

Dozent Dr.-Ing. K. Plötner, KDT*

Bodenwiderstand und Bodenaufbruch beim Einsatz von Bodenbearbeitungswerkzeugen

1. Problemstellung

Bodenbearbeitungswerkzeuge übertragen auf den Boden Kräfte, die nach Überwinden des Bodenwiderstands den Boden in den Bruchzustand überführen. Die Resultierende des Bodenwiderstands entspricht der Summe der Teilwiderstände, die der Boden den Werkzeugen entgegensetzt. Sie setzt sich aus Schnitt-, Umform-, Hub-, Beschleunigungs- und Reibwiderständen zusammen.

Der Bruchzustand ist allgemein gekennzeichnet durch den Bodenaufbruch und die im Bodenaufbruch enthaltenen Bruchkörper. Aus Untersuchungen von Bodenbearbeitungswerkzeugen, die in erster Linie zum Lockern des Bodens dienen, geht hervor, daß die funktionellen Beziehungen zwischen Größe, Richtung und Lage des Bodenwiderstands und Form und Abmessungen des Bodenaufbruchs in Abhängigkeit von den Boden-, Betriebs- und Konstruktionsparametern für die Konstruktion, für den Betrieb und für die theoretische Ermittlung des Bodenwiderstands derartiger Werkzeuge von Bedeutung sind. Diese Beziehungen stellen einen Bewertungsmaßstab für den Arbeitserfolg von Bodenbearbeitungswerkzeugen dar.

2. Präzisierung der Aufgabenstellung

Der Stand der landtechnischen Forschung zu den dargelegten Problemen zeigt, daß der Einfluß der Boden-, Betriebs- und Konstruktionsparameter auf die funktionellen Beziehungen zwischen Bodenwiderstand und Bodenaufbruch noch nicht ausreichend geklärt ist. Präzisiert man die Aufgabenstellung, dann sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie wirken sich die Bodenparameter und die Konstruktions- und Betriebsparameter der Werkzeuge auf den Bodenwiderstand und den Bodenaufbruch beim Einsatz von Einzelwerkzeugen aus?
- Wie verändert sich der Bodenwiderstand und der Bodenaufbruch von Einzelwerkzeugen, wenn diese durch gleichartige Werkzeuge einseitig oder beiderseitig beeinflußt werden?
- Wie müssen die Einzelwerkzeuge konstruktiv ausgeführt und angeordnet werden, um einen möglichst großen Bodenaufbruch mit wirtschaftlichem Energieaufwand zu erzielen?

Bei den theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu dieser Fragestellung sind als wesentliche Parameter zu berücksichtigen:

- Bodenparameter: Bodenart und Bodenzustand
- Betriebsparameter: Fahrgeschwindigkeit v und Arbeitstiefe h
- Konstruktionsparameter: Werkzeugbreite b_w , Schnittwinkel δ und Werkzeugabstand b_z

3. Experimentelle Untersuchungen

Die theoretischen Untersuchungen konnten die gestellten Fragen zwar nicht beantworten, sie gaben jedoch Hinweise

für die experimentellen Untersuchungen und für das Deuten der Versuchsergebnisse /1/.

3.1. Versuchsprogramm und Versuchseinrichtungen

Für die experimentellen Untersuchungen sah das Versuchsprogramm nach Tafel 1 und Bild 1 drei Versuchsvarianten mit ausgewählten Versuchsreihen vor, die sich aus den Schlußfolgerungen zum Stand der landtechnischen Forschung und den theoretischen Betrachtungen ergaben /1/. Die Versuchsvarianten I, II und III dienen zur Untersuchung der Einflußparameter der Werkzeuge unter Berücksichtigung ihrer praktisch möglichen Anordnung: Die schematische Darstellung der Versuchsvarianten bringt die Werkzeuganordnung und den Bodenaufbruch in der yz -Ebene zum Ausdruck.

Als Versuchswerkzeuge wurden verwendet:

- Modellwerkzeuge (MW) als ebene, geneigte Flächen mit Werkzeugbreiten von $b_w = 50$ mm bis 250 mm in Stufen von 50 mm und stufenlos verstellbaren Schnittwinkeln $\delta = 20^\circ$ bis 60° .

Diese Modellwerkzeuge ermöglichen ein systematisches Variieren der Betriebs- und Konstruktionsparameter bei den experimentellen Untersuchungen.

- Grubberwerkzeuge in Form von Spitzscharen (S), schmalen (SG) und breiten (BG) Gänsefußscharen, wie sie von der Industrie gefertigt werden.

Die Versuche wurden unter Labor- (Boden M) und Praxisbedingungen (Boden A und B) mit konstanten Bodenparametern durchgeführt. Nach der Textur beurteilt waren die Bodenarten:

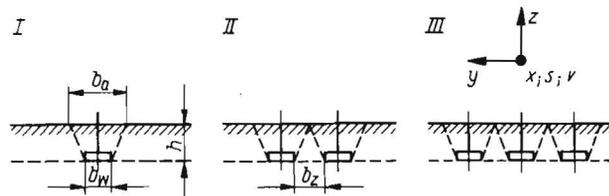
Boden A — sandiger Lehm, Boden B — Lehm und Boden M — sandiger Lehm.

Für die Untersuchungen wurden ein Versuchs-Anbaugerät mit einer elektrischen 5-Komponentenmeßeinrichtung und eine mechanische Profilmßeinrichtung entwickelt /1/.

Das Versuchs-Anbaugerät nach Bild 2 ermöglicht mit Hilfe der elektrischen 5-Komponentenmeßeinrichtung das Messen der räumlich wirkenden Kräfte an den zu untersuchenden Einzelwerkzeugen. Einzelheiten der elektrischen 5-Komponentenmeßeinrichtung sind in /2/ /3/ beschrieben.

Mit der Profilmßeinrichtung wurde der Bodenaufbruch als vertikale Querschnittsfläche senkrecht zur Bewegungsrichtung der Werkzeuge aufgenommen. Aufbau, Wirkungsweise und Erfahrungen bei der Anwendung der Profilmßeinrichtung sind in /4/ erläutert.

Bild 1. Versuchsvarianten: I Einzelwerkzeuge, II Anordnung eines Werkzeugs links neben dem Meßwerkzeug (einseitige Beeinflussung), III Anordnung je eines Werkzeugs links und rechts neben dem Meßwerkzeug (beiderseitige Beeinflussung)

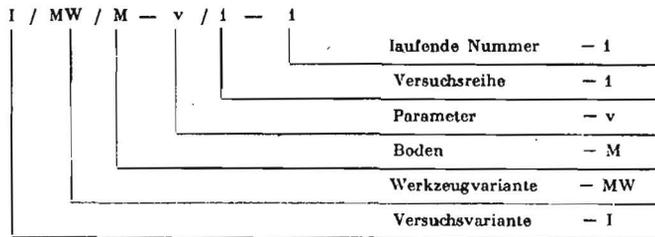


* Universität Rostock, Sektion Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Eichler)

Tafel 1. Versuchsprogramm für die experimentellen Untersuchungen über den Bodenwiderstand und den Bodenaufbruch

Ver- suchs- variante	Werk- zeug- variante	Boden	Versuchsreihe	Betriebs- und Konstruktionsparameter				
				φ m/s	h mm	δ_0	b_w mm	b_a cm
I	MW	M	I/MW/M - v/1 - 1	0,38...2,46	223	20	100	
			I/MW/M - v/2 - 2	0,18...2,42	219	60	100	
			I/MW/M - h/1 - 3	0,24	45...310	20	100	
			I/MW/M - h/2 - 4	0,28	60...300	40	100	
			I/MW/M - h/3 - 5	0,23	60...263	60	100	
			I/MW/M - δ /1 - 6	0,17	110	20...60	50	
			I/MW/M - δ /2 - 7	0,17	165	20...60	50	
			I/MW/M - δ /3 - 8	0,20	210	20...60	50	
			I/MW/M - δ /4 - 9	0,26	120	20...60	100	
			I/MW/M - δ /5 - 10	0,28	175	20...60	100	
			I/MW/M - δ /6 - 11	0,21	215	20...60	100	
			I/MW/M - b_w /1 - 12	0,21	215	20	50...250	
			I/MW/M - b_w /2 - 13	0,18	215	60	50...150	
			I/MW/M - b_w /3 - 14	0,21	250	20	50...250	
II	MW	A	II/MW/A - v/1 - 15	0,30...2,08	207	20	100	
			II/MW/A - h/1 - 16	0,31	75...205	20	100	
			II/MW/A - δ /6 - 17	0,30	217	20...60	100	
			II/MW/A - b_w /1 - 18	0,30	183	20	50...250	
III	MW	M	III/1/MW/M - b_z /1 - 29	0,25	221	20	100	0...20
			III/1/MW/M - b_z /2 - 30	0,27	223	60	100	0...20
			III/1/MW/M - v/1 - 31	0,25...2,31	225	20	100	14
III	MW	A	III/1/MW/A - b_z /3 - 32	0,31	182	20	50	0...10
			III/1/MW/B - v/1 - 33	0,31...1,76	160	30	140	0
III	MW	M	III/1/MW/B - v/2 - 34	0,34...1,81	120	30	140	10
			III/1/MW/M - b_z /1 - 35	0,24	228	20	100	0...17
III	MW	M	III/1/MW/M - v/1 - 36	0,24...2,19	232	20	100	14

Bezeichnung der Versuchsreihen:



3.2. Gewinnen und Aufbereiten der Kennwerte zum Charakterisieren des Bodenwiderstands, des Bodenaufbruchs und des Arbeitserfolgs

- Der Bodenwiderstand wird nach Bild 3 charakterisiert durch
- die Kraftkomponenten F_x , F_y und F_z des resultierenden Bodenwiderstands in Richtung der x -, y - und z -Koordinatenachse
- die Lage des resultierenden Bodenwiderstands zur Werkzeugfläche, gekennzeichnet durch h_A in der xz - und durch Δl_y in der xy -Ebene
- die Richtung des resultierenden Bodenwiderstands φ zur horizontalen Richtebene.

Die Kraftkomponenten F_x , F_y und F_z wurden durch statistische Auswertung der mit der 5-Komponentenmeßeinrichtung aufgenommenen Meßschriebe gewonnen. Die Lage des resultierenden Bodenwiderstands (h_A und Δl_y) wurde nach Berechnungsgleichungen /1/ ermittelt, die sich aus Momentenbetrachtungen am Anbauversuchsgerät ableiten ließen. Die Richtung des resultierenden Bodenwiderstands φ wurde mit Hilfe der Kraftkomponenten über Winkelfunktionen berechnet. Für den Bodenaufbruch sind nach Bild 4 folgende Kennwerte charakteristisch:

- Aufbruchbreite b_a bei $h_a = 0$
- Aufbruchfläche S_A , die durch die Funktion $b_a = f(h_a)$ und die Höhenlinien bei $h_a = 0$ und $h_a = h$ gebildet wird
- Aufbruchfaktor K_A , der das Verhältnis der maximalen, seitlichen Aufbruchbreite (b_s bei $h_a = 0$) zur Arbeitstiefe angibt

— Aufbruchwinkel θ , der sich zwischen der Höhenlinie bei $h_a = 0$ und der Tangente im Punkt C an die Kurve $b_a = f(h_a)$ ergibt.

Die genannten Kennwerte folgen aus der Auswertung der mit der Profilmßeinrichtung aufgenommenen Profilmßeßschriebe /4/.

Der Arbeitserfolg wird durch den theoretischen und den wirklichen spezifischen Bodenwiderstand charakterisiert. Für die drei Versuchsvarianten ist der theoretische spezifische Bodenwiderstand:

$$k_{th} = \frac{F_x}{b_w \cdot h} \text{ für Versuchsvariante I} \quad (1)$$

$$k_{th} = \frac{F_{xe}}{2b_x \cdot h} \text{ für Versuchsvariante II} \quad (2)$$

mit $F_{xe} = F_{xI} + F_{xII}$

$$k_{th} = \frac{F_{xb}}{3b_w \cdot h} \text{ für Versuchsvariante III} \quad (3)$$

mit $F_{xb} = F_{xI} + 2F_{xII}$

Der theoretische spezifische Bodenwiderstand wird von Krutikov /5/ in der Form für Pflugkörper verwendet. Da die Versuchswerkzeuge im Vergleich zu den Pflugkörpern den Boden in der vertikalen Richtebene nicht schneiden, sondern nach den Bildern 3 und 4 aufbrechen, führt das Verwenden dieses Kennwerts beim Beurteilen derartiger Werkzeuge (z. B. Grubberwerkzeuge in der 1. und in der 2. Reihe) zu Fehlschlüssen. Das wird durch die Bezeichnung theoretischer Kennwert zum Ausdruck gebracht.

Bild 2
Konstruktionsschema des Versuchsanbaugeräts:
a Rahmen, b Zusatzrahmen, c Stützrad, d elektrische Meßeinrichtung zum Ermitteln der räumlich wirkenden Kräfte, e Stiel des Meßwerkzeugs, f Werkzeug als Meßwerkzeug, g Werkzeug neben dem Meßwerkzeug angeordnet, i elektrische Meßeinrichtung zum Ermitteln der Fahrgeschwindigkeit und der Änderung der Arbeitstiefe, k Tastrad

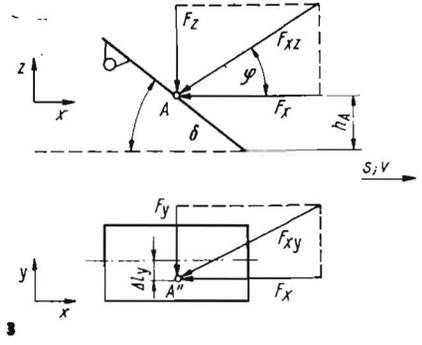
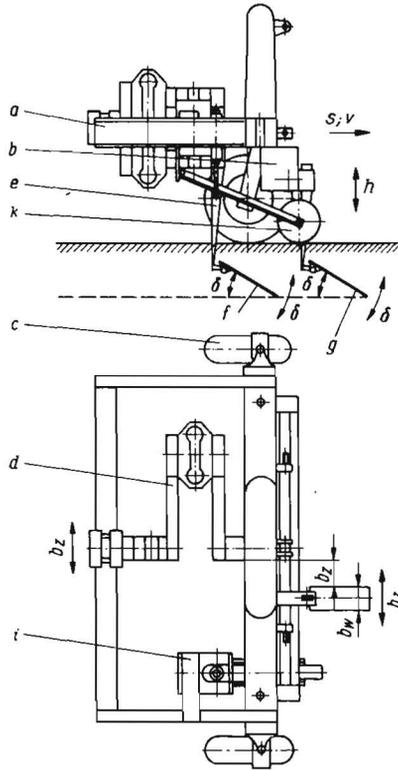


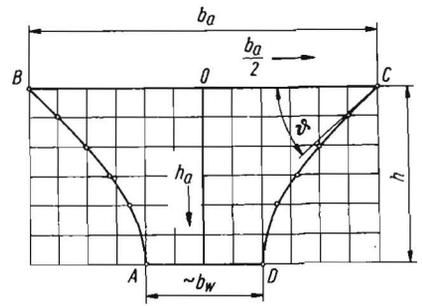
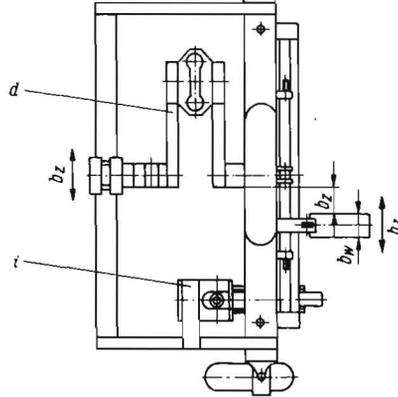
Bild 3
Kennwerte zum Charakterisieren des Bodenwiderstands

Bild 4
Kennwerte zum Charakterisieren des Bodenaufbruchs;

$$K_A = \frac{b_a(ha=0) - b_a(ha=h)}{2h} = \frac{b_g}{h} \text{ mit}$$

$$b_a(ha=h) \approx b_w$$

S_A Fläche ABCD



Der wirkliche spezifische Bodenwiderstand für die Versuchsvarianten I bis III folgt aus dem Verhältnis der Mittelwerte für die Kraftkomponente F_x und die Aufbruchfläche S_A . Für diesen Kennwert ist der Nenner in den Gleichungen (1) bis (3) durch S_A zu ersetzen. Bei den Versuchsvarianten II und III ergibt sich die Kraftkomponente F_{xe} und F_{xb} aus

den Anteilen, die nach der Versuchsvariante I und II ermittelt wurden. Die Mittelwerte für F_x und S_A werden innerhalb einer Meßstrecke bestimmt. Damit sind die Voraussetzungen, den horizontalen Bodenwiderstand F_x und den Bodenaufbruch S_A als zwei zusammengehörige Kriterien für den Arbeitserfolg von Bodenbearbeitungswerkzeugen zu betrach-

Bild 5. Kennwerte für den Bodenwiderstand, den Bodenaufbruch und den Arbeitserfolg der Modellwerkzeuge in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und vom Schnittwinkel unter Laborbedingungen;
Versuchsbedingungen: Arbeitstiefe $h = 221$ mm, Werkzeugbreite $b_w = 100$ mm; Bodenart sandiger Lehm; Bodenfeuchtigkeit $f_B = 7,3\%$, Bodendichte $\rho_B = 1,94$ g/cm³, Kohäsion $c = 0,16$ kp/cm², innerer Reibwinkel $\varphi_1 = 44,54^\circ$, äußerer Reibwinkel $\varphi_B = 27,96^\circ$

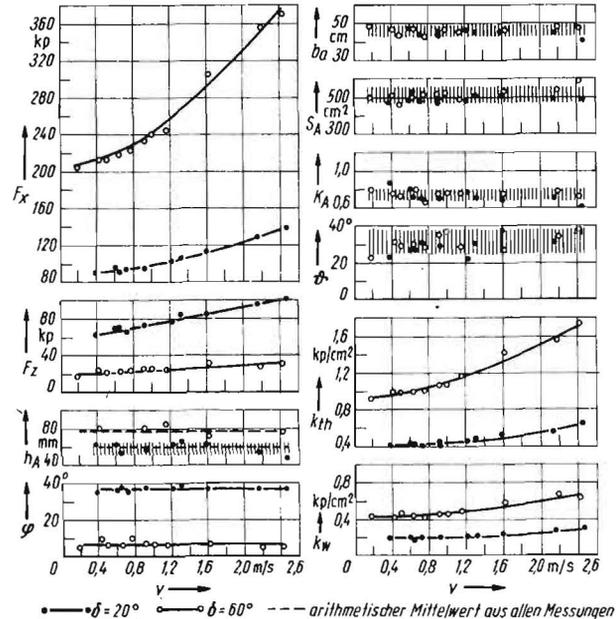
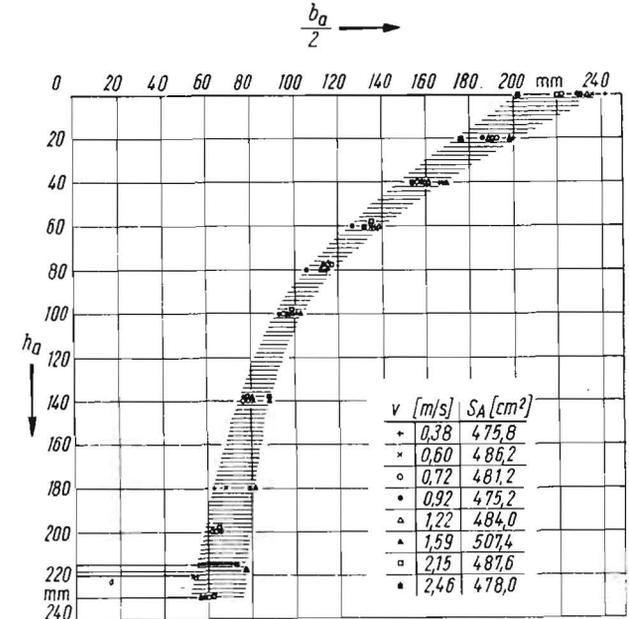


Bild 6. Einfluß der Fahrgeschwindigkeit der Modellwerkzeuge auf die Aufbruchbreite in Abhängigkeit von der Aufbruchtiefe unter Laborbedingungen;
Versuchsbedingungen: Arbeitstiefe $h = 223$ mm, Werkzeugbreite $b_w = 100$ mm, Schnittwinkel $\delta = 20^\circ$, Bodenart sandiger Lehm, Bodenfeuchtigkeit $f_B = 7,3\%$, Bodendichte $\rho_B = 1,94$ g/cm³, Kohäsion $c = 0,16$ kp/cm², innerer Reibwinkel $\varphi_1 = 44,54^\circ$, äußerer Reibwinkel $\varphi_B = 27,96^\circ$



ten, erfüllt. Der theoretische spezifische Bodenwiderstand verdeutlicht im Vergleich zum wirklichen den Anteil des seitlichen Bodenaufbruchs am Arbeiterfolg der Versuchswerkzeuge. In der definierten Form ist der Arbeiterfolg der Versuchswerkzeuge gut, wenn k_w oder auch k_{th} ein Minimum erreichen.

3.3. Versuchsergebnisse

Von den Versuchsergebnissen, die nach dem beschriebenen Versuchsprogramm ermittelt wurden /1/, seien im Rahmen dieses Beitrags nur Beispiele angeführt. Ohne auf die Abweichungen der Meßwerte näher einzugehen, folgt aus den Bildern 5 und 6 für die Kennwerte des Bodenwiderstands, des Bodenaufbruchs und des Arbeiterfolgs der Modellwerkzeuge in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und vom Schnittwinkel unter Laborbedingungen nach Versuchsvariante I (Einzelwerkzeuge):

Im untersuchten Fahrgeschwindigkeits- und Schnittwinkelbereich reichen die von den Werkzeugen im Boden hervorgerufenen Beanspruchungen nicht aus, den Bodenaufbruch zu vergrößern. Unter der Voraussetzung, daß die Scherfestigkeit des Bodens im untersuchten Geschwindigkeitsbereich konstant ist, sind die ansteigenden Widerstände im wesentlichen auf größer werdende Hub-, Beschleunigungs-, Umform- und Reibwiderstände zurückzuführen. Demnach werden die mit der Fahrgeschwindigkeit ansteigenden Kräfte vorrangig innerhalb des Bodenaufbruchs wirksam. Das Minimum des horizontalen Bodenwiderstands im Schnittwinkelbereich von $\delta = 20^\circ$ bis 30° , das sich bei den Versuchsreihen in Abhängigkeit vom Schnittwinkel ergab, folgt aus dem Minimum der Reibwiderstände in diesem Bereich. Die Versuchsergebnisse der Kontrollversuche unter Praxisbedingungen mit den Modell- und auch mit den Grubberwerkzeugen bestätigen im wesentlichen die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten.

Die dabei auftretenden Abweichungen resultieren aus Schwankungen der Bodenparameter und aus den Wurzeinflüssen. Aus den insgesamt ermittelten Ergebnissen bei der Untersuchung der Einzelwerkzeuge können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden /1/.

Für die Theorie:

Die Kraftwirkungen der Werkzeuge rufen im Boden einen räumlichen Bruchvorgang hervor, der zu trapezförmigen Bodenaufbrüchen führt und durch den seitlichen Bodenaufbruch gekennzeichnet ist.

Dabei treten die Boden-, Betriebs- und Konstruktionsparameter komplex in Erscheinung. Aus den Kennwerten für den Arbeiterfolg k_w und k_{th} folgt, daß die Bruchkräfte für den seitlichen Bodenaufbruch theoretisch zu berücksichtigen sind.

Für die Konstruktion:

Nach den Beziehungen zwischen Bodenwiderstand und Bodenaufbruch zeigen Werkzeuge mit kleinen Schnittwinkeln ($\delta < 30^\circ$) und großen Werkzeugbreiten ($b_w > 250$ mm) einen guten Arbeiterfolg. Die Zerkleinerung des Bodens im Bodenaufbruch wurde dabei nicht untersucht.

Der angedeutete Formeinfluß bei der Untersuchung der Grubberwerkzeuge weist darauf hin, daß sich der Bodenaufbruch durch zielgerichtete Kraftwirkungen steuern läßt. Die Ergebnisse bei Beeinflussung der Einzelwerkzeuge durch nebeneinander arbeitende Werkzeuge bestätigen und präzisieren diese Schlußfolgerungen. Bei nebeneinander angeordneten Werkzeugen verläuft der Bodenaufbruch wie bei Einzelwerkzeugen, wobei sich je nach Werkzeugabstand die Bodenaufbrüche überschneiden. Die Abstände zwischen zwei Werkzeugen werden durch unbearbeitete Bodenstreifen, die den agrotechnischen Forderungen widersprechen, festgelegt. Bis zu einem Werkzeugabstand von $b_z = 10$ cm waren keine

ausgeprägten Bodenstreifen, deren Ausbildung von den Boden- und Betriebsparametern beeinflusst wird, nachweisbar.

Auch die Ergebnisse mit nebeneinander angeordneten Werkzeugen bestätigen die Vorteile größerer Werkzeugbreiten. Die Untersuchungen von Vornkahl /6/, Antoschkewitsch /7/, Vagin und Zenkevic /8/ und Söhne /9/ führten unter anderen Gesichtspunkten zu gleichen Aussagen.

4. Zusammenfassung

Bodenbearbeitungswerkzeuge übertragen auf den Boden Kräfte, die nach Überwinden des Bodenwiderstands zum Bodenaufbruch führen. Für Bodenbearbeitungswerkzeuge, die in erster Linie zum Lockern des Bodens dienen, interessieren die funktionellen Beziehungen zwischen dem Bodenwiderstand und dem Bodenaufbruch in Abhängigkeit von Boden-, Betriebs- und Konstruktionsparametern. Für diese Probleme wird die Aufgabenstellung für experimentelle Untersuchungen präzisiert.

Von den experimentellen Untersuchungen werden das Versuchsprogramm und die Versuchseinrichtungen sowie die Methoden zum Gewinnen und Aufbereiten der Kennwerte zum Charakterisieren des Bodenwiderstands, des Bodenaufbruchs und des Arbeiterfolgs für die Versuchswerkzeuge beschrieben. Abschließend werden Beispiele für Versuchsergebnisse dargelegt. Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich Schlußfolgerungen für die theoretische Bestimmung des Bodenwiderstands sowie für die Konstruktion und Anordnung von Werkzeugen zur Bodenlockerung.

Literatur

- /1/ Plötner, K.: Untersuchungen über den Bodenwiderstand und den Bodenaufbruch beim Einsatz von Lockerungswerkzeugen. Dissertation, TU Dresden, 1970
- /2/ Plötner, K.: Eine elektrische 5-Komponentenmeßeinrichtung. Dt. Agrartechnik 22 (1972) H. 11, S. 517-519
- /3/ Plötner, K.: Zur Ermittlung räumlich wirkender Kräfte in der Landtechnik. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe, 20 (1971) H. 3/4, S. 281-292
- /4/ Plötner, K.: Eine Profilmßeinrichtung zum Bestimmen des Bodenaufbruchs beim Einsatz von Werkzeugen zur Bodenlockerung. Agrartechnik 23 (1973) H. 1, S. 40-42
- /5/ Krutikow, N. P., u. a.: Theorie, Berechnung und Konstruktion der Landmaschinen (Band I), Berlin: VEB Verlag Technik 1955
- /6/ Vornkahl, W.: Beitrag zur Gestaltung von zinkenartigen Bodenbearbeitungswerkzeugen. Grundlagen der Landtechnik 17 (1967) H. 3, S. 95-98
- /7/ Antoschkewitsch, L. N., u. a.: Maschinen und Geräte für winderodierte Böden. Traktory i sel'chozmasiny 36 (1966) H. 5, S. 12-13
- /8/ Vagin, A. T./E. I. Zenkevic: Technologische Grundlagen der Mechanisierung der Bodenbearbeitung im schwarzerden Gebiet der UdSSR. Trudy ZNIIMESCH (Band III), Minsk 1964, S. 3-11
- /9/ Söhne, W.: Form und Anordnung von Fräsworkzeugen. Grundlagen der Landtechnik (1957) H. 9, S. 69-87 A 8951

VT-Neuerscheinungen

Böhme, L.: Periphere Geräte der digitalen Datenverarbeitung. Reihe Automatisierungstechnik, Band 70. 3., stark bearbeitete Aufl., 14,7 cm × 21,5 cm, 104 Seiten, 50 Bilder, 7 Tafeln, Broschur, 6,40 M, Sonderpreis für die DDR 4,80 M

Töpfer, H.: Pneumatische Bausteinsysteme der Digitaltechnik. Reihe Automatisierungstechnik, Band 55. 2., stark bearbeitete Aufl., 14,7 cm × 21,5 cm, 88 Seiten, 77 Bilder, 3 Tafeln, Broschur, 6,40 M, Sonderpreis für die DDR 4,80 M

AK 9050