

Eine elektrische 6-Komponenten-Meßeinrichtung zur Ermittlung räumlich wirkender Kräfte an einem Bodenbearbeitungswerkzeug

1. Einführung

Bei mechanischen Arbeitsvorgängen in der Landtechnik, wie z. B. bei der Bodenbearbeitung oder Hackfruchternte, treten Widerstandskräfte auf, deren Größe und Wirkungsrichtung abhängig sind von Art und Eigenschaften des zu bearbeitenden Bodens, von Konstruktion und Zustand der Werkzeuge, von der Arbeitsgeschwindigkeit u. a. Einflußgrößen.

Für den Konstrukteur ist es wichtig zu wissen, wie groß die wirkenden Kräfte sind, mit welcher Häufigkeit und in welchem zeitlichen Verlauf, in welcher Richtung sie wirken und wo sie angreifen. Diese Angaben sind Grundlage für eine funktions- und festigkeitgerechte Konstruktion, für richtigen Werkstoffeinsatz und Voraussetzung für consequenten Leichtbau.

Für den Betriebsingenieur sind die Kräfte, die an Werkzeugen angreifen, hinsichtlich Zugkraft- und Leistungsbedarf und auch im Zusammenhang mit auftretendem Verschleiß interessant.

Gegenwärtig gibt es erst wenige Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung von Arbeitswiderständen. Die zweckmäßigste Methode zur Ermittlung der Beanspruchungen von Bauteilen ist deshalb häufig die unmittelbare Messung der auftretenden Kräfte unter den Bedingungen des praktischen Einsatzes oder unter Laborbedingungen.

2. Zur Messung von Zugkräften an Werkzeugen als 1-Komponentenmeßaufgabe

Aus einem räumlich wirkenden Kraftsystem interessiert die Komponente in Bewegungsrichtung im allgemeinen zur Ermittlung der Zugkraft und des Energie- und Leistungsbedarfs. Daraus wird folgende Meßaufgabe abgeleitet:

- a) Die auf ein Werkzeug in Bewegungsrichtung wirkende Kraftkomponente bei räumlicher Beanspruchung des betreffenden Bauteils ist in ihrem zeitlichen Verlauf zu messen. Die zeitliche Abhängigkeit ergibt sich bei der Registrierung mit Lichtstrahl-Oszillografen. Soll die Kraftgröße in Abhängigkeit einer anderen Größe (z. B. des Weges) ermittelt werden, so ist diese im allgemeinen ebenfalls als zeitlich abhängige aufzunehmen.
- b) Die genannte Kraft ist unabhängig vom Kraftangriffspunkt, d. h. ohne Kenntnis seiner Lage zu messen.
- c) Die zusätzlich wirkenden Kraftkomponenten und Drehmomente in räumlicher Anordnung sollen ohne Einfluß auf das Meßergebnis sein.
- d) Die dynamischen Kennwerte (Massenverhältnisse, Federsteifen usw.) des zu untersuchenden Systems – es handelt sich oft um Messungen dynamischer Kräfte – sollen bei der Gestaltung der Meßeinrichtung möglichst erhalten bleiben.

Dynamische Vorgänge sind dadurch charakterisiert, daß die mechanischen Größen zeitlich nicht konstant sind.

* Technische Universität Dresden, Institut für Landmaschinentechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. GRUNER)

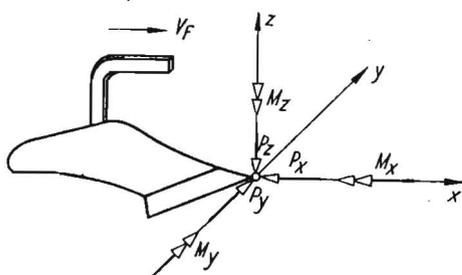


Bild 1. 6-Komponenten-Darstellung des resultierenden Bodenwiderstands

Eine Möglichkeit, wie man diese Meßaufgabe verwirklichen kann, sei hier am Beispiel einer Meßeinrichtung zur Ermittlung von Zugwiderstanden an Pflugkörpern dargelegt.

3. Analyse des Bodenwiderstandes am Pflugkörper

Man bezeichnet die Gesamtheit aller vom Boden auf einen Pflugkörper wirkenden Kräfte als resultierenden Bodenwiderstand, der sich aus Schnitt-, Reib-, Hub-, Deformations- und Beschleunigungswiderstanden zusammensetzt [1]. Der resultierende Bodenwiderstand wird dargestellt als resultierende Kraft plus resultierendes Drehmoment, als Kraftschraube oder als Kraftkreuz [2].

Um den Einfluß der einzelnen Widerstandskomponenten auf die Beanspruchung des Grindels zu erfassen, wird hier eine andere Darstellung des resultierenden Bodenwiderstands gewählt. Der Bodenwiderstand setzt sich aus 3 Kraftkomponenten in Richtung der gewählten Koordinatenachsen (als Ursprung wird die Scharfspitze festgelegt) und 3 Drehmomenten zusammen (Bild 1). Diese 6 Größen lassen sich mit Hilfe einer 6-Komponenten-Meßeinrichtung messen und berechnen, ebenso aus einer anderen Darstellungsweise umrechnen.

Jede dieser 6 Komponenten verursacht in einem Querschnitt des Grindels bestimmte Spannungen, die sich gegenseitig überlagern und die wiederum bestimmte Deformationen zur Folge haben. Diese Deformationen werden als meßbare Größen zur Bestimmung der sie verursachenden Kraftgrößen – Deformationen und Spannungen sind einander proportional – aufgenommen und registriert.

Von den auftretenden Kraftgrößen soll zunächst nur die in Bewegungsrichtung wirkende Kraft P_x unabhängig von den anderen Größen gemessen werden. Der Kraftangriffspunkt ist für die grafische Darstellung in die Scharfspitze als geometrisch definierter Punkt der Arbeitsfläche des Pflugkörpers gelegt worden. Praktisch kann die Kraft P_x an einem beliebigen anderen Punkt angreifen; es ist beim Verschieben dieser Kraft in die Scharfspitze nur zu beachten, daß dann zur Erhaltung des Kräftegleichgewichtes entsprechende Drehmomente eingefügt werden, die in M_y und M_z enthalten sind.

4. Der Meßgeber für die 1-Komponentenmessung

Als Meßkörper wird ein Megrindel verwendet, an dem die infolge der wirkenden Kräfte und Momente auftretenden Dehnungen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (DMS) als Meßwandler aufgenommen werden. Die zunächst interessierende Kraft P_x verursacht Biegemomente in den Querschnitten I und II, die aber von der Vertikalkraft P_z und dem Moment um die y-Achse M_y beeinflusst werden (Bild 2).

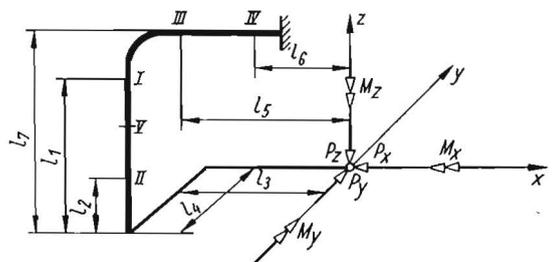


Bild 2. Berechnungsmodell zur Bestimmung der 6 Komponenten aus den Meßgrößen

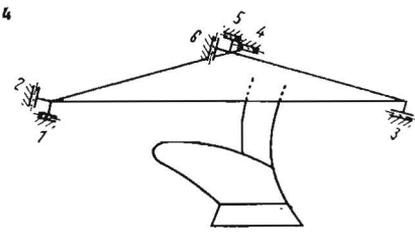
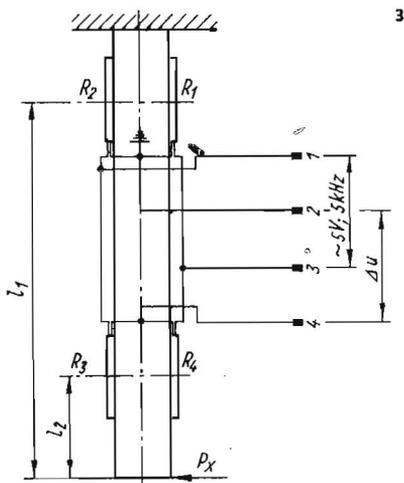
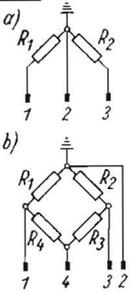
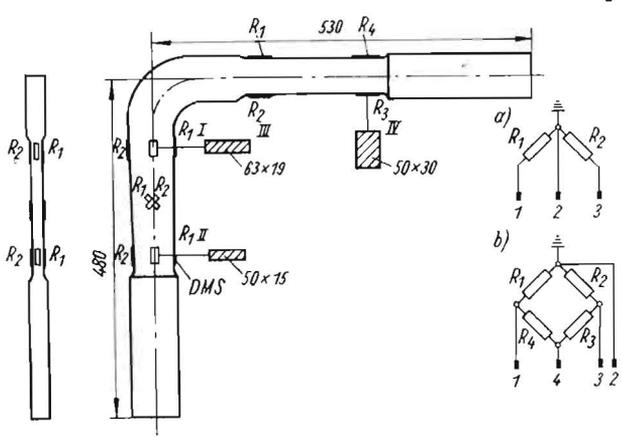


Bild 3 Differenzschaltung für die 1-Komponentenmessung

Bild 4 Schema eines 6-Komponenten-Meßrahmens

Bild 5 6-Komponenten-Meßgrindel (Werkstoff: 50 CrV4) für $P_{\max} = 700 \text{ kp}$; a) Schaltung der DMS als Halbbrücke für die Messung der Biegung; b) Schaltung der DMS als Vollbrücke für die Messung der Torsion und der Vertikalkraft



Die Biegemomente um die y-Achse in den Querschnitten I und II sind:

$$M_{yI} = P_x \cdot l_1 + P_z \cdot l_3 + M_y \quad (1)$$

$$M_{yII} = P_x \cdot l_2 + P_z \cdot l_3 + M_y \quad (2)$$

Aus diesen beiden Gleichungen lassen sich P_z und M_y eliminieren und man erhält

$$P_x = \frac{M_{yI} - M_{yII}}{l_1 - l_2} \quad (3)$$

Für die 1-Komponentenmessung von P_x kann die Differenz der Momente M_{yI} und M_{yII} in einer Meßbrücke direkt gemessen werden (Bild 3). Sie ist vom Hebelarm der angreifenden Kraft unabhängig, da die Differenz der Abstände ($l_1 - l_2$) vom konstanten Abstand der Halbbrücken bestimmt wird. Die Eichung kann ohne Zwischenrechnung in Abhängigkeit von P_x erfolgen.

Als Voraussetzung für eine einwandfreie Messung sind an den Grindel folgende Forderungen zu stellen:

- a) Die Loge des Pflugkörpers ist entsprechend der Originalausführung zu sichern.
- b) Festigkeit und Steifigkeit des Meßgrindels müssen etwa den Werten der Originalausführung entsprechen, wenn die dynamischen Eigenschaften erhalten bleiben sollen.
- c) Der Abschnitt des Meßgrindels, der die Meßstellen aufnimmt, muß senkrecht zur Richtung der zu messenden Kraft angeordnet werden; andernfalls ist die Neigung des Grindels um einen Winkel α durch Korrektur des Meßwertes um den Faktor $\frac{1}{\cos \alpha}$ zu berücksichtigen.
- d) Der Querschnitt des Meßgrindels muß über der Länge konstant sein und ein geschlossenes, zweiseitig symmetrisches Profil (hohl oder voll) aufweisen.

Es ist durchaus möglich, einen Originalgrindel für die Messung zu verwenden, wenn er die angeführten Bedingungen erfüllt.

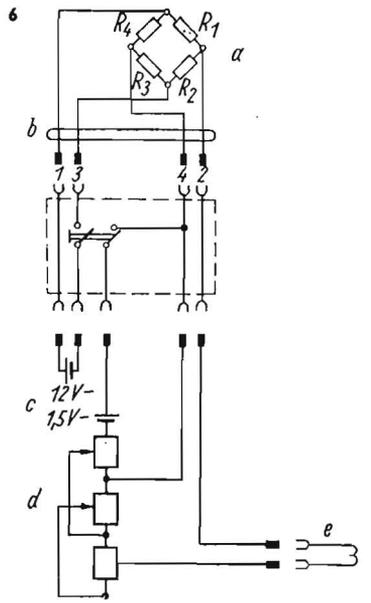


Bild 6. Prinzip-Schaltplan für direkte Dehnungsmessung ohne Verstärker; a) DMS-Vollbrücke, b) Meßkabel, c) Spannungsquellen, d) Regelwiderstände für Brückenabgleich, e) Meßschleife (Galvanometer)

Das Prinzip dieser 1-Komponentenmessung ist erweiterungsfähig zur Messung von 6 auftretenden Komponenten, d. h. zur vollständigen Ermittlung des resultierenden Bodenwiderstands.

5. Der Meßgeber für die 6-Komponentenmessung

6-Komponentenmessungen an Pflugkörpern wurden bereits in den 20er Jahren von KÜHNE und SCHREYER in München mit einer Meßeinrichtung durchgeführt, die mit hydraulischen Druckmeßdosen ausgestattet war. GETZLAFF verwendete eine Meßeinrichtung nach dem genannten Vorbild [2], und auch in unserem Institut gab es eine solche Einrichtung. Eine neuere, als Bestandteil der alten Bodenrinne, war mit induktiven Kraftmeßgebern ausgestattet.

Ein Fachwerkrahmen, der den zu untersuchenden Pflugkörper trägt, wird über 6 Punkte abgestützt, deren Reaktionskräfte beim Einwirken von Widerstandskräften auf den Pflugkörper gemessen werden (Bild 4). Diese Ausführung der 6-Komponenteneinrichtung hat folgende Nachteile:

- a) Beim Einbau in einen Pflug sind tiefgreifende Veränderungen am Rahmen erforderlich, die Veränderungen des dynamischen Systems zur Folge haben.
- b) Messungen können nur an einem Pflugkörper durchgeführt werden.
- c) Eine variable Verwendbarkeit für verschiedene Meßzwecke ist nur mit großem Aufwand möglich.

Für die 6-Komponentenmessung am Grindel sind ebenfalls 6 Meßstellen erforderlich. Dies sind die Meßstellen für jeweils 2 Biegemomente an den Stellen I und II um die x- und die y-Achse, für das Torsionsmoment an der Stelle V, und eine Differenzmeßbrücke für die Vertikalkraft an den Stellen III und IV (Bild 2).

Die Gleichungen für die Komponenten, bezogen auf die Scharspitze als Koordinatenursprung, lauten:

$$P_x \text{ nach Gl. (3).}$$

$$P_y = \frac{M_{xI} - M_{xII}}{l_1 - l_2} \quad (4)$$

$$P_z = \frac{M_{yIII} - M_{yIV}}{l_5 - l_6} \quad (5)$$

(P_z wird als eine Meßgröße aufgenommen)

$$M_x = M_{xI} + P_y \cdot l_1 - P_z \cdot l_4 \quad (6)$$

(P_y ist aus Gl. (4) und P_z aus Gl. (5) einzusetzen).

$$M_y = M_{yI} - P_x \cdot l_1 - P_z \cdot l_3 \quad (7)$$

(P_x ist aus Gl. (3) und P_z aus Gl. (5) einzusetzen).

$$M_z = M_{zV} + P_x \cdot l_1 + P_y \cdot l_3 \quad (8)$$

(für M_{zV} ist das gemessene Torsionsmoment an der Stelle V einzusetzen, P_x folgt aus Gl. (3) und P_y aus Gl. (4))

Die konstruktive Gestaltung eines 6-Komponenten-Meßgrindels (Bild 5) erfolgte unter den Gesichtspunkten einer universellen Einsetzbarkeit und der Erreichung größtmöglicher Dehnungen an den Meßstellen bei ausreichender Festigkeit. Jedoch ist hier eine Differenzschaltung zur 1-Komponentenmessung nicht möglich. Dazu müssen jetzt beide Meßstellen für M_{yI} und M_{yII} getrennt in Anspruch genommen werden.

Die Befestigungsstellen sind so gestaltet, daß man mit geeigneten Zwischenstücken verschiedene Werkzeuge am Grindel und diesen an verschiedenen Halterungen befestigen kann.

Der neue 12-Kanal-Lichtpunkt-Direktschreiber vom VEB Meßgerätewerk Zwönitz bietet die Möglichkeit, Kräfte- und Momentenmessungen künftig ohne Verstärker und Trägerfrequenzgenerator durchzuführen. Die Meßbrücke wird mit 12 V Gleichspannung gespeist (Bild 6). Der Abgleich der Brücke erfolgt mit einer zusätzlichen feinstufig regelbaren Spannungsquelle. Die elektrodynamisch gedämpften Typen der neuen Stiftgalvanometer ermöglichen einen Ausschlag von 80 mm bei 1, 0,05 mA Maximalbelastung und bei 2, 0,4 mA Maximalbelastung [3].

Das bedeutet 40- bzw. 5fache Empfindlichkeit einer Meßschleife MSD8. In [4] wird ein komplettes verstärkerloses Dehnmeßgerät in Baukastenform vorgestellt, das in ähnlicher Form für die vorliegende Meßeinrichtung geeignet ist. Der Abgleich der Meßbrücke mit zusätzlicher, regelbarer Spannungsquelle (Bild 6) bietet den Vorteil, daß keine Verluste durch Spannungsabfall an den Widerständen auftreten.

Bisher wurden mehrfach 1-Komponentenmessungen mit gutem Erfolg in Labor- und Feldversuchen durchgeführt, in 2 Fällen 3-Komponentenmessungen. 6-Komponentenmessungen erfolgten bisher nur mit einer Modelleinrichtung zur Überprüfung des Meßprinzips [5]. Die gegenseitige Beeinflussung der Meßstellen ist abhängig von der Homogenität des Materials, der Genauigkeit und Übereinstimmung der k -Faktoren der DMS und von der Genauigkeit ihrer Anbringung. Die Homogenität des Werkstoffes kann vom Anwender nicht beeinflußt werden. Die Genauigkeit der

Anbringung der DMS ist, sorgfältige Arbeitsweise vorausgesetzt, in nur engen Grenzen beeinflussbar, so daß das Hauptaugenmerk auf die k -Faktoren der DMS zu richten ist. Für die einwandfreie Kompensation der Längskräfte bei Messung der Biegebeanspruchung (beispielsweise soll $M_{yIII} - M_{yIV}$ gemessen werden, und P_x ist zu kompensieren) muß die Bedingung erfüllt sein, daß die Empfindlichkeiten der DMS 1 und 2 und der DMS 3 und 4 gleich groß sind. Weiterhin ist Bedingung beim Auftreten weiterer Biegemomente (z. B. M_y), daß die Empfindlichkeiten der Halbbrücken DMS 1,2 und DMS 3,4 gleich groß sind. Die Empfindlichkeiten können durch Reihen- und Parallelwiderstände zu den DMS beeinflußt werden [6].

Will man die zeitraubende Arbeit der Anpassung der einzelnen DMS umgehen, besteht eine andere Möglichkeit zur Vermeidung von Meßfehlern darin, bei der Eichung einer solchen 6-Komponenten-Meßeinrichtung die gegenseitige Beeinflussung mit aufzunehmen und für die Auswertung von Meßergebnissen ein Korrektordiagramm aufzustellen. Die gegenseitige Beeinflussung der Meßgrößen ist sehr unterschiedlich und wird bei jeder Meßeinrichtung anders liegen, ihre Größenordnung beträgt überschlägig 2 bis 10% des Vollauschlages der Einzelgrößen. Bei Korrektur der k -Faktoren kann die Beeinflussung unter 2% gehalten werden.

Mit der dargestellten Meßeinrichtung sollte ein neuer Weg gezeigt werden, mit relativ geringem konstruktiven Aufwand, guter Anpassungsfähigkeit und rationell Probleme der Messung räumlicher Kraftsysteme schnell und sicher zu lösen.

Literatur

- [1] REGGE, H.: Ein Gerät zur Darstellung des resultierenden Bodenwiderstandes an Pflügekörpern. Deutsche Agrartechnik 8 (1958), H. 10, S. 457 bis 459
- [2] GETZLAFF, G.: Messung der Kraftkomponenten an einem Pflügekörper. Grundlagen der Landtechnik, H. 1, Düsseldorf 1951, S. 16 bis 24
- [3] Prospekt: Anpassungssteller, Stiftgalvanometer VEB Meßgerätewerk Zwönitz
- [4] WOLFF, J.: Ein verstärkerloses Dehnmeßgerät, Elektronik 15 (1966) S. 9 bis 11
- [5] SOUCEK, R.: Untersuchungen über das Zusammenwirken und das mechanische Verhalten von wichtigen Konstruktionselementen und Baugruppen der Landmaschinen bei dynamischer Belastung. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag Nr. 4507 046/5 - 21/3. Institut für Landmaschinentechnik, TU Dresden 1965
- [6] Arbeitskreis Landmaschinentechnik: Schaltungen von Dehnungsmeßstreifen. Arbeitsblätter des Instituts für Landmaschinentechnik, TU Dresden, 1967 (unveröffentlicht) A 7157

Dr. K. BAGANZ*

Untersuchungen über Modellbeziehungen bei Bodenbearbeitungswerkzeugen (2. Mitteilung)¹

Für trockene Reibungsböden konnten für die auftretenden Kräfte Modellbeziehungen nachgewiesen werden, die mit dem Froudeschen Modellgesetz identisch sind.¹ [8]

4. Modellversuche in feuchten Reibungsböden

Mit dem gleichen Reibungsboden, jedoch mit einer Feuchtigkeit $f_T = 1,5$ bis $6,0\%$ (Tafel 2) wurden mit der gleichen Meßeinrichtung einige Meßreihen gefahren, um den Einfluß veränderter Bodenbedingungen auf die Dimensionsgleichungen zu untersuchen.

* Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim der DAL zu Berlin (Direktor: Obering. O. BOSTELMANN)

¹ 1. Mitteilung s. H. 12/1965, S. 555 bis 558

4.1. Versuche mit einfachen geometrischen Werkzeugen

Die Versuche wurden mit dem Werkzeug W 2 (Kegel) durchgeführt, die Meßwerte sind in Bild 9 dargestellt.

Wertet man sie — wegen der geringen gemessenen Kohäsion (Tafel 2) — ähnlich aus wie unter 2.2 entsprechend Gl. (14.2) und (15), so ergibt sich eine starke Abweichung von den im trockenen Boden ermittelten Werten für die Exponenten n_k und n_e (Bild 10).

Diese Abweichung kann durch „gestörte“ Modellbedingungen verursacht sein, es ist aber auch möglich, daß die für trockenen Reibungsboden zugrunde gelegte Gorjatschkinische Gleichung (13) für feuchte Böden nicht mehr volle Gültigkeit hat. STORYRA [9] wies nach, daß bei im Boden