

Methode zum Ermitteln der dynamischen Belastung des Bodens und der daraus resultierenden Bodenspannungen

Am Stand der landtechnischen Forschung gemessen wird die mechanische Bodenbearbeitung für die Zukunft noch bestimmend sein. Durch das Einwirken der Werkzeuge muß der Boden in einen Zustand gebracht werden, der für das Wachstum der Pflanzen optimale Voraussetzungen bietet. Nach Lucius /1/ können folgende Methoden zur Entwicklung von Werkzeugen angewendet werden:

- Empirische Entwicklung von Werkzeugen
- Exakte Berechnung der Werkzeuge aufgrund der Verhaltensweise des Werkstoffes „Boden“
- Systematische Untersuchung von Werkzeugelementen. Im folgenden soll nur auf die Methode b) näher eingegangen werden.

Für die exakte Berechnung der Werkzeuge muß das Verhalten des Bodens bei statischer und dynamischer Belastung bekannt sein. Darüber liegen nur sehr wenige Erkenntnisse vor, besonders zum Problem der dynamischen Belastung. Das vorgestellte Verfahren ermöglicht es, die eingeleiteten Kräfte und die daraus folgenden Spannungen im Boden zu erfassen.

1. Bodenphysikalische Kenngrößen und ihr Systemcharakter

Die Eigenschaften des Werkstoffes „Boden“ werden durch eine Vielzahl von Größen beeinflusst.

Das Erforschen des Einflusses dieser Größen auf die Werkstoffeigenschaften erfordert eine beliebige Veränderung des einen oder anderen Parameters. Dabei sind alle anderen Einflußfaktoren konstant zu halten. Diese Forderung kann durch die ständige Einwirkung der Umwelteinflüsse nur schwer verwirklicht werden. Die Einführung bodenphysikalischer Kennzahlen ermöglicht eine gewisse Charakterisierung und damit eine Unterscheidung der Böden. Kézdi /2/ teilt die physikalischen Eigenschaften nach den Gesichtspunkten der Baugrundmechanik in drei Gruppen ein. Diese grundsätzliche Einteilung wird auch bei der landtechnischen Bodenmechanik beibehalten.

- Gruppe: Größen, die vom Zustand des Bodens unabhängig sind (Größe, Gestalt und Verteilung der Körner und deren mineralogische Zusammensetzung).
- Gruppe: Größen, die den Zustand zahlenmäßig beurteilen (Feuchtigkeit, Porenanteil, Dichte usw.)
- Gruppe: Größen, die das Verhalten des Bodens unter Einwirkung äußerer statischer und dynamischer Kräfte kennzeichnen. (Zug-, Druck- und Scherfestigkeit, Deformationseigenschaften usw.)

Die Größen aller Gruppen stehen eng im Zusammenhang. Ihre komplexe Betrachtung ergibt eine aussagekräftige Beurteilung eines bestimmten Bodens. Die Klärung dieser Zusammenhänge erfordert größtenteils umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Die Meßverfahren sind so zu wählen, daß die gesuchten Größen exakt angegangen werden. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich beim Ermitteln der Größen der Gruppe 3. Es sind jeweils die dynamische Belastung des Bodens und die Spannungen im Boden infolge der Belastung, also die Ursache und ihre Wirkung, zu messen.

2. Geeignete Meßverfahren zur Ermittlung der dynamischen Belastung des Bodens und der daraus resultierenden Bodenspannungen

2.1. Bestimmung der dynamischen Belastung

2.1.1. Anforderungen an das Meßverfahren

Das Ziel der Messung und die Meßbedingungen legen eindeutig die Anforderungen an das Meßverfahren fest.

Ziel der Untersuchung ist es, die Wechselwirkung zwischen den eingeleiteten Kräften in den Boden und die daraus entstehenden Spannungen im Boden zu erfassen.

Zunächst müssen die eingeleiteten Kräfte und deren Angriffspunkte bestimmt werden. Nach der vorhandenen Literatur /3/ kann angenommen werden, daß sich die drei Kraftkomponenten in einem Punkt auf der Werkzeugoberfläche schneiden. Das Auftreten von reinen Momenten ist auf einer ebenen Werkzeugfläche kaum möglich.

Das dynamische Untersuchen des Meßsystems ist unbedingt notwendig, da die Meßgeber bei den Versuchen dynamisch belastet werden. Dabei spielt die Amplitudenvergrößerung eine wichtige Rolle. Nach Holzweißig /4/ muß bei einer Dämpfung $D = 0$ die Bedingung

$$\frac{\Omega_{\max}}{\omega} \ll 1$$

(Ω_{\max} = höchste Erregerfrequenz, ω = kleinste Eigenfrequenz des Meßsystems) unbedingt eingehalten werden. Das Einhalten dieser Forderung läßt den Fehler für die Amplitudenvergrößerung vernachlässigbar klein werden. Aus den oben angeführten Meßzielen ergeben sich folgende Meßgrößen (Bild 1).

- F_x — Kraftkomponente in x -Richtung
 - F_y — Kraftkomponente in y -Richtung
 - F_z — Kraftkomponente in z -Richtung
 - x
 - y
 - z
- } Koordinaten des Kraftangriffspunktes

Die Bestimmung der Größen F_x , F_y und F_z ist relativ einfach. Schwierigkeiten treten bei der Ermittlung der Koordinaten des Kraftangriffspunktes auf. Die direkte Messung ist nicht möglich. Es muß eine Meßgröße gefunden werden, die diese Werte enthält. Dafür erscheint das Moment geeignet.

In einem beliebigen Punkt P im Raum (Bild 1) greifen die Kraftkomponenten F_x , F_y und F_z an. Ein kartesisches Koordinatensystem wird mit dem Ursprung in den Punkt O gelegt. Damit hat P die Koordinaten x , y und z . Es ergeben sich bei der Aufstellung der Momentengleichgewichte folgende Gleichungen:

$$M_x - F_z \cdot y + F_y \cdot z = 0 \quad (1)$$

$$M_y + F_z \cdot x - F_x \cdot z = 0 \quad (2)$$

$$M_z + F_x \cdot y - F_y \cdot x = 0 \quad (3)$$

Die Arbeitsfläche der Werkzeuge liefert eine weitere Gleichung zum Bestimmen der einzelnen Größen

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

* TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik (Direktor: Prof. Dr. habil. R. Thurin)

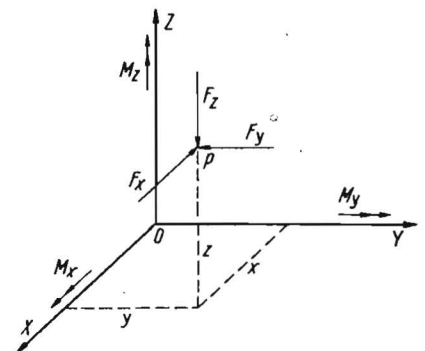


Bild 1
Kraftkomponenten
im Raum

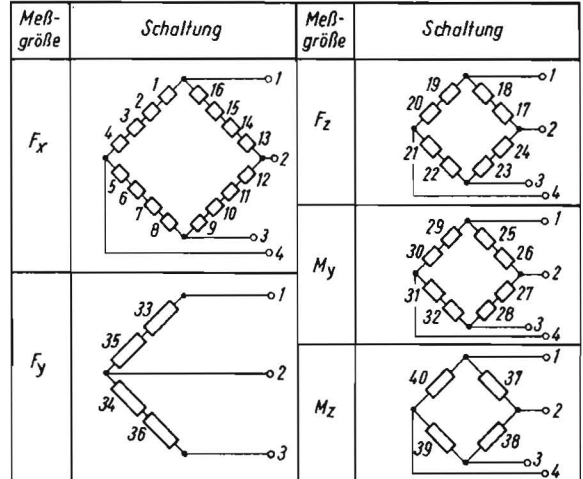
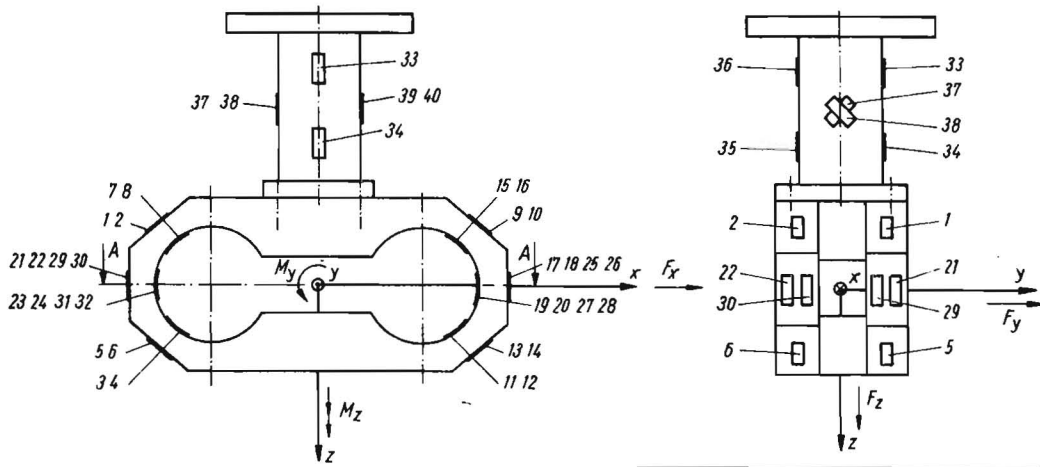


Bild 2. Meßgeber

Gleichung (1) bis (4) enthalten neun Unbekannte. Es ist erforderlich, fünf Größen zu messen, damit die Koordinaten des Kraftangriffspunktes bestimmt werden können.

2.1.2. Aufbau und Wirkungsweise des Meßgebers

Aufgrund der unter 2.1.1 dargestellten Beziehungen wird festgelegt, die Kräfte F_x , F_y , F_z und die Momente M_y und M_z zu messen. Da eine Beeinflussung der Kräfte untereinander nicht auftreten darf, ergab sich der im Bild 2 dargestellte Meßgeber /5/.

Am Beispiel der Größe F_z wird die Wirkungsweise des Meßgebers erläutert. Ist die Kraft $F_z < 0$, dann werden die Dehnmeßstreifen 17, 18, 21 und 22 gedehnt, während die Dehnmeßstreifen 19, 20, 23 und 24 gestaucht werden. Das Brückengleichgewicht

$$\frac{R_{17} + R_{18}}{R_{23} + R_{24}} = \frac{R_{19} + R_{20}}{R_{21} + R_{22}} \quad \text{verändert sich} \quad (5)$$

zu

$$\frac{R_{17} + \Delta R_{17} + R_{18} + \Delta R_{18}}{R_{23} - \Delta R_{23} + R_{24} - \Delta R_{24}} = \frac{R_{19} - \Delta R_{19} + R_{20} - \Delta R_{20}}{R_{21} + \Delta R_{21} + R_{22} + \Delta R_{22}} \quad (6)$$

Dadurch entsteht zwischen den Punkten 2 und 4 ein Potentialunterschied, der der eigentlichen Meßgröße proportional ist (Brückenspeisespannung an 1 und 3).

Alle anderen Meßbrücken arbeiten analog und sollen nicht weiter betrachtet werden. Der Fehler, der durch die gegenseitige Beeinflussung auftritt, beträgt $\approx \pm 3\%$. Er ist sehr stark von der Fertigungsgenauigkeit des Gebers und von der

Aufklebgenauigkeit der Dehnmeßstreifen abhängig, wenn vorausgesetzt wird, daß die Kennwerte der Dehnmeßstreifen übereinstimmen.

2.2. Bestimmung der Spannungen im Boden

2.2.1. Anforderungen an das Meßverfahren

Die im Boden durch dynamische Belastung auftretenden Spannungen sollen ermittelt werden. Die dazu erforderlichen Meßgrößen werden anhand des Modells nach Bild 3 fixiert. An einem Bodenwürfel (Bild 3) sind alle auftretenden Spannungen angetragen, die bei einer dynamischen Belastung des Bodens auftreten. Aus Gleichgewichtsbeziehungen in den verschiedenen Raumrichtungen ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} \text{x} \quad & -p_x + \sigma_x + \tau_{yx} + \Delta\tau_{yx} - \tau_{yx} + \tau_{zx} + \Delta\tau_{zx} - \tau_{zx} - \frac{m\ddot{x}}{a^2} = 0 \end{aligned}$$

$$-p_x + \sigma_x + \Delta\tau_{yx} + \Delta\tau_{zx} - \frac{m\ddot{x}}{a^2} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{y} \quad & -p_y + \sigma_y + \tau_{xy} + \Delta\tau_{xy} - \tau_{xy} + \Delta\tau_{zy} - \tau_{zy} - \frac{m\ddot{y}}{a^2} = 0 \end{aligned}$$

$$-p_y + \sigma_y + \Delta\tau_{xy} + \Delta\tau_{zy} - \frac{m\ddot{y}}{a^2} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{z} \uparrow \quad & -p_z + \sigma_z + \tau_{xz} + \Delta\tau_{xz} - \tau_{xz} + \tau_{yz} + \Delta\tau_{yz} - \tau_{yz} - \frac{m}{a^2}(\ddot{z} + g) = 0 \end{aligned}$$

$$-p_z + \sigma_z + \Delta\tau_{xz} + \Delta\tau_{yz} - \frac{m}{a^2}(\ddot{z} + g) = 0 \quad (9)$$

Die Momentenbilanzen um den Schwerpunkt liefern drei zusätzliche Gleichungen

$$(2\tau_{xy} + \Delta\tau_{xy}) \frac{a}{2} = (2\tau_{yx} + \Delta\tau_{yx}) \frac{a}{2}$$

$$\tau_{xy} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{xy}}{\tau_{xy}} \right) = \tau_{yx} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{yx}}{\tau_{yx}} \right) \quad (10)$$

$$(2\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz}) \frac{a}{2} = (2\tau_{zx} + \Delta\tau_{zx}) \frac{a}{2}$$

$$\tau_{xz} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{xz}}{\tau_{xz}} \right) = \tau_{zx} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{zx}}{\tau_{zx}} \right) \quad (11)$$

$$(2\tau_{yz} + \Delta\tau_{yz}) \frac{a}{2} = (2\tau_{zy} + \Delta\tau_{zy}) \frac{a}{2}$$

$$\tau_{yz} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{yz}}{\tau_{yz}} \right) = \tau_{zy} \left(2 + \frac{\Delta\tau_{zy}}{\tau_{zy}} \right) \quad (12)$$

Unter den Voraussetzungen

$$\frac{\Delta\tau_{xy}}{\tau_{xy}} \ll 2; \quad \frac{\Delta\tau_{xz}}{\tau_{xz}} \ll 2; \quad \frac{\Delta\tau_{yz}}{\tau_{yz}} \ll 2$$

$$\frac{\Delta\tau_{yx}}{\tau_{yx}} \ll 2; \quad \frac{\Delta\tau_{zx}}{\tau_{zx}} \ll 2; \quad \frac{\Delta\tau_{zy}}{\tau_{zy}} \ll 2 \quad (13)$$

ergibt sich aus den Gleichungen (10), (11) und (12)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (14)$$

Mit Hilfe der Beziehungen (13) und (14) folgt aus den Gleichungen (7), (8) und (9)

$$-p_x + \sigma_x + \Delta\tau_{xy} + \Delta\tau_{xz} - \frac{m}{a^2} \ddot{x} = 0$$

$$-p_y + \sigma_y + \Delta\tau_{xy} + \Delta\tau_{yz} - \frac{m}{a^2} \ddot{y} = 0 \quad (15)$$

$$-p_z + \sigma_z + \Delta\tau_{xz} + \Delta\tau_{yz} - \frac{m}{a^2} (\ddot{z} + g) = 0$$

Die Gleichungen (15) enthalten 12 Unbekannte. Da aber nur drei Gleichungen vorhanden sind, müssen neun Größen gemessen werden. Die Bestimmung der Scherspannungen τ_{xy} , τ_{xz} und τ_{yz} bereitet große Schwierigkeiten und ist noch ungeklärt. Deshalb sollen die Normalspannungen p_x , p_y , p_z , σ_x , σ_y , σ_z und die Beschleunigungen \ddot{x} , \ddot{y} und \ddot{z} gemessen werden.

Für die genannten Größen ist ein Geber zu entwickeln, der folgenden Anforderungen genügt: a) geringe Baugröße, b) gleiche Dichte wie der Boden und c) gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Meßgrößen möglichst gering.

Sein dynamisches Verhalten muß den Bedingungen unter 2.1.1 genügen.

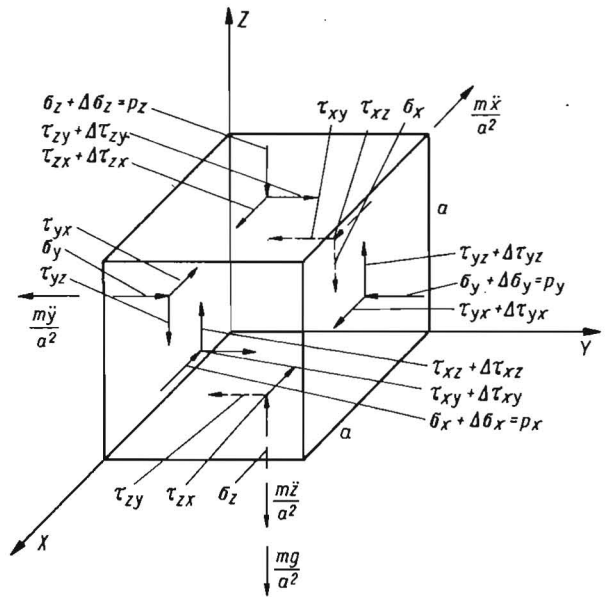


Bild 3. Spannungen am Volumenelement

2.2.2. Aufbau und Wirkungsweise des verwendeten Meßgebers

Zur Messung der Beschleunigung wird ein Dreikomponentenpiezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Er hat die Gestalt eines Würfels mit einer Kantenlänge von 20 mm und ist für Meßfrequenzen zwischen 5 und 500 Hz geeignet. Die maximale Beeinflussung einer Beschleunigungskomponente durch eine andere beträgt 10%. Auf Einzelheiten im Aufbau und Wirkungsweise wird nicht eingegangen. Als Druckmeßgeber für die Spannungsmessung werden Druckmeßdosen mit besonderem Aufbau verwendet (Bild 4). Sie bestehen aus dem Ring *a* mit Membran *b*, der Gummimembran *d* und dem Klemmring *e*, der zum Festklemmen von *d* dient. Die auf beiden Seiten der Membran aufgeklebten Halbleiterdehnmeßstreifen dienen als Wandler. Die zwischen *d* und *a* bzw. *b* vorhandene Ölschicht *c* garantiert bei unsymmetrischer Belastung der Druckmeßdose eine gleichmäßige Druckverteilung über der Membran. Damit sind Fehlmessungen bei unsymmetrischer Belastung ausgeschlossen.

Die zu messenden Drücke liegen zwischen 2 p/cm² bis 2 kp/cm². Bis zu einer Frequenz von 5 kHz treten keine Amplitudenvergrößerungen ein.

Die einzelnen Aufnehmer wurden in einem Meßwürfel vereinigt (Bild 5 und 6).

Im Grundrahmen *b*, in dessen Mitte der Beschleunigungsaufnehmer *a* eingepaßt wurde, ist die Druckmeßdose *c* ein-

Bild 5. Meßwürfel; *a* Beschleunigungsaufnehmer, *b* Grundrahmen, *c* Druckmeßdose, *d* Schutzrahmen, *e* Klemmring (*a*, *c* und *e* nicht im Schnitt dargestellt)

Bild 4. Druckmeßdose; *a* Ring, *b* Membran, *c* Öl, *d* Gummimembran, *e* Klemmring

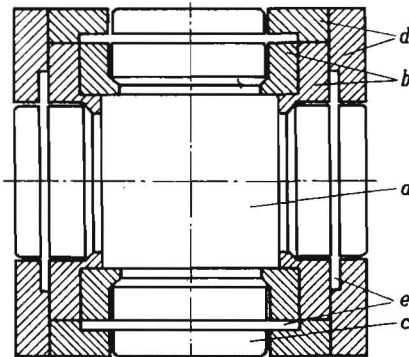
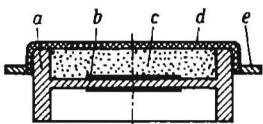
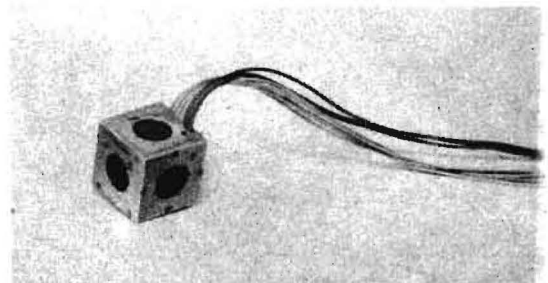


Bild 6. Der Meßwürfel



gelassen und auf einer schrägen Fläche gelagert. Der Klemmring e wird mit zwei Schrauben an b befestigt. Über dem gesamten Grundkörper mit allen Meßgebern befindet sich ein Schutzrahmen d . Er nimmt die seitlichen Kräfte auf, die sonst an den Kreisringen der Druckmeßdosen angreifen und die Messung der Normalspannungen beeinflussen würden. Der Meßwürfel hat eine Kantenlänge von 40 mm und eine Dichte $\rho = 3,94 \text{ g/cm}^3$. Als Übertrager werden abgeschirmte Kabel verwendet.

Aus der Lösung des Gleichungssystems (15) ergeben sich Scherspannungsdifferenzen in den entsprechenden Meßpunkten. Da aber die absoluten Scherspannungen beim Bestimmen des Spannungszustandes interessieren, müssen diese noch ermittelt werden. Ausgehend von einem scherspannungsfreien Punkt im Raum sind die einzelnen Scherspannungsdifferenzen zu summieren. Diese Summation ist nur möglich, wenn die Meßpunkte direkt aneinander liegen. Aufgrund der Vielzahl der erforderlichen Experimente ist der zeitliche Aufwand sehr hoch.

Zusammenfassung

Es werden Meßgeber vorgestellt, die es erlauben, die dynamische Belastung des Bodens und die Spannungen in jedem Punkt des Bodens infolge dieser Belastung zu bestimmen.

Ihre Einsatzgrenzen sind in den Ausführungen angegeben. Die absoluten Scherspannungen ergeben sich aus einer Summe von Scherspannungsdifferenzen. Dadurch ist es möglich, das Spannungsfeld im Boden unter dynamischer Belastung zu bestimmen.

Literatur

- 1 Lucius, J.: Methodik der Werkzeugentwicklung für die Bodenbearbeitung. (Vortrag, gehalten auf der Weiterbildungstagung der TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, am 26. und 27. Febr. 1971)
 - 2 Kézdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik. Bd. 1 — Bodenphysik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1969
 - 3 Banert, A. E.: Ein neues Verfahren zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Böden und Bauwerken durch Stoßbelastung. Diss. ETH Zürich 1969
 - 4 Holzweißig, F.: Einführung in die Messung mechanischer Schwingungen. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1963
 - 5 Wöckner, H.: Meßfehler und Meßwertkorrektur bei dynamischen Kräftemessungen. Diplomarbeit TU Dresden 1969, unveröffentlicht
- Außerdem:
- Prange, B.: Ein Beitrag zum Problem der Spannungsmessung im Halbraum. Diss. Karlsruhe 1965
- Göldner, H.: Leitfaden der Technischen Mechanik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1966
- Vornkahl, W.: Dynamik gezogener Bodenwerkzeuge im Modellversuch. Fortschritt-Berichte, VDI-Zeitschrift, Düsseldorf, Reihe 14, Nr. 7 (1967)

A 8525

Zur Untersuchung des Scharschneidenwinkels von Grubberwerkzeugen für hohe Arbeitsgeschwindigkeiten

G. N. Djatschenko,
Kandidat der Technischen Wissenschaften*

Ziel der gegenwärtigen Entwicklung der Bodenbearbeitungsgeräte ist die Vollmechanisierung der arbeitsaufwendigsten Prozesse im Ackerbau und die weitere Automatisierung einzelner Arbeitsgänge. Deshalb muß schon jetzt an der Erhöhung der Zuverlässigkeit der Bodenbearbeitungstechnik gearbeitet werden. Untersucht man die Arbeit ausgeführter Grubberschare von diesem Standpunkt aus, so ist zu erkennen, daß ihre Zuverlässigkeit im Einsatz selbst den heutigen Forderungen nicht gerecht wird. Hauptmangel ist die starke Verstopfung der Grubberschare durch Wurzeln nicht abgeschnittener Unkrautpflanzen und durch im Boden befindliche Pflanzenreste.

Das Problem kann ohne die ständige Kontrolle durch den Menschen nur bei Anwendung völlig neuer Maschinen mit vollkommenen Arbeitswerkzeugen gelöst werden, die Arbeitsgang und Güte der auszuführenden Operationen in Abhängigkeit der Eigenschaften des Bearbeitungsobjektes automatisch steuern.

Eine Teillösung dieser Frage ist heute durch die Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeiten und die Schaffung entsprechender Arbeitswerkzeuge von Bodenbearbeitungsmaschinen möglich. Unter den Parametern, die bei der Entwicklung schneller Arbeitswerkzeuge untersucht werden müssen, nimmt der Scharschneidenwinkel (2γ) den vordersten Platz ein. Der erwähnte Winkel hat auf den Arbeitsfolg und den Zugkraftbedarf für die Bodenbearbeitung wesentlichen Einfluß. Daher ist die eingehende Untersuchung seiner Wechselwirkung mit den anderen Parametern Hauptbestandteil bei der Lösung der gestellten Aufgabe.

Einfluß des Scharschneidenwinkels auf die Verstopfung des Werkzeugs

Prof. Sineokov hat als erster den Scharschneidenwinkel wissenschaftlich begründet. Aus der Vielzahl der Faktoren,

die auf die Größe des Winkels 2γ Einfluß haben, hat er den wichtigsten im technologischen Arbeitsprozeß des Grubberschars herausgearbeitet: er ist so zu wählen, daß keine Verstopfung des Werkzeugs durch Unkrautpflanzen eintritt. Bei der Untersuchung der Kräfte, die auf eine herausgerissene, an der Scharschneide umgeknickte Unkrautpflanze wirken, stellte er fest, daß ihr Gleiten entlang der Schneide dann möglich ist, wenn die Beziehung $\gamma \leq 90^\circ - \rho$ gilt. Dabei ist ρ der Reibungswinkel zwischen Unkrautpflanze und Scharschneide.

Da die Grubberschare in der Praxis auch bei Einhaltung dieser Bedingung verstopften, wurden Korrekturen dieser Beziehung vorgeschlagen [1/2]. Sie basieren auf Untersuchungen der Vorgänge, die unter bestimmten Voraussetzungen mit mehr oder weniger starker Konkretisierung der mechanisch-physikalischen Bodeneigenschaften erfolgten, und ergaben die Notwendigkeit, den Scharschneidenwinkel 2γ zu vermindern. Die Berechnungsformel von Prof. Sineokov ist bis heute universaler und in der Praxis anwendbar. Die Untersuchungen über die Verbesserung der Formel für die theoretische Bestimmung des Winkels 2γ haben insofern große Bedeutung, als sie die Notwendigkeit weiterer gründlicher Untersuchungen der Vorgänge bei der Bewegung des Arbeitswerkzeuges eines Grubbers im Boden zeigten. Die Schnellarbeitswerkzeuge arbeiten unter Bedingungen, die sich von denen bei normalen und niedrigen Arbeitsgeschwindigkeiten unterscheiden. Das ist durch die Dynamik des Vorgangs und das Auftreten zusätzlicher Kräfte bedingt, die die Gesetze der im Boden ablaufenden Vorgänge ändern. Bei der Wahl und der Begründung des Scharschneidenwinkels für Schnellarbeitswerkzeuge des Grubbers ist es zweckmäßig, nicht nur die Voraussetzungen für die Vermeidung

* Hochschule für Landmaschinenbau Rostov am Don; Gastdozent an der TU Dresden