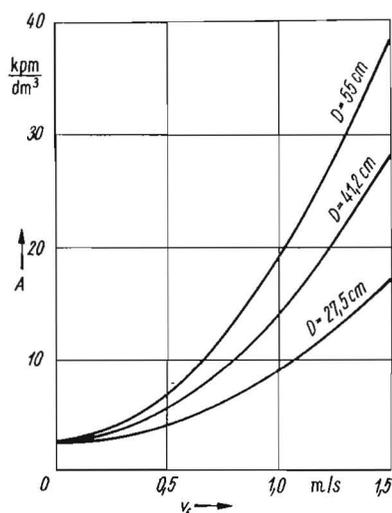
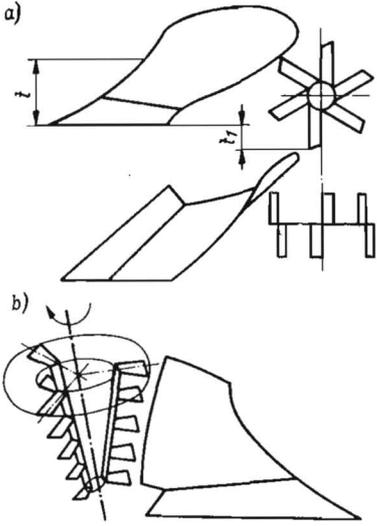
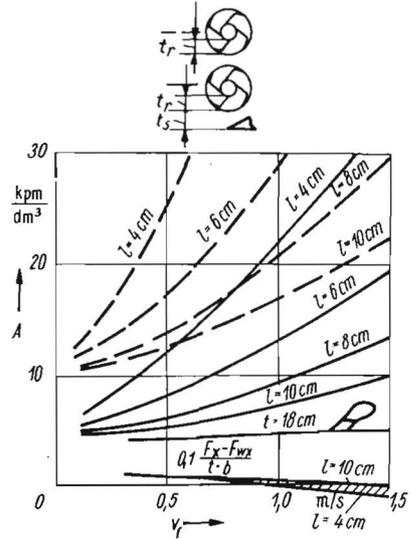


Bild 5
Abhängigkeit der spezifischen Arbeit A von der Fahr-geschwindigkeit v_f der Fräse mit verschiedenen Durchmessern D ; $l = 6$ cm, $z = 2$



◀ Bild 6. Kombinierte Bodenbearbeitungsgeräte; a) Pflugschar mit Drehsecker, b) Pflugschar mit rotierendem Auflockerer

Bild 8. Abhängigkeit der spezifischen Arbeit A von der Fahrgeschwindigkeit v_f der Fräse und der Kombination Fräse-Gänsefußschar bei verschiedenen Längen der Kluten sowie des Pflugschars beim Einsatz unter Feldbedingungen zum Stoppelsturz $t_f = 8 \text{ cm}$, $t_s = 10 \text{ cm}$



Arbeit A_m beim Kreiselflug mit zwei Messern ist schon wesentlich geringer. Die Untersuchungen zeigten, daß dieses intensive Mischen des Bodens durch den Kreiselflug nicht notwendig ist und bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten kein besseres Krümeln des Bodens bewirkt, sondern höchstens die schädliche Pulverisierung verursacht. Veranschaulichen kann das die Darstellung der Krümelung des Bodens durch drei untersuchte rotierende Werkzeuge (Bild 4). Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit von 12,5 m/s auf 37,5 m/s ergab keine Verbesserung der Bodenkrümelung. Die Untersuchungen der rotierenden Werkzeuge mit verschiedenen Durchmessern zeigten eine deutliche Abhängigkeit des Beiwerts α_u vom Durchmesser D , was durch folgende Formel ausgedrückt werden kann:

$$\alpha'_u = \alpha_u \left(\frac{D}{D'} \right)^t \quad [\text{kps}^2/\text{m}^4] \quad (6)$$

Wobei

α'_u dynamischer Beiwert des rotierenden Werkzeugs mit dem Durchmesser D' ist.

Bei unseren Untersuchungen ermittelten wir folgende mittlere Werte des Exponenten t für die Werkzeuge mit 2 Messern

	Fräse	Schraubenpflug	Kreiselpflug
t	0,71	0,68	0,86

Je kleiner also der Durchmesser des Werkzeugs ist, desto größer wird der Beiwert α_u . Dies soll jedoch nicht bedeuten, daß die rotierenden Werkzeuge den größtmöglichen Durchmesser haben sollen. Sondern das Gegenteil ist der Fall, wenn die Fahrgeschwindigkeit v_f betrachtet wird, die den Nutzer mehr interessiert als die Umfangsgeschwindigkeit v_u . Die Formel für die spezifische Arbeit kann von der Fahrgeschwindigkeit abhängig gemacht werden:

$$A = A_s + 0,001 \left(\frac{v_u}{v_f} \right)^2 \alpha_u \cdot v_f^2 \quad [\text{kpm/dm}^3]$$

Setzt man in diese Formel

$$\left(\frac{v_u}{v_f} \right)^2 = \pi^2 \left(\frac{D}{Lz} \right)^2 \text{ ein}$$

und nimmt man $\pi^2 = 10$ an, ergibt sich eine Gleichung für die spezifische Arbeit A' der rotierenden Werkzeuge mit dem Durchmesser D' :

$$A' = A_s + 0,01 \frac{D'^{(2-t)} D^t}{L^2 z^2} \alpha_u v_f^2 \quad [\text{kpm/dm}^3] \quad (7)$$

Den Einfluß des Durchmessers auf die Größe der spezifischen Arbeit veranschaulicht Bild 5. Die Ergebnisse wurden bei Fräsenuntersuchungen in der Bodenrinne gewonnen.

Aus Gleichung (7) geht außerdem hervor, daß die Arbeitseinheit A' umgekehrt proportional dem Quadrat der Messeranzahl z und der Länge e der Bissen ist. Aber leider gibt es dabei eine große Begrenzung, denn eine zu hohe Messeranzahl erschwert das Abwerfen der Bissen und führt zur beträchtlichen Erhöhung des Energieverbrauchs beim Mischen des Bodens (s. Bild 3). Dagegen behindern zu lange Bissen die Bodenkrümelung.

Die rotierenden Werkzeuge sind vor allem zur flachen Bodenbearbeitung prädestiniert, und ihr Durchmesser soll möglichst klein sein. Für eine tiefere Bearbeitung eignen sich kombinierte Einrichtungen, bestehend aus gleitenden und rotierenden Werkzeugen besser.

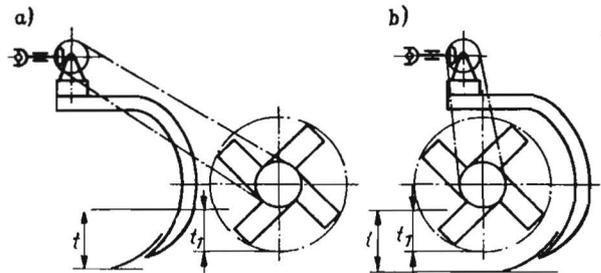
Kombinierte Bodenbearbeitungsmaschinen

Bei den kombinierten Bodenbearbeitungsmaschinen können wir vier Typen unterscheiden. Die erste Variante (Bild 6a) umfaßt die Maschinen, bei denen die Hauptwerkzeuge (z. B. Pflugkörper) unabhängig vom rotierenden Werkzeug (z. B. Senker) arbeiten. Der Energieverbrauch dieses Maschinentyps ist die Summe des Energieverbrauchs durch den Pflug und durch sogenannte Drehsecker.

Den zweiten Typ (Bild 6b) stellen die Pflugschare mit den rotierenden Auflockerern dar. Die rotierenden Auflockerer verbrauchen zwischen 20 Prozent und 80 Prozent Energie, die der Scharpflug benötigt, abhängig von den Bodenbedingungen und der Arbeitstiefe.

Die dritte Variante der kombinierten Maschine (Bild 7) ist charakterisiert durch die Anordnung des Hauptwerkzeugs

Bild 7. Kombination von Kultivatorzinken mit Fräseinrichtungen



(z. B. Kultivatorzinken) vor den rotierenden Werkzeugen. Der Energieverbrauch einer derartigen kombinierten Maschine kann von 30 Prozent bis zu einem Mehrfachen über dem des Kultivators liegen, was von der Arbeitstiefe der Zinken im Verhältnis zur Tiefe des rotierenden Werkzeugs abhängt.

Maschinen des vierten Typs (Bild 7b) sind eine Kombination von Haupt- und rotierendem Gerät. Auch diese Maschinen können, wie die vorherigen, einen Energieverbrauch aufweisen, der wesentlich höher ist als z. B. der des Kultivators oder des Pflugs. Das hängt von vielen Arbeitsparametern ab. Jedoch ist in jedem Fall die spezifische Arbeit der kombinierten Maschine kleiner als die spezifische Arbeit des rotierenden Werkzeugs selbst. Die spezifische Arbeit A_k des kombinierten Geräts kann aus einer Gleichung, die der Gleichung 1 ähnlich ist, berechnet werden. Hier besteht nur der Unterschied, daß die gesamte Tiefe der kombinierten Maschine $l = t_r + t_s$ (Bild 8) sowie der Widerstand F_{Wx} des Hauptgeräts berücksichtigt wird:

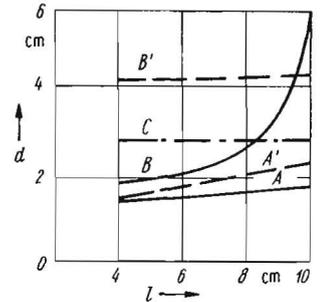
$$A_k = \frac{2 \pi M}{l b b z} - 0,1 \left(\frac{F_x}{t b} - \frac{F_{Wx}}{t b} \right) \text{ [kpm/dm}^3\text{]} \quad (8)$$

Man kann näherungsweise annehmen, daß die Kräfte F_x und F_{Wx} gleich sind und daß das Drehmoment M des rotierenden Werkzeugs selbst genau so groß ist, wie sein Moment in der kombinierten Maschine. Daraus ergibt sich das Verhältnis der spezifischen Arbeit der kombinierten Maschine A_k zur spezifischen Arbeit A derselben rotierenden Einrichtung:

$$\frac{A_k}{A} = \frac{t_r}{t_r + t_s}$$

Bild 8 zeigt einen Vergleich der spezifischen Arbeit der Fräse (ähnliche spezifische Arbeit weist der Schraubepflug auf),

Bild 9
Arbeitsqualität (mittlere Länge der Kluten) unter Feldbedingungen beim Stoppelsturz in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungswerkzeug:
A Fräse $t = 8$ cm, A' Fräse mit Gänsefußschar $t = 18$ cm, B Schraubepflug $t = 8$ cm, B' Schnecke mit Gänsefußschar $t = 18$ cm, C Pflugschar $t = 18,5$ cm



der Kombination Fräse — Gänsefußschar und des Pflugschars. Diese Maschinen arbeiten auf einem mittleren Boden unter Feldbedingungen. Unter diesen Bedingungen war die spezifische Arbeit der kombinierten Einrichtung um 45 bis 65 Prozent kleiner als die Arbeit der Fräse selbst; theoretisch nach der Gleichung (9) sollte diese 55 Prozent kleiner sein.

Die Bodenkrümelung durch diese Geräte, ausgedrückt durch die mittlere Länge der Kluten, veranschaulicht Bild 9. Wie daraus ersichtlich, krümelte der Schraubepflug und der kombinierte Schraubepflug mit Gänsefußschar den Boden schlechter als der Pflug, obwohl der Energieverbrauch durch diese Maschinen wesentlich höher war, als durch den Pflug gleicher Größenordnung. Damit kann der Energieverbrauch kein Maßstab für die Qualität der Krümelung sein.

Für die Bodenbearbeitung kann man nach unseren Erfahrungen sowohl rotierende als auch kombinierte Geräte einsetzen. Viele Faktoren entscheiden über die Höhe des Energieverbrauchs und die Qualität der Arbeit dieser Geräte.

A 8950

Dozent Dr.-Ing. K. Plötner, KDT*
Dipl.-Ing. H. H. Maack, KDT*

1. Spatenwälzgege — ein Gerät zur Bodenbearbeitung

Ein großer Teil der in der Landwirtschaft vorhandenen mobilen energetischen Basis wird jährlich für die Bodenbearbeitung beansprucht.

Während die je Traktor installierte Motorleistung in den letzten Jahren beträchtlich zugenommen hat, erfolgte die Anpassung der Bodenbearbeitungsgeräte und -maschinen an die größeren Traktorleistungen im wesentlichen durch Vergrößerung der Arbeitsbreite bisher bekannter Prinzipien. Qualitativ neue Prinzipien für Geräte und Maschinen der Bodenbearbeitung haben sich in der Praxis nicht durchgesetzt.

In der Literatur [1/ 2/ 3/] findet man mehrfach Hinweise auf die Spatenwälzgege als ein neuartiges Bodenbearbeitungsgerät, das für eine Vielzahl von Bodenbearbeitungsmaßnahmen geeignet ist. Die Spatenwälzgege ist ähnlich der Scheibenegge aufgebaut. Sie besitzt anstelle der gewölbten Scheiben kreuzweise angeordnete, gestreckte scharfkantige Spaten als Arbeitselemente. Aufgrund ihrer Gestaltung und Anordnung sind die Spaten in der Lage, auch in relativ festen oder bewachsenen Boden einzudringen und diesen zu zerkleinern.

Nach dem Stand der Erkenntnisse sind die Spatenwälzgegen, die teilweise auch als Spatenrolleggen bezeichnet werden, zur Saatbettbereitung, zur Stoppel- und Grasnarbenbearbeitung sowie zum Einmischen von Dung und gehäckseltem

Ergebnisse beim Einsatz einer Spatenwälzgege zur Bodenbearbeitung

Stroh in den Boden einsetzbar. Die Arbeitstiefe kann bis 15 cm betragen, wobei die Tiefenregulierung durch Zusatzbelastung erfolgt. Im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Bodenbearbeitungsgeräten eignen sich Spatenwälzgegen gut für den Einsatz bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten und sind deshalb im Hinblick auf die angestrebte Arbeitsproduktivitätssteigerung bei der Bodenbearbeitung interessant.

Ausgehend von genannten Vorteilen wurden an der Sektion Landtechnik der Universität Rostock in Zusammenarbeit mit dem Lehr- und Versuchsgut Groß-Stove Untersuchungen durchgeführt [4/ 5/ 6/], die Entwicklung, Bau und Einsatz-erprobung eines Funktionsmusters der Spatenwälzgege zum Ziel hatten. Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen sollen in diesem Beitrag dargestellt werden.

2. Aufbau und Wirkungsweise

Spezielle Berechnungsunterlagen und Konstruktionsrichtlinien für Spatenwälzgegen sind aus der Literatur nicht bekannt. Deshalb wurde bei der konstruktiven Gestaltung und Anordnung der Spaten für die Spatenwälzgege von bekannten Grundlagen für gewölbte Scheiben ausgegangen.

2.1. Konstruktive Gestaltung der Spaten

Bei der konstruktiven Gestaltung der Spaten nach Bild 1 wurden die Hauptabmessungen nach den Berechnungsunterlagen von Krutikow [7/] ermittelt. Nach Krutikow ist der Scheibendurchmesser D für gewölbte Scheiben der Arbeitstiefe t direkt proportional:

$$D = k \cdot t \text{ mit } k = 3 \dots 6 \quad (1)$$

* Universität Rostock, Sektion Landtechnik
(Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Eichler)