

Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 34 (1984) Nr. 3, S. 117 bis 152

Kraftmessungen an Bodenbearbeitungsgeräten

Von Werner Röhrs und Dieter Wilkens, Braunschweig*)

DK 631.372:631.31:531.78

Die Weiterentwicklung von Bodenbearbeitungsgeräten und deren Werkzeugen erfordert die Kenntnis der zwischen dem Ackerschlepper und dem Bodenbearbeitungsgerät sowie der direkt an den Werkzeugen wirkenden Kräfte. Aus diesem Grund ist bereits seit Beginn der mechanisierten Bodenbearbeitung eine Vielzahl von Methoden zur Ermittlung der Kräfte an Bodenbearbeitungsgeräten entwickelt worden.

Die Ausbildung einer solchen Meßeinrichtung ist durch die Beanspruchungsverhältnisse gekennzeichnet, denen die Bodenbearbeitungsgeräte unterliegen. Insbesondere asymmetrisch belastete Werkzeuge, wie beispielsweise das Pflugschar, erfordern ein vergleichsweise aufwendiges Meßverfahren, das Aufschluß über die räumliche Beanspruchung geben soll. Anhand einer systematischen Zusammenstellung einer Reihe verschiedener Ausführungen werden in diesem Beitrag die unterschiedlichen Konzeptionen von Kraftmeßeinrichtungen behandelt.

1. Einleitung

Die Arbeit mit Bodenbearbeitungsgeräten, deren Zugkraftbedarf ausschließlich über die Triebkraft der Schlepperräder aufgebracht wird, ist aufgrund des Schlupfes zwischen dem Schlepperrad und dem Boden mit vergleichsweise hohen Leistungsverlusten verbunden. Eine sorgfältige Abstimmung von Schlepper und Gerät ist daher für ein wirtschaftliches Arbeiten erforderlich. Grundlage entsprechender konstruktiver und betriebstechnischer Maßnahmen ist die meßtechnische Erfassung der wirksamen Kräfte.

Die Verfasser danken an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. *Berthold Grosse Kohorst*, der durch eine Arbeit im Rahmen des Seminars bei der Vorbereitung dieser Arbeit mitwirkte.

*) *Dipl.-Ing. W. Röhrs und Dipl.-Ing. D. Wilkens sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig.*

Im Hinblick auf die Optimierung der Bodenbearbeitungswerkzeuge und vor allem auf die richtige Ankoppelung des Bodenbearbeitungsgerätes an den Schlepper gilt es, neben der Zugkraft auch die Vertikal- und Seitenkräfte zu ermitteln. In Anbetracht der mit dieser umfangreichen Meßaufgabe verbundenen Schwierigkeiten begnügte man sich häufig mit der Ermittlung einzelner Komponenten. Die Einführung der elektronischen Meß- und Auswerteverfahren schuf letztlich die Voraussetzung zur Entwicklung umfassender Meßeinrichtungen, vor allem für die Ermittlung des dynamischen Verhaltens.

2. Eingesetzte Meßverfahren

Zur Messung der Kräfte an Bodenbearbeitungsgeräten fanden zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren Verwendung. Am Anfang der Entwicklung standen hydraulische Meßverfahren, die man bereits in den 20er Jahren dieses Jahrhunderts bei Pfluguntersuchungen einsetzte [1]. Noch Anfang der 60er Jahre wurde in England ein Trägergerät mit hydraulischen Meßeinrichtungen zur Messung der Kräfte an den Werkzeugen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsgeräte verwendet, da man sich davon Vorteile insbesondere im Hinblick auf den Einsatz unter rauen Feldbedingungen versprach [2].

Die hydraulischen Kraftmeßaufnehmer basieren auf der Umwandlung der Kräfte bzw. Momente in einen entsprechenden hydrostatischen Druck, der über Schläuche auf die Anzeige- oder Registrierungseinrichtungen – Manometer mit Bourdonfedern, Federbälge oder Hubzylinder – übertragen wird.

Durch die rasche Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronik wurden die hydraulischen Meßverfahren vollkommen durch die elektrischen verdrängt. Hier hat die Messung über die Widerstandsänderung von Dehnungsmeßstreifen (DMS) eine überragende Bedeutung erlangt, während die Messung mit Hilfe von Potentiometern bzw. von induktiven oder kapazitiven Meßwertaufnehmern keine große Verbreitung fand.

Dehnungsmeßstreifen sind bekanntlich elektrische Widerstandsdrähte, die auf besonders gefertigte Verformungskörper oder auf Konstruktionsteile selbst geklebt werden und entsprechend der Verformung des Bauteils eine Dehnung bzw. Stauchung erfahren. Das führt wiederum zu einer Widerstandsänderung in den Drähten. Da die Verformungen und damit auch die Widerstandsänderungen relativ klein sind, hat man im Laufe der Zeit verschiedene Verfahren entwickelt, um ein größeres Meßsignal zu erhalten, welches dann verstärkt und zur Anzeige gebracht werden kann.

Als Träger der Verformungskörper verwendete man zunächst sogenannte Kraftmeßdosen, die als Meßglieder eingebaut wurden und Kräfte in einer Richtung aufnehmen konnten. Durch besondere Ausbildung der Verformungskörper wurden hier relativ große Widerstandsänderungen erreicht. Eine weitere Möglichkeit ist das Verschalten der Dehnungsmeßstreifen in elektrischen Brückenschaltungen, die das Bestimmen der Widerstandsänderung durch Messen von Spannungsänderungen ermöglichen. Mit entsprechenden elektrischen Schaltungen können Dehnungen von weniger als 0,01 mm gemessen werden. Durch den Einsatz von Brückenschaltungen ist auch die Elimination von unerwünschten Störeinflüssen, wie Temperaturschwankungen, überlagerten Kraftkomponenten oder sonstigen Beeinflussungen, in gewissen Grenzen möglich.

Probleme bei der Messung treten besonders dann auf, wenn mehrere Komponenten einer Beanspruchung ohne gegenseitige Beeinflussung gemessen werden sollen. Besonders schwierig ist dabei die Messung an den zu untersuchenden Körpern selbst, so daß teilweise auf zwischengeschaltete Meßglieder zurückgegriffen werden muß. Eine Möglichkeit ist die Befestigung der Meßobjekte an Rahmen, die sich so an einem Trägergerüst abstützen, daß die Kraftkomponenten in definierter Richtung gemessen werden können. Eine andere Möglichkeit ist die Zwischenschaltung von Meßgliedern mit besonderer Federkennlinie, die möglichst so einzufügen sind, daß das System nicht zu stark gestört wird. Für Mehrkomponentenmessungen haben sich Ringkörper bzw. daraus abgeleitete Aufnahmekörper aufgrund des definierten Kraftverlaufes und der guten dynamischen Eigenschaften bewährt.

Gerade bei den elektrischen Meßverfahren gilt es abzuschätzen, inwieweit ein zusätzlicher Bauaufwand gerechtfertigt ist, mit dem eine mechanische Entkoppelung der einzelnen Kräfte und Momente für eine beeinflussungsfreie Messung vorgenommen werden kann. Dieses ist prinzipiell auch durch elektrische Kompensation mit den schon erwähnten Brückenschaltungen möglich, allerdings müssen hier sehr hohe Anforderungen bezüglich der Homogenität des Werkstoffes und der Dehnungsmeßstreifen sowie ihrer sorgfältigen Anbringung gestellt werden. Im Rahmen dieses Beitrages soll auf die Problematik der einzelnen Meßverfahren nicht näher eingegangen werden. Detailliertere Angaben sind dem Schrifttum zu entnehmen, beispielsweise [3, 4].

3. Kraftmessung am Einzelwerkzeug

Die im folgenden beschriebenen Meßeinrichtungen dienen zur Ermittlung der Kräfte, die sich an Bodenbearbeitungsgeräten mit starken Werkzeugen aus dem Bodenwiderstand ergeben. Hier ist zu unterscheiden zwischen Werkzeugen mit symmetrischer Belastung, bei denen keine Seitenkräfte auftreten (Eggen- oder Grubberzinken), und Werkzeugen mit asymmetrischer Belastung (Pflugschar). Um das geeignete Meßverfahren auszuwählen, ist eine Analyse der wirkenden und der zu untersuchenden Kräfte im Hinblick auf die gewünschte Darstellung nötig.

3.1 Kräfte am Einzelwerkzeug

Der Bodenwiderstand am Werkzeug setzt sich zusammen aus Schneid-, Hub-, Reibungs-, Verformungs- und Beschleunigungswiderstand. Die daraus resultierenden Kräfte an den Werkzeugen werden beeinflusst durch die Fahrgeschwindigkeit, die Arbeitstiefe, die Arbeitsbreite, die Bodenart und den Bodenzustand. Sie wirken beim Arbeitsvorgang in unterschiedlichen Richtungen.

Die Kraftkomponente in Bewegungsrichtung, die Zugkraft, ist zur Ermittlung des Leistungsbedarfs erforderlich. Sie läßt sich durch eine Ein-Komponenten-Messung erfassen. Auch bei symmetrischen Arbeitswerkzeugen (Egge, Grubber) treten am Gerät vielfach mehrere Kräfte in einer Ebene auf, so daß zur genauen Bestimmung von Größe und Lage des Bodenwiderstandes bereits eine Drei-Komponenten-Messung nötig wird. Hier bedarf es der Ermittlung von Kräften in zwei Richtungen und zusätzlich eines Moments, bzw.

bei genau festgelegten Meßpunkten der Ermittlung von drei Kräften. Die Kräfte werden entweder einzeln aufgetragen oder zusammengefaßt und in eine Darstellung gebracht, aus der der Kraftangriffspunkt, die Richtung und der Betrag der Kraft zu ersehen sind, Bild 1.

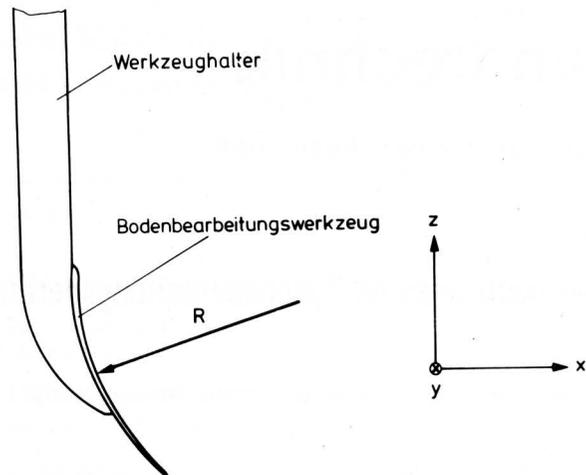


Bild 1. Resultierende Bodenwiderstandskraft R an einem Grubberwerkzeug.

Die Ermittlung der Kräfte an Arbeitswerkzeugen mit asymmetrischer Belastung (Pflugschar) ist erheblich schwieriger. Hierzu bedarf es der Messung der Kräfte in den drei Achsenrichtungen und der Momente um diese Achsen oder bei genau definierten Meßpunkten der Ermittlung von sechs Kraftkomponenten, aus denen die Momente errechnet werden können. Auch die Darstellung der Kräfte ist problematischer, weil diese räumlich und flächenhaft verteilt auf den Pflugkörper wirken. Sie sind daher nicht zu einer Resultierenden zusammenfaßbar. Das räumliche Kräftesystem am Pflugkörper kann z.B. folgendermaßen dargestellt werden, Bild 2:

- durch ein Kraftkreuz, bestehend aus den beiden sich kreuzenden, aber nicht schneidenden Teilresultierenden R_1 und R_2 (oben),
- durch eine resultierende Kraft, bestehend aus den Komponenten F_x , F_y und F_z , und ein resultierendes Moment, bestehend aus den Komponenten M_x , M_y und M_z . Dieses Kräftesystem kann auf jeden beliebigen Punkt bezogen werden, z.B. auf die Scharspitze (Mitte),
- durch eine resultierende Einzelkraft R und ein kleinstmögliches resultierendes Restmoment M_{Rest} , deren Wirkungslinie auf ein und derselben Achse liegen, also eine Zentralachse bilden, die im Durchstoßpunkt D auf den Pflugkörper trifft. Diese Darstellung wird als Kraftschraube bezeichnet (unten).

Die Darstellung einer Kraftschraube wird in der Literatur am häufigsten verwendet. Ihre Ermittlung ist aber schwierig, da außer ihrer Größe und der Lage der Zentralachse auch die Lage des Durchstoßpunktes auf der Arbeitsfläche des Pflugkörpers ermittelt werden muß. Für Kraftmessungen an Pflugkörpern wird daher vorwiegend die zweite Darstellung mit von vornherein festgelegtem Kraftangriffspunkt verwendet.

3.2 Eindimensionale Zugkraftmessung

Für den Einsatz eines Bodenbearbeitungsgerätes ist dessen Zugkraftbedarf von besonderem Interesse. Zu seiner Erfassung muß die Kraftkomponente in Fahrtrichtung ermittelt werden. Da daraus aber nicht auf Angriffspunkt, Richtung und Größe des Bodenwiderstandes geschlossen werden kann, sind in Zusammenhang mit Untersuchungen an Werkzeugen von Bodenbearbeitungsgeräten nur selten reine Zugkraftuntersuchungen durchgeführt worden.

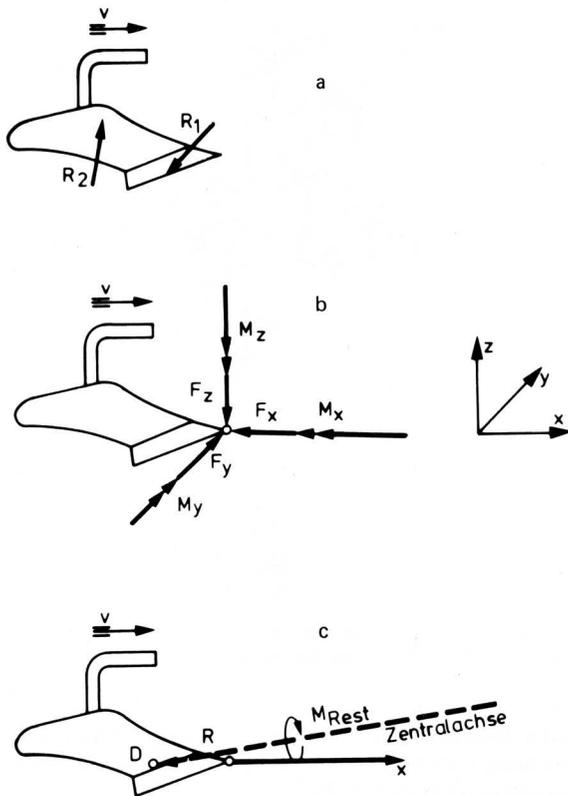


Bild 2. Darstellungsmöglichkeiten der Bodenwiderstandskräfte am Pflugkörper.

- a Kraftkreuz
- b Einzelkräfte und -momente
- c Kraftschraube

Eine Meßeinrichtung für die Zugkraftmessung ist von *Söhne, Möller u. Bruer* [5] beschrieben; sie diente zur Untersuchung von Streichblechformen für Pflüge bei höheren Geschwindigkeiten, **Bild 3**. Der Grindel des Pflugkörpers wird am Träger a befestigt und kann so einfach ausgetauscht werden. Der Träger ist über zwei Federplatten b so im Gehäuse abgestützt, daß er sich nur in Richtung der Zugkraftkomponente F_x bewegen kann. Diese wird von der hydraulischen Kraftmeßdose c aufgenommen und der entsprechende Druck über einen Schlauch d dem Indikator mit Schreibwerk zugeführt. Bei dem damaligen Entwicklungsstand der Meßtechnik wurde hier noch die hydraulische Meßmethode eingesetzt, die sich vor allem durch die Zwischenschaltung eines relativ großen, massebehafteten Körpers zwischen Eingangsgröße und Anzeigewert ungünstig auf das dynamische Verhalten auswirkt.

Ähnliche Untersuchungen wurden von *Queitsch* [6] durchgeführt, wobei allerdings der Grindel des Pfluges direkt mit Dehnungsmeßstreifen beklebt war und als Meßträger diente. Der Einsatz der Dehnungsmeßstreifen erfolgte in der gleichen Art, wie bei einer Sechs-Komponenten-Messung am Grindel, die im weiteren noch näher erläutert wird. Da die Befestigung des Pflugschares als Meßträger verwendet wird, ist ein schnelles Auswechseln unterschiedlicher Pflugkörper erschwert.

Der Untersuchung von Gesetzmäßigkeiten der Schlepplagen eines Streichblechpfluges diente die Arbeit von *Graef* [7]. Bei diesen Laborversuchen in einer Bodenrinne wurde ein einfacher Schwingpflug mit und ohne Schleifsohle über ein sehr kurzes Zweigelenk von einem Meßwagen gezogen und konnte sich im Boden frei einspielen, und zwar stets dem jeweiligen Bodenwiderstand entsprechend. Durch den Meßwagen war ein Koordinatensystem fest vorgegeben, während die genaue Lage des Pfluges gegenüber dem Meßwagen durch Meßgeber festgestellt werden konnte. Die Zugkraftmessung erfolgte durch Anbringung von Dehnungsmeßstreifen an dem Zweigelenk-Zugstab, der mit einer Momentenstütze versehen war, um ein torsionsfreies Messen zu gewährleisten.

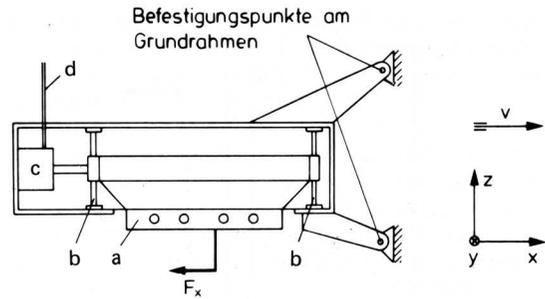


Bild 3. Ein-Komponenten-Meßeinrichtung für Pfluguntersuchungen (nach *Söhne, Möller u. Bruer* [5]).

- a Träger
- b Federplatten
- c hydraulische Kraftmeßdose
- d Schlauch zum Indikator

3.3 Zweidimensionale Kraftmessung

Messungen von Kräften an Bodenbearbeitungswerkzeugen in einer Ebene dienen zur Feststellung des Bodenwiderstandes an symmetrischen Werkzeugen, wie beispielsweise Grubber- oder Eggenzinken, bzw. zur Ermittlung grundlegender Zusammenhänge bei der Bodenbearbeitung mit vereinfachten mechanischen Werkzeugen. Für die genaue Bestimmung der Kräfte bei diesen Untersuchungen müssen entweder 3 Kräfte oder 2 Kräfte und ein Moment gemessen werden (Drei-Komponenten-Messung).

Anfang der 60er Jahre führten *O'Callaghan u. Farrelly* in England Untersuchungen mit Metallplatten einfacher Form durch, um grundlegende Erkenntnisse über deren Bodenwiderstand zu erhalten [8]. Die Werkzeuge waren an einem Rahmen befestigt, der über Meßdosen mit einem Trägergerät verbunden war. Die Meßdosen waren in der Lage, Kräfte in einer Richtung aufzunehmen, und arbeiteten nach dem Prinzip der elektrischen Messung mit Dehnungsmeßstreifen. Der Rahmen war in 4 Punkten so aufgehängt, daß die Messung in der jeweiligen Richtung erfolgen konnte.

Versuche ähnlicher Art führten *Siemens, Weber u. Thornburn* [9], *Panwar u. Siemens* [10] und *Godwin, Spoor u. Leeds-Harrison* [11] durch. Dabei wurden nach **Bild 4** angeschliffene Metallplatten a als Werkzeug an einem Halter b winkelig beweglich befestigt. Dieser Halter wurde wiederum über einen Oktogonalring c mit dem Grundrahmen verbunden. Oktogonalringe (achteckiger Querschnitt) sind aus Kreisflächen abgeleitete Aufnahmekörper, die sich fertigungstechnisch relativ einfach herstellen lassen und die Anbringung der Dehnungsmeßstreifen auf ihren ebenen Flächen (siehe auch **Bild 8**) erlauben. Mit solchen Meßkörpern ist durch geeignete Verschaltung die Messung der 3 Komponenten (2 Kräfte und ein Moment) möglich, ohne daß ein zusätzlicher Meßrahmen gebraucht wird.

Der Bodenwiderstand und der Arbeitseffekt eines Grubberwerkzeuges wurde von *Reich* untersucht [12]. Zur Messung der beim Feldeinsatz an einem Grubberwerkzeug wirkenden Kräfte und dynamischen Beanspruchungen diente ein Drei-Komponenten-Meßrahmen, **Bild 5**. Das Grubberwerkzeug a ist an einem Werkzeugträger b befestigt, welcher um die y-Achse drehbar ist. Der Werkzeugträger ist über Lenker c und Kraftaufnehmer d mit dem Grundrahmen verbunden. Eventuell auftretende Seitenkräfte werden nicht gemessen, sondern am Grundrahmen abgestützt. Aus dem Zahlenwert der Meßgrößen und der Lage der Meßaufnehmer kann die resultierende Bodenkraft ermittelt und entsprechend **Bild 1** dargestellt werden.

3.4 Dreidimensionale Kraftmessung

Obwohl die Messung der Kräfte bei asymmetrischen Werkzeugen, wie bei Pflügen, hohe Anforderungen an die Meßtechnik stellt, sind Messungen dieser Art bereits seit über 50 Jahren bekannt. Solche Sechs-Komponenten-Meßeinrichtungen, die auf dem Prinzip der

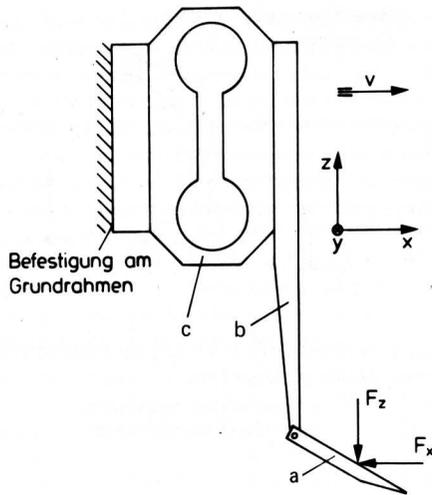


Bild 4. Meßeinrichtung zur Bestimmung des Bodenwiderstandes einfacher metallischer Werkzeuge.

- a Werkzeug
b Werkzeughalter
c Oktogonalring mit Dehnungsmeßstreifen

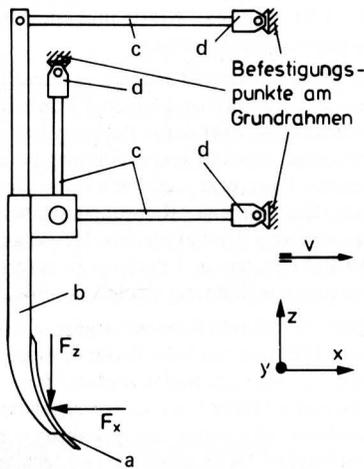


Bild 5. 3-Komponenten-Kraftmeßeinrichtung zur Ermittlung des Bodenwiderstandes von Grubberzinken (nach Reich [12]).

- a Grubberwerkzeug
b Werkzeugträger
c Lenker
d Kraftaufnehmer

hydraulischen Messung basierten, wurden beispielsweise von Getzlaff [13] eingesetzt. Im Laufe der Entwicklung setzte sich auch bei diesen Verfahren die elektrische Messung mit Dehnungsmeßstreifen durch, wobei allerdings anfangs, genau wie bei den hydraulischen Meßeinrichtungen, ein Rahmen eingesetzt wurde, der in ein Trägergerüst so eingebaut war, daß die Kraftkomponenten einzeln gemessen werden konnten.

Das Prinzip dieser Messungen ist in Bild 6 anhand der bereits erwähnten Meßeinrichtung von Dransfield, Harrison u. Willis [2] schematisch dargestellt. Das Werkzeug wird an einem Tragelement – meist einem Tragrahmen – befestigt, das sich über Meßaufnehmer am Grundrahmen abstützt. Bei der Meßeinrichtung in Bild 6 wurde das Tragelement als einfacher zylindrischer Körper a ausgeführt, der mit Momentenstützen b versehen ist. Die Meßaufnehmer c–i sind schematisch dargestellt. Sie können jeweils die Kraft in der eingezeichneten Richtung aufnehmen. Durch die Messung der resultierenden Kräfte R_3 – R_7 in den drei Achsrichtungen und der aus dem Moment um die z-Achse resultierenden Kräfte R_M können die Kräfte und die Momente auf das Werkzeug, bezogen auf den Ursprungspunkt O am Tragelement, berechnet werden, da die Abstände l der Meßaufnehmer bekannt sind.

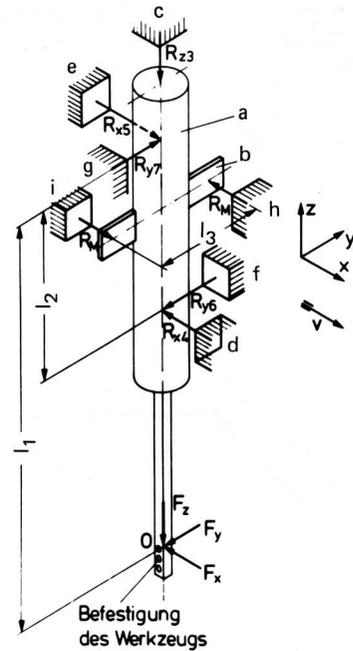


Bild 6. Meßeinrichtung zur Ermittlung räumlich wirkender Beanspruchungen an Werkzeugen von Bodenbearbeitungsgeräten (nach Dransfield, Harrison u. Willis [2]).

- a zylindrischer Werkzeugträger
b Momentenstütze
c bis i Meßaufnehmer
l1 bis l3 vorgegebene Abmessungen

Untersuchungen mit solchen Meßrahmen wurden beispielsweise von Payne u. Tanner [14], O'Callaghan u. McCoy [15] bzw. Tanner u. Dean [16] durchgeführt. Dabei wurde der Rahmen entweder senkrecht oder waagrecht in das Trägergerät montiert und die Kräfte mittels Kraftmeßdosen, die Kräfte in einer Richtung aufnehmen können, ermittelt. Ein solcher Meßrahmen ist in Bild 7 dargestellt. In den Verbindungspunkten A, B, C des Meßrahmens mit dem Trägergerüst sind die Richtungen der Kräfte eingezeichnet. Die Meßdosen sind so angeordnet, daß auf sie nur jeweils die Kraft in einer Richtung wirkt. Da die Abstände der Halterungspunkte bekannt sind, können alle Kräfte und Momente bestimmt werden.

Bei den Untersuchungen von Gallwitz u. Szwaj [17] wurde eine Meßvorrichtung eingesetzt, bei der an einem vertikalen Hohlzylinder, welcher in einem Gehäuse mit Kraftmeßdosen befestigt ist, die zu untersuchenden Werkzeuge angelenkt werden. Auch bei dieser Meßeinrichtung werden 6 Kraftmeßdosen eingesetzt, wobei 4 am Außenzylinder angreifen, während 2 weitere Meßdosen die Vertikalkraft und das Moment um die Hochachse über eine Kardanwelle innerhalb des Zylinders aufnehmen. Durch diese Konstruktion soll eine Messung letztgenannter Kräfte bzw. Momente unabhängig von der Größe der anderen Reaktionskräfte ermöglicht werden.

Eine weitere Sechs-Komponenten-Meßeinrichtung mit einem Meßrahmen wurde von Kececioğlu u. Möller [18] eingesetzt, wobei der schon von Getzlaff benutzte Meßpflug als Versuchsträger diente. Hier wurde der Meßrahmen nicht mehr mit Kraftmeßdosen, sondern mit 6 Biegestäben am Tragrahmen befestigt. Die Verformung der mit Dehnungsmeßstreifen beklebten Biegestäbe lieferte eine Aussage über die Kräfte.

Allen Meßeinrichtungen mit Meßrahmen ist gemeinsam, daß Masse und Biegefedersteifigkeit der eingesetzten Rahmen – anders als bei der Anlenkung direkt am Trägergerät – eine Veränderung insbesondere des dynamischen Verhaltens bewirken. Aus diesem Grund ist versucht worden, die Kräfte direkt am Grindel bzw. über relativ kompakte und gut an das Meßobjekt angepaßte Meßeinrichtungen zu messen.

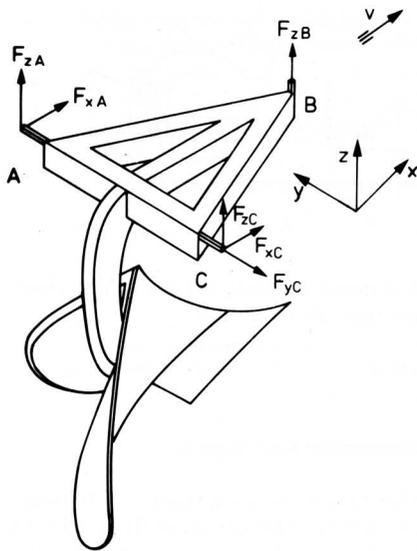


Bild 7. Meßrahmen zur Ermittlung von räumlich wirkenden Beanspruchungen an Pflugkörpern; A, B, C sind die Verbindungspunkte des Meßrahmens mit dem Trägergerüst.

Eine solche Meßeinrichtung, von der man sich gute Ergebnisse bei der Messung dynamischer Vorgänge versprach, wurde von *Plötner* [19] in Rostock entwickelt, **Bild 8**. Die Meßeinrichtung wurde zur Ermittlung von Kennwerten für Bodenwiderstand und Bodenaufbruch an Modellwerkzeugen eingesetzt. Für die dazu durchgeführten Messungen ist die Kenntnis von insgesamt nur fünf Komponenten notwendig; und zwar sind das die Komponenten F_x , F_y und F_z in x-, y- und z-Richtung und die Momente M_y und M_z um die Seiten- und die Hochachse.

Die eigentliche Meßvorrichtung besteht aus drei räumlich angeordneten Oktogonal-Meßringen, die durch Verbindungselemente so befestigt werden, daß eine definierte Messung der Kräfte bzw. Momente gewährleistet wird. Die Anordnung der Dehnungsmeßstreifen ist in **Bild 8** schematisch dargestellt.

Sechs-Komponenten-Meßeinrichtungen, bei denen ein Pfluggrindel mit Dehnungsmeßstreifen versehen ist, um die Kräfte und Momente zu messen, werden von *Queitsch* [6] und *Stubenböck* [20] beschrieben. Von *Queitsch* wird auf die hohen Anforderungen hinsichtlich der Homogenität des Werkstoffes, der genauen Übereinstimmung der Dehnungsmeßstreifen und ihrer sorgfältigen und definierten Anbringung hingewiesen, um eine Kompensation der gegenseitigen Beeinflussungen von Kräften bzw. Momenten zu erreichen. Dieses muß durch relativ aufwendige und zeitraubende Kalibrierungsmaßnahmen überprüft werden. Aus diesen Gründen macht *Queitsch* den Vorschlag, bei der Kalibrierung solcher Meßeinrichtungen die gegenseitigen Beeinflussungen mit aufzunehmen und für die Auswertung ein Korrekturdiagramm zu verwenden.

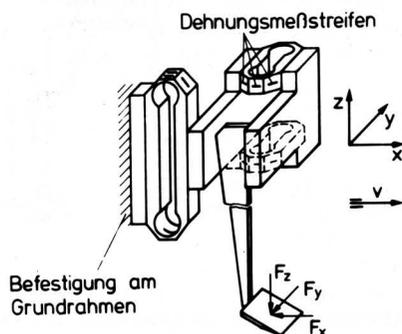


Bild 8. 5-Komponenten-Meßeinrichtung zur Ermittlung des Bodenwiderstandes von Modellwerkzeugen (nach *Plötner* [19]).

Während von der *Queitsch*schen Meßeinrichtung keine Ergebnisse praktischer Untersuchungen bekannt sind, führte *Stubenböck* mit einer ähnlichen Einrichtung, **Bild 9**, Untersuchungen an Rautenpflugkörpern durch. Man erkennt hier die Querschnittsverringering des Materials an den Meßstellen, um ausreichende Dehnungen der Meßstreifen zu erhalten. Weiterhin ist der Grindel mit einer Überlastsicherung in Form einer Scherschraube versehen. Durch eine gezielte Anordnung und Verschaltung der Dehnungsmeßstreifen konnte eine direkte Ermittlung der drei Kraftkomponenten und der Biegemomente erreicht werden. Die Lage der Dehnungsmeßstreifen ist schematisch dargestellt.

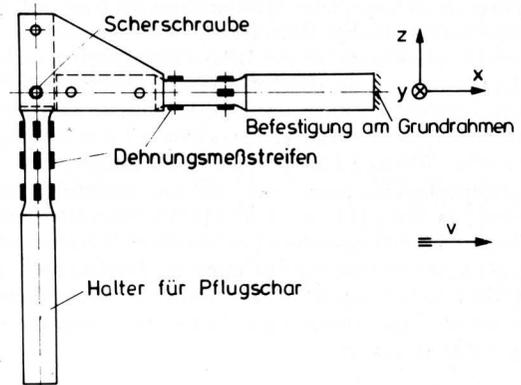


Bild 9. Mit Dehnungsmeßstreifen versehener Pfluggrindel (schematisch, nach *Stubenböck* [20]).

4. Kraftmessung am Gesamtgerät

Während die Untersuchungen an Werkzeugen von Bodenbearbeitungsgeräten auf das Verständnis der Vorgänge zwischen Boden und Werkzeug und damit verbunden auf eine günstige konstruktive Gestaltung abzielen, dienen die Untersuchungen der Kräfte zwischen Schlepper und Gerät der optimalen Zuordnung von Kraft- und Arbeitsmaschine und bestimmen die Auswirkungen der Geräte auf die Achsbelastung von Schleppern bzw. auf die Seitenbelastung durch Bodenbearbeitungsgeräte mit asymmetrischer Belastung. Dabei wirken zusätzlich zu den Kräften aus dem Bodenwiderstand noch Kräfte aus dem Gerätegewicht und Reibkräfte von Anlage- bzw. Schleifkörpern.

Die ersten Untersuchungen in dieser Richtung betrafen die Ermittlung des Zugkraftbedarfes von Bodenbearbeitungsgeräten, insbesondere bei Anhängegeräten. Mit der Verbreitung des Krafthebers bzw. dem vermehrten Einsatz von Anbau- und Aufsattelgeräten erlangte die Feststellung aller zwischen Schlepper und Gerät wirkenden Kräfte zunehmende Bedeutung. Hier wurden zuerst Meßeinrichtungen entwickelt, die der Ermittlung der Kräfte in der Bewegungsebene dienen, d.h. die Messung der Zugkraft und zusätzlich der Hinterachsbelastung des Schleppers erlaubten. Neuere Meßeinrichtungen ermöglichen die Messung der räumlich wirkenden Kräfte und Momente, also auch die Feststellung der seitlichen Belastung.

4.1 Eindimensionale Zugkraftmessung

Eine einfache Methode zur Bestimmung der Zugkraft beschreibt *Nestorovic* [21]. Dabei wird der Schlepper mit dem Versuchsgerät von einem anderen Schlepper gezogen. Die Zugkraft wird über ein zwischengeschaltetes Dynamometer bestimmt. Um den Einfluß der Rollreibung des gezogenen Schleppers zu eliminieren, wird eine zweite Messung mit ausgehobenem Gerät durchgeführt und die Differenz als Zugkraftbedarf des Gerätes angenommen.

Dieses zur Erfassung dynamischer Kräfte ungeeignete Verfahren ermöglicht nur eine relativ grobe Ermittlung der Zugkraft, so daß schon frühzeitig andere Meßeinrichtungen eingesetzt wurden. Zum

einen versah man das vorhandene Krafthebergestänge mit Meßwertaufnehmern bzw. ersetzte es durch Meßeinrichtungen, während bei anderen Untersuchungen umfangreiche Umbauten am Schlepper vorgenommen wurden, um eine Zugkraftmessung zu ermöglichen.

Bereits 1953 verbanden *Rogers u. Jonston* [22] Schlepper und Gerät, indem sie das Krafthebergestänge durch Hydraulikzylinder ersetzten, deren Druck auf großen Manometern angezeigt wurde. Die Druckschwankungen wurden mit Hilfe einer Filmkamera festgehalten, um damit später Meßschiebe zeichnerisch zu erstellen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Meßeinrichtung bestand darin, daß die Zugkraftbestimmung nur bei exakt waagerechter Lage der Unterlenker des Krafthebergestänges möglich war.

Eine Weiterentwicklung solcher Meßeinrichtungen ergab sich durch den Einsatz der elektrischen Meßmethode, wobei nur die Anschlußzapfen des Dreipunktgestänges mit Dehnungsmeßstreifen versehen waren. Dadurch konnte das übliche Krafthebergestänge beibehalten werden, und es konnten durch geeignete Anbringung der Dehnungsmeßstreifen nur die Kraftkomponenten in Fahrtrichtung gemessen werden. Während *Thiel* [23] die Anschlußzapfen des Unter- und des Oberlenkers nur jeweils mit 2 Dehnungsmeßstreifen versehen, verwandten *Reece* [24] und *Scholz* [25] in ihren Meßeinrichtungen bereits 4 Dehnungsmeßstreifen, die durch Brückenschaltung eine bessere Kompensation des Einflusses von Zusatzkräften, die nicht in Richtung der Zugkraft wirken, erlaubten. Stellvertretend für diese Art der Zugkraftmessung ist die von *Thiel* eingesetzte Anordnung in **Bild 10** gezeigt.

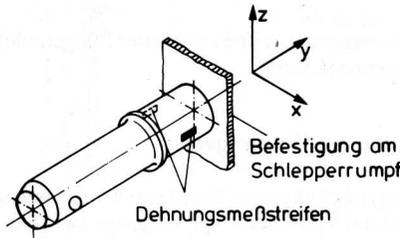


Bild 10. Zugkraftmeßeinrichtung für den Dreipunktanbau am Ackerschlepper (nach *Thiel* [23]).

Bei den in den USA weit verbreiteten Anhängengeräten genügte es, den Befestigungszapfen der Hitchkupplung mit Kraftaufnehmern zu versehen, um Aussagen über die Größe der Zugkraft zu erhalten. Untersuchungen dieser Art wurden beispielsweise von *Dowding, Ferguson u. Becker* [26] durchgeführt, wobei der Zapfen ähnlich wie in **Bild 10** ausgeführt und mit 4 Dehnungsmeßstreifen versehen war, um den Einfluß von Seitenkräften zu kompensieren.

Eine Meßeinrichtung zur Ermittlung der Zugkraft, bei der ein zusätzlicher Rahmen am Schlepper angebracht ist, wurde von *Skalweit* [27] vorgestellt, **Bild 11**. Bei dieser Meßeinrichtung, die auf Ideen von *Meyer* zurückgeht, sind die Anlenkpunkte des Krafthebergestänges, die sich sonst am Schlepper befinden, von diesem getrennt auf einem Rahmen *a* angebracht. Dieser ist mit Hilfe von 4 vertikalen Lenkern *b* und 2 horizontalen Lenkern *c* so am Schlepperrumpf angebracht, daß die Kräfte in Richtung der *y*- und *z*-Achse aufgenommen werden. Dadurch kann sich der Rahmen nur in Richtung der *x*-Achse bewegen, wobei sich die Zugkraft auf einer hydraulischen Meßdose *d* abstützt und zur Anzeige gebracht werden kann.

Eine neuere Entwicklung bei der Zugkraftmessung stellt ein von *Carter* [28] entwickelter Meßrahmen dar, der zwischen Schlepper und Gerät eingebaut wird. Die Zugkräfte werden hier an den Anlenkpunkten des Gerätes mit Hilfe von Biegestäben, die mit Dehnungsmeßstreifen versehen sind, ermittelt. Die Eingangsspannung der Meßbrücke, in der die Dehnungsmeßstreifen verschaltet sind, wird von einem Generator geliefert, der von einem Zusatzrad getrieben wird. Durch diese Schaltung ist eine direkte Messung der Zugleistung möglich, da die angelegte Spannung proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist.

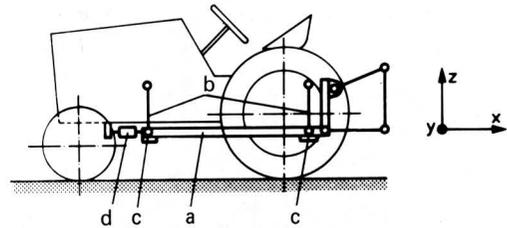


Bild 11. Zugkraftmeßeinrichtung mit einem Meßrahmen am Ackerschlepper (nach *Skalweit* [29]).

- a Rahmen
- b vertikale Lenker
- c horizontale Lenker
- d hydraulische Meßdose

4.2 Zweidimensionale Kraftmessung

Ein wesentlicher Faktor, der den Einsatz von Anbaugeräten bestimmt, ist die zusätzliche Belastung der Hinterachse des Ackerschleppers. Um deren Messung zu ermöglichen, wurden anfangs die vorhandenen Zugkraftmeßeinrichtungen weiterentwickelt. *Skalweit* [29] beließ seinen bereits beschriebenen Meßrahmen und ermittelte zusätzlich die Lage und die Kraft im Oberlenker. Damit ließen sich mittels grafischer Verfahren Richtung und Lage der resultierenden Kraft feststellen. Dieses war allerdings nur bei Schleppern mit "schwimmenden" Krafthebern möglich. Um auch die Kräfte bei Regelkrafthebern zu ermitteln, wurde von *Skalweit* [30] eine neue Meßeinrichtung entwickelt. Dazu wurden die Anlenkpunkte der Unterlenker zwischen Schlepper und Gerät mit Zweikomponenten-Kraftmeßaufnehmern versehen. Zusätzlich wurde noch die Kraft im Oberlenker und die Lage der unteren Lenker ermittelt. Auch hier bestimmte man die resultierenden Kräfte mittels grafischer Verfahren.

Die Forderung nach Meßeinrichtungen, die einerseits einfach an unterschiedliche Schlepper bzw. Arbeitsgeräte angepaßt werden können und andererseits die Beeinflussung der Regelhydraulik in engen Grenzen hält, führte zur Entwicklung von Meßrahmen, die ohne Umbauten zwischen Schlepper und Gerät angebracht werden. Ein solcher Meßrahmen wurde in England am National Institute of Agricultural Engineering (NIAE) entwickelt und eingesetzt [31], **Bild 12**, und an der Universität Hohenheim nachgebaut [32].

Die Form des Meßrahmens gestattet den gleichzeitigen Einsatz der Zapfwelle. Die Anlenkung an das Krafthebergestänge des Schleppers erfolgt in den Punkten *a*, *b* und *c*. Das Anbaugerät ist in den Punkten *d*, *e* und *f* am Meßrahmen befestigt. Die Befestigung am Gerät erfolgt in der Weise, daß die Streben *g* gelöst und die Seitenarme des Meßrahmens aufgeklappt werden. Der Meßwertaufnehmer *h* ist über eine Konsole *i* an der Brücke des Meßrahmens verschraubt, welche verschoben werden kann, um ein Ausrichten

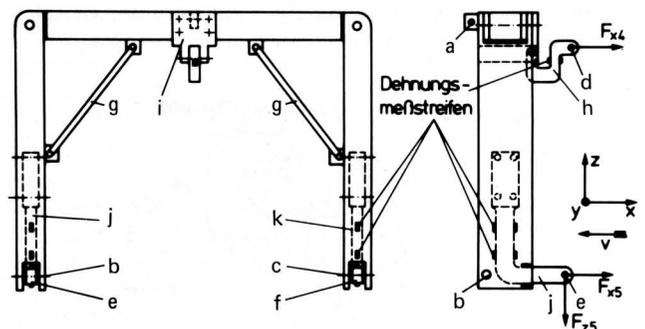


Bild 12. NIAE-Meßrahmen für den Dreipunktanbau zwischen Schlepper und Gerät (nach *Scholtz* [31]).

- a, b, c Anlenkpunkte für Kraftheber
- d, e, f Anlenkpunkte für Anbaugerät
- g Strebe
- h Meßwertaufnehmer
- i verschiebbare Konsole
- j, k untere Meßwertaufnehmer

parallel zur Fahrtrichtung zu erreichen, so daß hier nur eine Zugkomponente F_{x4} gemessen wird. An den unteren Meßwertaufnehmern j und k werden im horizontalen Teil die Vertikalkraftkomponenten F_{z5} und F_{z6} und im senkrechten Teil die Zugkraftkomponenten F_{x5} und F_{x6} gemessen. Die Messung der Zugkraftkomponenten in den senkrechten Teilen der Aufnehmer j und k erfolgt über eine Differenzmomentenmessung, da hier noch ein konstantes Moment aus der Vertikalbelastung durch F_{z5} und F_{z6} eliminiert werden muß. Durch den Meßrahmen ergibt sich ein Abstand der Anschlußpunkte von Schlepper und Gerät von 260 mm.

Ein weiterer Meßrahmen zur Ermittlung der Kräfte in der Bewegungsebene wurde von Johnson u. Voorheers [33] vorgestellt. Dieser besteht aus je einem Befestigungsrahmen für den Anbau des Gerätes bzw. der Dreipunktanhangung des Schleppers und einer Kraftmeßeinrichtung, die beide Rahmen verbindet, Bild 13. Zur Gerätebefestigung sind die Anschlußplatten a und d vorgesehen, während der schlepperseitige Rahmen an den Platten b und c angebracht wird. Die Kräfte und Momente werden über zylindrische Hohlkörper e aus Aluminium übertragen, die kurz vor den Anschlußplatten b und c mit Dehnungsmeißstreifen versehen sind. Dabei sind jeweils vier Dehnungsmeißstreifen für die Messung der Vertikal- bzw. Horizontalkomponenten der Kräfte vorgesehen, während acht weitere Dehnungsmeißstreifen der Ermittlung des Momentes um die Y-Achse dienen, so daß alle Kräfte und Momente voneinander unabhängig gemessen und angezeigt werden können.

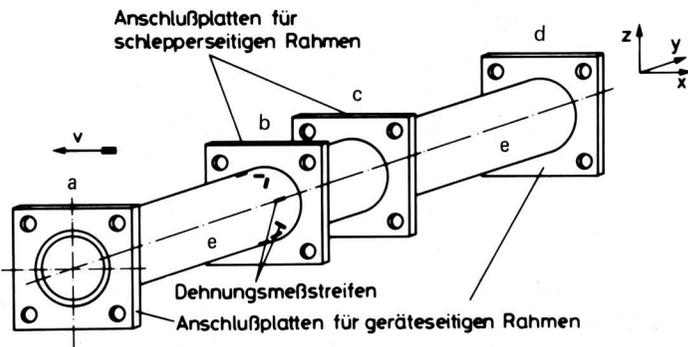


Bild 13. Schema einer Meßeinrichtung zur Bestimmung der Kräfte zwischen Schlepper und Bodenbearbeitungsgeräten.

- a, d Anschlußplatten zur Gerätebefestigung
- b, c Anschlußplatten für schlepperseitigen Rahmen
- e Hohlkörper aus Aluminium mit Dehnungsmeißstreifen

4.3 Dreidimensionale Kraftmessung

Die Messung von räumlich wirkenden Belastungen stellt hohe Anforderungen an die Meßtechnik. Insbesondere die Tatsache, daß die einzelnen Kräfte und Momente frei von Störeinflüssen ermittelt werden sollen, wirft hier große Probleme auf. So sind die ersten Meßeinrichtungen dieser Art relativ kompliziert aufgebaut. Nestorovic [21] beispielsweise beschreibt eine Einrichtung zur Messung der Kräfte, die ausgehend von der bereits vorgestellten Meßeinrichtung von Skalweit (s. Bild 11) den Einbau eines Meßrahmens in einen Ackerschlepper vorsieht. Um auch Untersuchungen des Zusammenwirkens von Regelkraftheber und Gerät durchführen zu können, ist hier nahezu die gesamte Regelhydraulik, wie sie ansonsten im Ackerschlepper vorkommt, in den Meßrahmen mit eingebaut. Die Wirkungslinien der resultierenden Kräfte wurden bei dieser Meßeinrichtung noch durch grafische Verfahren nachträglich bestimmt, so daß auch die Lage der Unterlenker bzw. des Oberlenkers meßtechnisch erfaßt werden mußte. Bei einer neueren Meßeinrichtung, die von Luth, Floyd u. Heise [34] beschrieben wird, wurden die Unterlenker und der Oberlenker mit Kraftmeßaufnehmern versehen, um so die Messung der Längs-, Vertikal- und Horizontalkomponente zu ermöglichen. Da die beschriebenen Meßeinrichtungen an einen Versuchsschlepper gebunden waren, inte-

grierte man bei neueren Entwicklungen die Meßeinrichtungen in einen Rahmen, der zwischen Schlepper und Gerät eingebaut werden kann.

Ein solcher Sechs-Komponenten-Meßrahmen wurde von Steinkampf [35] entwickelt. Die Meßeinrichtung besteht aus zwei ineinander liegenden Rahmen, die über vier Biegestäbe miteinander verbunden sind, Bild 14. Die Anlenkung für das Schlepper-Dreipunktgestänge erfolgt in den Punkten e, f, g am inneren Rahmen. Das Gerät wird über einen kurzen Oberlenker und zwei mit Spannschlössern und Hubstangen festzusetzende Unterlenker in den Punkten h, i, j am Außenrahmen befestigt. Die Meßeinrichtung eignet sich daher für Messungen an Geräten der Kategorien I, II und III.

Die Biegestäbe a, b, c, d sind mit Dehnungsmeißstreifen beklebt. Ermittelt werden die Kräfte und Momente bezüglich des Achsenkreuzes mit dem Mittelpunkt O_M . Um Kräfte in y- und z-Richtung an den beiden senkrecht dazu liegenden Biegestäben messen zu können, darf deren Durchbiegung nicht durch die beiden anderen auf Zug oder Druck beanspruchten Stäbe verhindert werden. Die vier Biegestäbe sind daher über Membranen mit dem Außenrahmen verbunden. Dies ermöglicht eine Bewegung in Richtung der Stabachsen, aber eine Abstützung der senkrecht dazu wirkenden Kräfte. Der Abstand der Anschlußpunkte von Schlepper und Gerät beträgt hier etwa 470 mm.

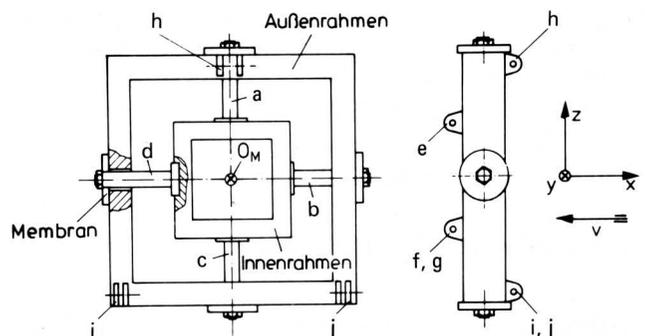


Bild 14. FAL-Meßrahmen für den Dreipunktanbau zwischen Schlepper und Gerät (nach Steinkampf [35]).

- a, b, c, d Biegestäbe mit Dehnungsmeißstreifen
- e, f, g Anlenkpunkte für Schlepper-Dreipunktgestänge
- h, i, j Anlenkpunkte für Gerätebefestigung

Bei einer neueren Entwicklung von Barker, Smith u. Colwick [36] werden zur Messung Druckmeßdosen eingesetzt, deren Meßprinzip auf einer Kapazitätsänderung basiert, Bild 15. Die Meßaufnehmer a, b, c nehmen die Zugkräfte und die Momente um die y- und z-Achse auf. Die eigentliche Meßdose d dieser Meßaufnehmer ist über Kugelhöpfe und Zwischenglieder so zwischen den beiden Rahmenteilten befestigt, daß die Zugkraft F_x ein Drucksignal zur Folge hat, d.h. eine Kraftumkehrung stattfindet. Die Meßdosen e, f, g liefern Informationen über die Kräfte in der y, z-Ebene und die Momente um die x-Achse. Damit wird ein Verdrehen der beiden Rahmenteilte gegeneinander verhindert.

Durch den Einsatz von Kugelhöpfen bei der Befestigung aller Meßdosen können die Reaktionskräfte beeinflussungsfrei gemessen werden. Während die Meßdosen e, f, g durch Zugkräfte direkt belastet werden, konnte der Einbauraum durch die Kraftumkehrung bei den Aufnehmern a, b, c und damit der Abstand der Anschlußpunkte von Schlepper und Gerät mit nur 190 mm sehr klein gehalten werden. Die Anbringung der Meßwertaufnehmer ist schematisch dargestellt. Der Meßrahmen wird mit den Punkten h, i, j am Dreipunktgestänge des Schleppers angebracht, während geräteseitig eine Schnellkupplereinrichtung der Kategorie III vorgesehen ist.

Bei der Verwendung der vorgestellten Meßrahmen ist das angebaute Bodenbearbeitungsgerät weiter vom Schlepper entfernt als beim normalen Geräteeinsatz. Dadurch ergeben sich neben einer z.T. er-

heblichen Reduzierung der Hubkraft an den Geräteanschlußpunkten auch Abweichungen in den Meßgrößen gegenüber dem normal angekoppelten Gerät. Deshalb sollte ein Meßrahmen mit kurzer Baulänge angestrebt werden. Dies gilt besonders für Meßrahmen zur Untersuchung von Frontanbaugeräten, für die bisher noch keine befriedigenden Lösungen bekannt sind.

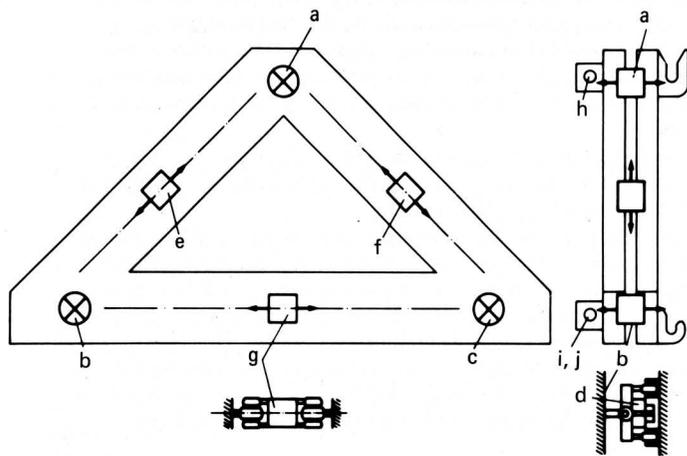


Bild 15. Sechskomponenten-Meßrahmen mit Druckaufnehmern zur Messung dreidimensionaler Kräfte zwischen Schlepper und Gerät (nach *Barker, Smith u. Colwick* [36]).

a, b, c Meßaufnehmer mit Kraftumkehrung
d Meßdose
e, f, g Meßdosen für Zugbeanspruchung
h, i, j Anlenkpunkte für Schlepper-Dreipunktgestänge

5. Zusammenfassung und Folgerung

Aufgrund der mehrachsigen Belastungszustände, die u.U. an Bodenbearbeitungswerkzeugen und -geräten auftreten, ist die Entwicklung von Meßeinrichtungen zur Kraftmessung mit besonderen Schwierigkeiten verbunden. Die bisher eingesetzten Verfahren ermöglichen Kräftermessungen

- direkt am Bodenbearbeitungswerkzeug, um Grundlagen für dessen optimale Gestaltung und über die Funktion zu gewinnen,
- zwischen Ackerschlepper und Bodenbearbeitungsgerät, um Grundlagen für die Gestaltung von Schlepper und Gesamtgerät zu ermitteln.

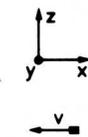
Sowohl die Meßeinrichtungen am einzelnen Bodenbearbeitungswerkzeug als auch die Meßeinrichtungen zwischen Schlepper und Bodenbearbeitungsgerät lassen sich hinsichtlich des Meßumfangs in drei Kategorien unterteilen:

1. Meßeinrichtungen zur Messung der Zugkraft (eindimensional)
2. Meßeinrichtungen zur Messung der Zug- und Vertikalkraft (zweidimensional)
3. Meßeinrichtungen zur Messung der Zug-, Vertikal- und Seitenkraft (dreidimensional).

In bezug auf den meßtechnischen Aufwand stellt die reine Zugkraftmessung eine vergleichsweise leichte Meßaufgabe dar, da hier nur eine Komponente gemessen werden muß. Höhere Anforderungen an die Meßeinrichtung stellen die zwei- und besonders die dreidimensionalen Meßverfahren, die die Messung von drei bzw. sechs Meßkomponenten erfordern.

Im ersten Teil des Beitrages werden die Belastungszustände an symmetrisch und asymmetrisch belasteten Einzelwerkzeugen sowie ihre Darstellung behandelt. Anhand einiger ausgewählter Beispiele werden dann Möglichkeiten für die meßtechnische Erfassung der Belastungszustände an Einzelwerkzeugen und an den Verbindungsteilen zwischen Schlepper und Gerät beschrieben, wobei ein-, zwei- und dreidimensional arbeitende Meßeinrichtungen angeführt werden.

Die Sechskomponenten-Meßrahmen ermöglichen einen sehr flexiblen Einsatz für die Messung aller Kräfte zwischen Ackerschlepper und Bodenbearbeitungsgerät. Jedoch verursachen die Meßrahmen durch den notwendigen Einbauraum eine im allgemeinen nicht zu vernachlässigende Vergrößerung des Abstandes zwischen Schlepper und Gerät. Die Reduzierung der Kraftheberhubkraft an den Geräteanschlußpunkten und die Beeinflussung der Meßergebnisse wirken sich besonders nachteilig beim Einsatz in Frontkrafthebern aus. Bei der Entwicklung neuer Meßrahmen ist daher auf eine kurze Baulänge besonderer Wert zu legen.



Schrifttum

- [1] *Schreyer, W.*: Untersuchungen über die räumlichen Kräftewirkungen am Pfluge. Diss. Bonn 1927.
- [2] *Dransfield, I., J.Y. Harrison u. A.H. Willis*: A mobile force-recording dynamometer for tillage research. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 7 (1962) Nr. 3, S. 260/68.
- [3] *Tropens, D.*: Grundlagen der Meßtechnik bei Landmaschinenuntersuchungen. Deutsche Agrartechn. Bd. 20 (1970) Nr. 5, S. 223/26; Nr. 6, S. 291/93; Nr. 7, S. 338/61; Nr. 8, S. 382/84; Nr. 9, S. 432/33; Nr. 11, S. 536/38.
- [4] *Horn, K.*: Einführung in die Metrologie. Arbeitsblätter zur Vorlesung am Institut für Meßtechnik und Austauschbau, TU Braunschweig.
- [5] *Söhne, W., R. Möller u. R. Bruer*: Geräte und Meßeinrichtungen zur Durchführung und Auswertung von Pflugversuchen. Landtechn. Forschung Bd. 12 (1962) Nr. 12, S. 44/47.
- [6] *Queitsch, K.*: Eine elektrische 6-Komponenten-Meßeinrichtung zur Ermittlung räumlich wirkender Kräfte an einem Bodenbearbeitungswerkzeug. Deutsche Agrartechnik Bd. 18 (1968) Nr. 3, S. 109/11.
- [7] *Graef, M.*: Zugkräfte- und Pfluglagemessungen in einer Bodenrinne. Grundl. Landtechnik Bd. 22 (1972) Nr. 3, S. 69/74.
- [8] *O'Callaghan, J.R. u. K.M. Farrelly*: Cleavage of soil by tined implements. Journ. Agri. Eng. Res. Bd. 9 (1964) Nr. 3, S. 259/70.
- [9] *Siemens, J.L., A.I. Weber u. T.H. Thornburn*: Mechanics of soil as influenced by model tillage tools. Trans. ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 1, S. 1/7.
- [10] *Panwar, J.S. u. J.L. Siemens*: Shear strength and energy of soil failure related to density and moisture. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 3, S. 423/27.
- [11] *Godwin, R.J., G. Spoor u. P. Leeds-Harrison*: An experimental investigation into the force mechanics and resulting soil disturbance of mole ploughs. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 26 (1981) Nr. 6, S. 477/97.
- [12] *Reich, R.*: Bodenwiderstand und Arbeitseffekt eines Grubberwerkzeuges. Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 4, S. 128/32.
- [13] *Getzlaff, G.*: Messung der Kraftkomponenten an einem Pflugkörper. Grundl. Landtechnik Heft 1 (1951) S. 16/24.
- [14] *Payne, P.C. u. D.W. Tanner*: The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 4 (1959) Nr. 4, S. 312/25.
- [15] *O'Callaghan, J.R. u. J.G. McCoy*: The handling of soil by mouldboard ploughs. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 10 (1965) Nr. 1, S. 23/35.

- [16] *Tanner, D.W. u. J.R. Dean:* The soil forces acting on the body and on the disc coulter of a plough. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 8 (1963) Nr. 2, S. 194/201.
- [17] *Gallwitz, K. u. S. Sz waj:* Ein Kraftmeßgerät mit Kardanwelle für Bodenbearbeitungswerkzeuge. Grundl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 3, S. 61/65.
- [18] *Kececioglu, G. u. R. Möller:* Sechs-Komponenten-Messungen an Schlepperpflugkörpern unter besonderer Berücksichtigung der Vertikalkräfte. Grundl. Landtechnik Bd. 21 (1971) Nr. 4, S. 101/103.
- [19] *Plötner, K.:* Eine elektrische 5-Komponenten-Meßeinrichtung. Deutsche Agrartechnik Bd. 22 (1972) Nr. 11, S. 517/19.
- [20] *Stubenböck, H.:* Untersuchungen über das Pflügen mit Rautenkörpern. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 1, S. 1/9.
- [21] *Nestorović, M.:* Kraftkomponentenmessung an der Dreipunkt-Aufhängung. Landtechn. Forschung Bd. 10 (1960) Nr. 4, S. 89/92.
- [22] *Rogers, I.C. u. G.M. Johnston:* Measuring the forces in tractor linkage. Agricultural engineering Bd. 34 (1953) Nr. 8, S. 542/44.
- [23] *Thiel, R.:* Zugkraftmessung am Dreipunktanbau des Ackerschleppers mittels elektrischer Meßmethoden. Landtechn. Forschung Bd. 8 (1958) Nr. 5, S. 132/34.
- [24] *Reece, A.R.:* A three-point-linkage dynamometer. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 6 (1961) Nr. 1, S. 45/50.
- [25] *Scholtz, D.C.:* A three-point-linkage dynamometer for mounted implements. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 11 (1966) Nr. 1, S. 33/37.
- [26] *Dowding, E., I.A. Ferguson u. L.F. Becker:* Comparison of four summer-fallow tillage methods based on seasonal tillage-energy requirements, moisture conservation, and crop yield. Trans. ASAE Bd. 13 (1967) Nr. 1, S. 1/3 u. 8.
- [27] *Skalweit, H.:* Messungen des Zugwiderstandes von Dreipunkt-Anbaugeräten. Landtechn. Forschung Bd. 8 (1958) Nr. 4, S. 108/109.
- [28] *Carter, L.M.:* Instrumentation for measuring average draft. Trans. ASAE Bd. 27 (1981) Nr. 1, S. 23/25 u. 30.
- [29] *Skalweit, H.:* Messung der Kräfte zwischen Schlepper und Anbaupflug in zwei Meßstellen. Landtechn. Forschung Bd. 11 (1961) Nr. 6, S. 151/57.
- [30] *Skalweit, H.:* Feldmessungen an Schleppern mit Dreipunktanbau und regelnden Krafthebern. Landtechn. Forschung Bd. 14 (1964) Nr. 1, S. 1/5.
- [31] *Scholtz, O.L.:* A three-point-linkage dynamometer for restrained linkages. Journ. Agr. Eng. Res. Bd. 11 (1966) Nr. 1, S. 33/37.
- [32] *Reich, R.:* Messung der Kräfte zwischen Schlepper und Gerät. Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 4, S. 156/59.
- [33] *Johnson, L.E. u. W.B. Vorhees:* A force dynamometer for three-point hitches. Trans. ASAE Bd. 23 (1979) Nr. 2, S. 226/28 u. 232.
- [34] *Luth, H.T., V.G. Floyd u. R.P. Heise:* Evaluating energy requirements of machines in the field. ASAE paper 78-1588.
- [35] *Steinkampf, H.:* Messung räumlich wirkender Kräfte zwischen Schlepper und Gerät. Grundl. Landtechnik Bd. 21 (1971) Nr. 3, S. 71/76.
- [36] *Barker, G.L., L.A. Smith u. R.F. Colwick:* Three-point hitch dynamometer for directional force measurement. ASAE paper 81-1044.

Berührungslos arbeitende Abstandssensoren in der Landtechnik

Von Christian Thomas, Berlin*)

DK 621.317:531.71

Für eine Vielzahl von Steuer- und Regelaufgaben beim Einsatz von Landmaschinen ist es notwendig, Abstände berührungslos zu erfassen.

Diese Arbeit stellt die physikalischen Prinzipien berührungslos arbeitender Abstandssensoren vor und beurteilt ihre Eignung für den Einsatz in der Landtechnik. Diesbezüglich als gut geeignet erweisen sich die Verfahren der optischen Triangulation sowie der Ultraschall-Laufzeitmessung. Beide Verfahren finden Anwendung in zwei Sensoren, die näher erläutert werden und über deren Eigenschaften basierend auf Versuchen berichtet wird. Am Beispiel eines lage- und höhengeregelten Feldspritzgestänges wird der Einsatz berührungslos arbeitender Abstandssensoren verdeutlicht.

*) *Dipl.-Ing. C. Thomas ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landtechnik und Baummaschinen (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich) der TU Berlin.*

Inhalt

1. Einleitung
2. Physikalische Prinzipien der Abstandssensoren unter besonderer Berücksichtigung mittlerer Abstandsbereiche
 - 2.1 Übersicht
 - 2.2 Ultraschall-Sensoren
 - 2.3 Mikrowellen-Sensoren
 - 2.4 Optische Sensoren
3. Preisvergleich der Abstandssensoren
4. Infrarot-Abstandssensoren
 - 4.1 Grundprinzip
 - 4.2 Analytische Darstellung des Meßprinzips
 - 4.3 Analogelektronik
 - 4.4 Grenzen des Systems
5. Ultraschall-Abstandssensor
6. Laborversuche mit den Abstandssensoren
 - 6.1 Statisches Verhalten
 - 6.2 Dynamisches Verhalten
7. Anwendungsbeispiel
8. Zusammenfassung