

Pflugkräfte- und Pfluglagemessungen in einer Bodenrinne

Ergebnis-Auswertung mit Hilfe eines Analogrechners

Von Michael Graef, Braunschweig*)

DK 621.317.39:531.781.083.7:681.332
518.5:631.312.4.021.3.001.5

Diese Arbeit behandelt die mathematischen und die meßtechnischen Grundlagen für ein Meßverfahren, das unter Einsatz eines Analogrechners unmittelbar die für das Deuten eines Versuchs erforderlichen Ergebnisse liefert. Speziell werden die Schleppkurven und die zugehörigen Einflußgrößen eines einscharigen Pfluges bestimmt; dabei wird auch auf die Eigenschaften der benutzten Meßgeräte sowie auf die Möglichkeiten eingegangen, die der Analogrechner als zentrale Einheit des benutzten Meßwert-Verarbeitungssystems bietet.

Die Ergebnisse grundlegender Arbeiten auf dem Gebiet der Kraft- und Lagemessung am Pflug veröffentlichten mehrere Autoren [1 bis 7]. G. Getzlaff verwendete z.B. zum Messen der Kräfte und der Momente am Pflug ein Sechskomponenten-Meßgerät mit hydraulischen Meßdosen. Zum gleichzeitigen Registrieren aller Meßwerte auf einem Wachspapierstreifen dienten dabei sechs Indikatoren; ein elektrischer Antrieb bewirkte den Vorschub des Schriebs. Die Zuordnung zwischen den Meßwerten und der Wegkoordinate entlang der Meßstrecke geschah durch Wegmarken auf dem Wachspapierstreifen; dem Abstand der von Hand auf den Wachspapierstreifen aufgezeichneten Wegmarken entsprach eine 5 m lange Strecke. Die Messungen wurden ausschließlich auf einem Acker vorgenommen.

Inzwischen hat man die Meßgeräte und die Meßverfahren verbessert mit dem Ziel, die Genauigkeit der Messungen und außerdem die Aussagekraft von Parameter-Abhängigkeiten zu steigern. Auch heute noch ist das analoge Aufzeichnen von Meßwerten das einfachste und gebräuchlichste Verfahren zum Erfassen von Meßwerten. Hierzu dienen Lichtstrahl-Oszillographen, Flüssigkeitschreiber, Punkt- und Linienschreiber oder Oszilloskope, die auf einem Bildschirm das photographisch speicherbare Meßergebnis ausgeben. Das Auswerten der Schriebe oder der Aufnahmen geschieht von Hand durch Bestimmen der einzelnen Meßpunkten zugeordneten Werte sowie durch Berechnen nicht meßbarer Systemgrößen.

Ein solches Auswerten ist sehr zeitintensiv; außerdem wird auf Grund der punktweisen Auswertung das Informationsangebot reduziert, was zur Folge hat, daß das Ergebnis an Aussagefähigkeit verliert. Aus diesen Gründen kann die automatische Datenverarbeitung im Hinblick auf das Aufbereiten von Meßwerten erhebliche Vorteile bieten.

Zum Messen mechanischer Größen werden heute meist elektrische Meßgeber benutzt, deren Ausgangsgröße ein elektrisches Signal ist. Dieses elektrische Messen mechanischer Größen hat, gegenüber den früher üblichen Verfahren, mehrere Vorzüge: Man kann 1. den Einfluß des Meßvorgangs auf die zu erfassende Meßgröße vernachlässigen, 2. die Empfindlichkeit der Meßketten gut an unterschiedliche Meßbereiche anpassen, 3. die ermittelten Meßwerte über beliebig lange Strecken drahtlos oder leitungsgebunden übertragen, 4. mehrere mechanische Meßgrößen gleichzeitig und phasenrichtig registrieren, 5. die Meßwerte elektrisch auf einem Träger (Platte, Band) auf einfache Weise speichern und 6. nicht gemessene oder nicht meßbare Größen beim Einsatz einer EDV (elektronische Datenverarbeitungsanlage) berechnen.

1. Einleitung

In der Landtechnik werden seit langem Messungen am Pflug vorgenommen, mit dem Ziel, Aussagen über die erforderlichen Zugkräfte in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodenart und der Form der Pflugschar sowie über die Zweckmäßigkeit der Schleifsohle, der Tastrolle und der verschiedenen Anbau- bzw. Anhängesysteme zu erhalten.

*) Dipl.-Ing. Michael Graef ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

2. Aufgabe

Dieser Beitrag¹⁾ enthält die mathematischen und die meßtechnischen Grundlagen für eine Forschungsarbeit²⁾ [8], in der die Gesetzmäßigkeiten der Schleppkurven eines Streichblechpfluges behandelt werden. Das Ableiten dieser Gesetzmäßigkeiten erfordert zunächst das Bestimmen der Schleppkurven eines einscharigen Pfluges bei veränderlicher Grindelknickung und Vertikalverstellung des Pflug-Anlenkpunktes. Hierzu hat man den Pflug als einfachen Schwingpflug mit und ohne Schleifsohle ausgebildet, der über ein möglichst kurzes Zweigelenkglied zum Messen der Zugkraft nach Größe und Richtung am Meßwagen angelenkt ist. Deshalb kann sich der Pflug im Boden frei einspielen, und zwar stets dem jeweils vorhandenen Bodenwiderstand entsprechend.

3. Meßsystem

Die Messungen wurden in einer Bodenrinne [9] vorgenommen. Im Gegensatz zu Feldversuchen können sich bei einer Bodenrinne die Witterung, die klimatischen Gegebenheiten und die Bodenstrukturen (die erheblich vom Klima sowie von der Vegetation abhängen) nicht als Einflußgrößen auswirken. Außerdem ist mit den Führungsschienen, auf denen der Meßwagen läuft, ein Koordinatensystem fest vorgegeben, so daß die Voraussetzungen erfüllt sind, die eine Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse gewährleisten. Darüber hinaus läßt sich das Meßsystem am Meßwagen fest installieren. Bei diesem Meßverfahren können allerdings diejenigen Streuungen der Meßwerte, die beim Messen auf einem Acker auftreten, nicht erfaßt werden; aus diesem Grund muß man die bei einer solchen Untersuchung gewonnenen Ergebnisse durch Feldversuche ergänzen.

Am Meßwagen ist nach Bild 1 ein einschariger Pflug angehängt. Die Ausgangssignale der Meßgeber werden über Meßkabel zu einem Analogrechner übertragen und Speichergeräten zugeführt.

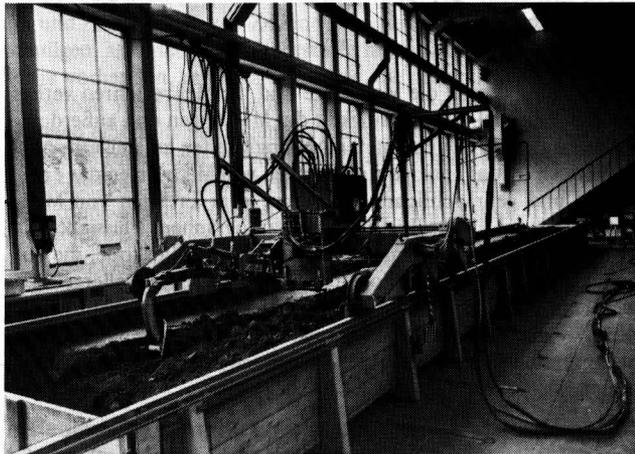


Bild 1. Meßwagen für die Versuche mit einem einscharigen Pflug; vom Meßwagen werden die Meßwerte über Kabel zu einem Analogrechner übertragen.

3.1. Grundlagen

Damit man die Schleppkurven quantitativ erfassen kann, ist es zunächst erforderlich, diejenigen physikalischen Größen zu ermitteln, die sich als Haupteinflußgrößen auf die Schleppkurven auswirken. Danach sind die Meßgrößen zu bestimmen, aus denen sich diese Einflußgrößen berechnen lassen. Schließlich hat man das Meßsystem so auszulegen, daß die Werte aller für das Berechnen benötigten Meßgrößen am Pflug gemessen werden können.

¹⁾ Die Thematik wurde in einem Vortrag bei der Arbeitstagung der CIGR (Commission Internationale du Génie Rural) in Wageningen, Niederlande, vom 19. bis 23. Okt. 1970 behandelt.

²⁾ Herrn Dr. K. Hain sei für die Anregungen zu dieser Arbeit gedankt. Die versuchstechnischen Arbeiten wurden von den Herren H. Krönert, H.-D. Wiemann und A. W. Zielstorff ausgeführt.

Bild 2. Geometrische Kenngrößen und die am Pflug angreifenden Kräfte.

x, y	Koordinaten in horizontaler und vertikaler Richtung
A_0	Verstellpunkt des Meßglieds am Meßwagen
A	Endpunkt des Meßglieds
B	Verstellpunkt des Grindels
D	Scharspitze
H	Schnittpunkt der Kraftwirkungslinien
G	Gesamtwicht des Grindels
R	resultierende Bodenkraft
W	Zugkraft, die das Meßglied erfaßt
l_a	Länge der Strecke $\overline{A_0A}$ (Länge des Meßglieds)
l_b	Länge der Strecke \overline{AB}
l_c	kürzester Abstand der Punkte B und D
l_g	Abstand des Punktes A von demjenigen Punkt auf der Strecke \overline{AB} , der die gleiche x-Koordinate wie der Punkt H hat
s	Abstand des Punktes A_0 von der vertikalen Bezugsachse in horizontaler Richtung, auch Weg genannt
α	Neigungswinkel der Strecke $\overline{A_0A}$ gegen eine Horizontale
β	Neigungswinkel der Strecke \overline{AB} gegen eine Horizontale
γ	Knickwinkel des Grindels
δ	Neigungswinkel der Richtlinie gegen eine Horizontale
ϵ	Neigungswinkel des vom Punkt B auf die Richtlinie gefällten Lots gegen die Strecke \overline{BD}
Q	Neigungswinkel der Kraft R gegen eine Horizontale
m	auf eine Vertikale bezogene Wegkomponente des Verstellpunktes A_0 am Meßwagen
m_{max}	Maximalwert der Wegkomponente m
l_n	Abstand des Punktes A_0 von der horizontalen Bezugsachse für $m=0$; die Summe $l_n + m$ ist gleich dem Wert der Koordinate y des Punktes A_0

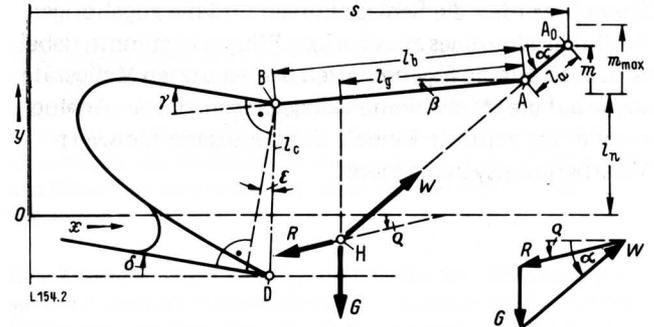


Bild 2 zeigt eine Skizze des Meßpflugs. Die für das Bestimmen der Schleppkurven erforderlichen Größen sind eingetragen. Zu diesen Bestimmungsgrößen gehören die Koordinaten x_D und y_D der Scharspitze D, die Koordinaten x_H und y_H des Kraftangriffspunktes H, die Zugkraft W und die resultierende Bodenkraft R; den Kräften entsprechen Vektoren, denen sowohl eine Größe als auch eine Richtung zugeordnet ist.

Die Gleichungen zum Berechnen der Kenngrößen lassen sich aus den Beziehungen herleiten, die das kinematische und das dynamische Verhalten des Pflugsystems beschreiben. Für die Koordinate x_D der Scharspitze D gilt mit den in Bild 2 erklärten Bezeichnungen die Gleichung

$$x_D = s - l_a \cos \alpha - l_b \cos \beta + l_c \sin (\beta + \gamma + \epsilon) \quad (1)$$

Die Koordinate y_D der Scharspitze D, der die Pflugtiefe entspricht, ergibt sich zu

$$y_D = l_n + m - l_a \sin \alpha - l_b \sin \beta - l_c \cos (\beta + \gamma + \epsilon) \quad (2)$$

Die Koordinaten x_H und y_H des Schnittpunktes H lauten

$$x_H = s - l_a \cos \alpha - l_g \cos \beta \quad (3)$$

und

$$y_H = l_n + m - (\sin \alpha) \left[l_a + l_g \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right] \quad (4)$$

Die resultierende Bodenkraft R läßt sich aus der am Meßglied (Strecke $\overline{A_0A}$) angreifenden Zugkraft W und dem Gesamtgewicht G des Grindels bestimmen, da die Gleichung

$$R = \sqrt{W^2 - 2GW \sin \alpha + G^2} \quad (5)$$

gilt. Schließlich kann man die in Bild 2 erklärten Neigungswinkel ϱ und δ aus den Beziehungen

$$\sin \varrho = [(W \sin \alpha) - G] / R \quad (6)$$

und

$$\delta = \beta + \gamma \quad (7)$$

berechnen.

Die Gleichungen zum Bestimmen der charakteristischen Größen enthalten sowohl konstante Größen, wie z.B. die Längen der Getriebeglieder der Pflugaufhängung, als auch variable Größen. Die veränderlichen Größen, die man messen muß, sind die in Bild 2 erklärten Systemparameter $\sin \alpha$, β , γ , m , s und W . Außerdem werden noch das Torsionsmoment M am Meßrohr und die vom Auslenkwinkel α abhängende Größe $\sin \alpha$ gemessen, Bild 3. Aus diesen beiden Meßgrößen läßt sich eine Aussage über die auf die Pflugschar einwirkende Seitenkraft herleiten.

Bild 3 zeigt den Pflug mit den Meßgebern im Grund- und Aufriß. Damit man die Zugkraft am Meßglied a ohne Torsionseinfluß eindeutig messen kann, ist eine Momentenstütze mit den Drehgelenken A, E und F erforderlich. Beim Pflügen tritt infolge der Bodenkraft ein Drehmoment um die Längsachse des Grindels auf. Die Momentenstütze ist als räumliches Getriebe mit zwei oberen Lenkern ausgebildet, deren Gelenke große Führungslängen haben. Dadurch wird das Drehmoment aufgefangen, so daß im Meßglied a nur Zugspannungen, hingegen keine Biege- oder Torsionsspannungen auftreten. Darüber hinaus sind beide Gelenke des Meßglieds a als Kugelgelenke ausgebildet.

Eine Änderung der Pflugtiefe y_D läßt sich durch Ändern der beiden Systemparameter γ und m erreichen. Diese beiden Parameter sind voneinander unabhängige Einflußgrößen der Schleppkurven.

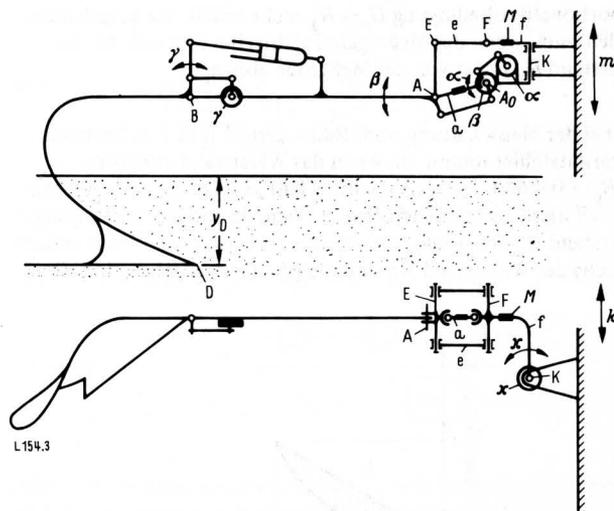


Bild 3. Meßgeber am Pflug im Grund- und Aufriß.

- E, F Drehgelenkachsen der Momentenstütze
 - K Anlenkachse des Pfluges am Meßwagen
 - a Meßglied (im Grundriß sind die Gelenke am Meßglied a zur besseren Übersicht auseinandergedezogen gezeichnet)
 - e oberer Lenker der Momentenstütze
 - f Meßrohr
 - M Torsionsmoment
 - k Seitenverstellung der Anlenkachse K am Meßwagen
- übrige Symbole wie in Bild 2

Bild 4. Meßwertverarbeitungssystem mit Analogrechner.

Symbole wie in Bild 2
Erklärungen im Text

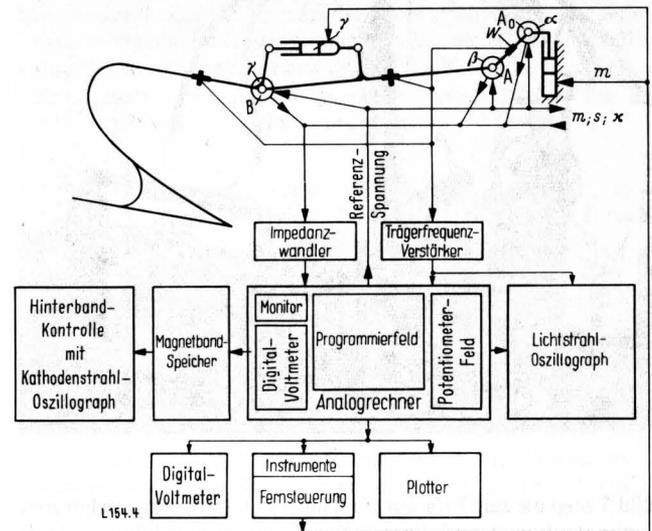


Bild 4 zeigt das gesamte Meßwert-Verarbeitungssystem am Pflug. Zu ihm gehört – als zentrale Einheit – ein Analogrechner, der auch die Referenz-Spannung für die den Punkten A_0 , A und B zugeordneten Meßpotentiometer liefert und aus den Meßgrößen die jeweils gewünschten Größen berechnet. Meßgeber (Potentiometer, Dehnungsmessstreifen) erfassen die Meßgrößen (z.B. die Winkel β und γ sowie die Zugkraft W). Ihrer Ausgangsgröße entspricht eine elektrische Spannung, die über einen Impedanzwandler bzw. einen Trägerfrequenz-Verstärker dem Meßwert-Verarbeitungssystem zugeführt wird. Dieses System ist so ausgelegt, daß man die Meßwerte mit Lichtstrahl-Oszillograph, Magnetbandspeichergerät oder Plotter (Kurzzeichengerät) unmittelbar aufzeichnen und sie gleichzeitig zum Berechnen von Größen im Analogrechner verwenden kann. Die Peripheriegeräte werden auch zum Aufzeichnen von berechneten Größen benutzt. Ein Instrumentenpult dient zum Überwachen der Kraftkomponenten und der Lagekoordinaten; dieses Pult ermöglicht außerdem ein ferngesteuertes „Einstellen“ der jeweils gewünschten Werte der beiden Schleppkurvenparameter γ und m .

3.2. Meßgeber

Die Ausgangsgröße aller benutzten Meßgeber ist ein elektrisches Signal. Zum Messen geometrischer Größen (Winkel, Längen) dienen potentiometrische Meßgeber. Diese Meßgeber enthalten entweder drahtgewickelte Widerstandselemente – deshalb ist ihr Auflösungsvermögen begrenzt und ihre Ausgangsgröße, infolge der Windungssprünge un stetig – oder Widerstandsfilmschichten mit unendlich großem Auflösungsvermögen. Außerdem haben diese Schichtpotentiometer – gegenüber den Drahtpotentiometern – ein gutes dynamisches Verhalten (ihre Ausgangsspannung folgt der Meßgröße auch bei schneller Änderung unmittelbar), eine große Genauigkeit und eine gute Konformität bzw. kleine Linearitätstoleranz (unter Konformität versteht man die Toleranz der Ausgangsspannung bei einer nichtlinearen Potentiometer-Kennlinie).

In Abhängigkeit von ihrer Auslegung unterscheidet man zwischen

1. linearen Drehpotentiometern zum Messen eines Winkels, der kleiner als 2π (360°) bleibt,
2. potentiometrischen Weggebern zum Erfassen von geradlinigen Verschiebungen,
3. Funktionspotentiometern zum Nachbilden einer vorgegebenen Funktion und
4. Wendelpotentiometern mit einem Winkel-Meßbereich, der größer als 2π (360°) ist.

Bild 5. Weggeber bzw. Potentiometer (mit linearer Kennlinie) zum Messen der Wegkomponente m und der Winkel β sowie γ .

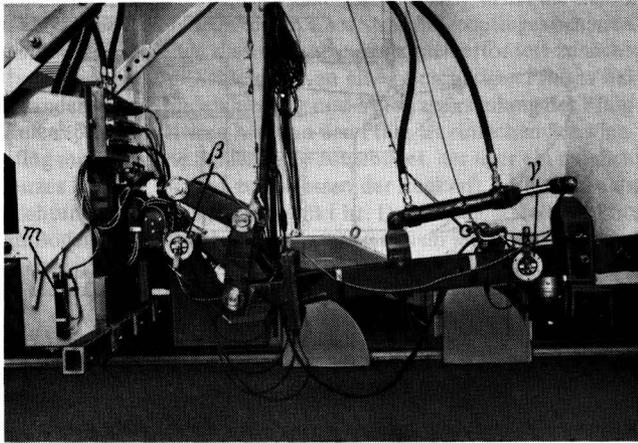


Bild 5 zeigt die zum Erfassen der Winkel β und γ benötigten linearen Drehpotentiometer mit linearer Kennlinie und einer Filmschicht als Widerstandselement. Über Parallel-Kurbelgetriebe wird die Meßgröße von den Drehgelenken auf die Potentiometer übertragen. Zum Messen der Verschiebung m des Anlenkpunktes A_0 in vertikaler Richtung, Bild 2 und 5, dient ein potentiometrischer Weggeber in gleicher Ausführungsart. Damit man den Meßbereich dieses Weggebers an die Verschiebung m_{\max} anpassen kann, wurde diesem Geber ein mechanisches Übersetzungsgetriebe vorgeschaltet.

Zum Messen des Weges, den der Meßwagen in Richtung der Führungsschienen zurücklegt, wird ein Wendepotentiometer mit einem Meßbereich von $(25 \times 2\pi =) 50\pi$ bzw. 9000° verwendet, ein Bereich, dem 25 Umdrehungen des im Potentiometer den Meßwert abgreifenden Schleifers entsprechen. Das Potentiometer ist an der Seil-Umlenkrolle angebaut.

Damit man leicht und schnell den Ort erkennen kann, an dem sich der Meßwagen zu einem bestimmten Zeitpunkt auf den Führungsschienen befindet, wird der Weg auch digital gemessen. Die digitale Wegmarkierung liefert in Form von Impulsen ein Kontaktmaßstab, der an der Bodenrinne unterhalb der Führungsschiene angebracht ist. Er besteht aus einem Isolierkörper, auf dem in Abständen von 10 cm jeweils ein Kontaktstreifen angebracht wurde. In Abständen von 100 cm sind jeweils zwei Kontaktstreifen vorhanden, die einen Doppelimpuls erzeugen. Die Kontaktabnahme geschieht über eine Brücke mit zwei Kohlebürsten.

Zum Messen der Zugkraft W und des Torsionsmoments M dienen Dehnungsmeßstreifen (DMS). Dies sind temperaturkompensierte Folienmeßstreifen, die den gleichen Ausdehnungskoeffizienten wie der Werkstoff haben, aus dem der Körper besteht, auf dessen Oberfläche sie aufgeklebt werden.

3.2.1. Anschluß der Meßgeber

Als Speisespannung für die Meßgeber dient die Referenzspannung (± 10 V) des Analogrechners, die äußerst stabil ist und deshalb auch bei einer Belastung der Spannungsquelle nur sehr wenig von ihrem Sollwert abweicht. Außerdem sind sowohl die Meßpotentiometer als auch die Koeffizienten-Einstellpotentiometer so geschaltet, daß an ihnen diese Referenzspannung abfällt. Deshalb entspricht der Referenzspannung die Einheit der Maschinenvariablen. Dies hat den Vorteil, daß nur die Forderung nach ausreichender Spannungs Konstanz, nicht jedoch die nach einem möglichst kleinen Absolutfehler (Abweichung des Istwerts vom Sollwert der Referenzspannung) erfüllt zu sein braucht.

Damit der lineare Zusammenhang zwischen der Meßgröße und der Ausgangsgröße der potentiometrischen Meßgeber auch bei einer

Belastung erhalten bleibt, benötigt man zum Anpassen der Geber an den Analogrechner adaptive Übertragungsglieder. Als solche dienen Impedanzwandler; dies sind Operationsverstärker in Spannungsfolger-Schaltung, die zwischen die Meßgeber und die Eingänge des Analogrechners geschaltet werden.

Bild 6 zeigt die elektrische Schaltung eines potentiometrischen Meßgebers mit dem Gesamtwiderstand R_0 , dem unmittelbar der Eingangswiderstand R_e des Analogrechners nachgeschaltet ist. Am Widerstand R_0 falle die konstante Referenzspannung U_0 des Analogrechners ab. Der dem jeweiligen Meßwert proportionalen Schleiferstellung entspreche der Widerstand R_1 . Die Größe U_e ist die dem Widerstand R_1 zugeordnete, am Eingangswiderstand R_e abfallende Spannung.

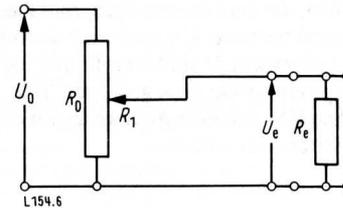


Bild 6. Schaltung eines potentiometrischen Meßwertaufnehmers mit unmittelbar nachgeschaltetem Eingangswiderstand R_e des Analogrechners.

Erklärungen im Text

Bei der Meßschaltung nach Bild 6 besteht zwischen den Spannungen und den Widerständen die Beziehung

$$\frac{U_e}{U_0} = \frac{1}{(R_0/R_1) + [(R_0 - R_1)/R_e]} \quad (8)$$

Hieraus folgt aber, daß bei der Meßschaltung nach Bild 6 der Verlauf des Spannungsverhältnisses U_e/U_0 in Abhängigkeit vom Widerstandsverhältnis R_1/R_0 außer für $R_1/R_0 = 0$ und $R_1/R_0 = 1$ von dem Verlauf abweicht, der einem linearen Zusammenhang entspricht, Bild 7. Deshalb ist bei der Schaltung nach Bild 6 auch die Proportionalitätsbedingung $U_e \sim R_1$ nicht erfüllt, die eingehalten werden muß, wenn das Meßergebnis fehlerfrei sein soll, da der Widerstand R_1 linear von der Meßgröße abhängt.

Der bei der Meßschaltung nach Bild 6 gemäß Bild 7 auftretende Linearitätsfehler nimmt ab, wenn das Widerstandsverhältnis $R_0/R_e \rightarrow 0$ strebt. Dieses Verhältnis läßt sich jedoch im vorliegenden Fall nicht hinreichend klein machen, da sowohl der Eingangswiderstand R_e des Analogrechners als auch (in einem bestimmten Bereich) der Widerstand R_0 des Meßgebers vorgegeben sind. Des-

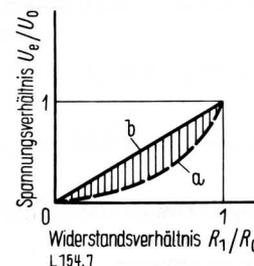
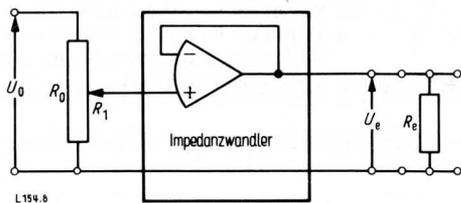


Bild 7. Lineare und nichtlineare Kennlinie einer Meßschaltung.

- a nichtlineare Kennlinie der Meßschaltung nach Bild 6
 - b lineare Kennlinie der Meßschaltung nach Bild 6 mit einem Impedanzwandler, der zwischen den Potentiometerabgriff und den Analogrechner-Eingang zu schalten ist
- Erklärungen im Text

Bild 8. Schaltung eines potentiometrischen Meßwertaufnehmers mit linearem Übertragungsverhalten.

Erklärungen im Text



halb wird nach **Bild 8** zur Widerstandsanzpassung zwischen dem Potentiometerabgriff (Schleifer) und dem Analogrechner-Eingang ein Impedanzwandler geschaltet. Dieser hat, bei jeweils gleicher Spannung am Ein- und Ausgang, einen hochohmigen Eingang und einen niederohmigen Ausgang; er ist außerdem rückwirkungsfrei, d.h. Störungen am Ausgang wirken nicht auf den Eingang zurück. Das Normieren, d.h. das Anpassen der Meßgröße an den jeweiligen Meßbereich, geschieht im Analogrechner durch Potentiometer.

3.3. Meßwertverarbeitung mit dem Analogrechner

Dem Analogrechner werden acht Meßgrößen – denen sechs Lagekoordinaten und zwei Kräfte entsprechen – zugeführt und aus ihnen die Größen berechnet, die man zum Ermitteln der zu registrierenden Meßdaten und zum Steuern der Versuche benötigt.

Die Struktur der Rechenschaltung nach **Bild 9** entspricht den mathematischen Beziehungen, aus denen sich die Lagekoordinaten

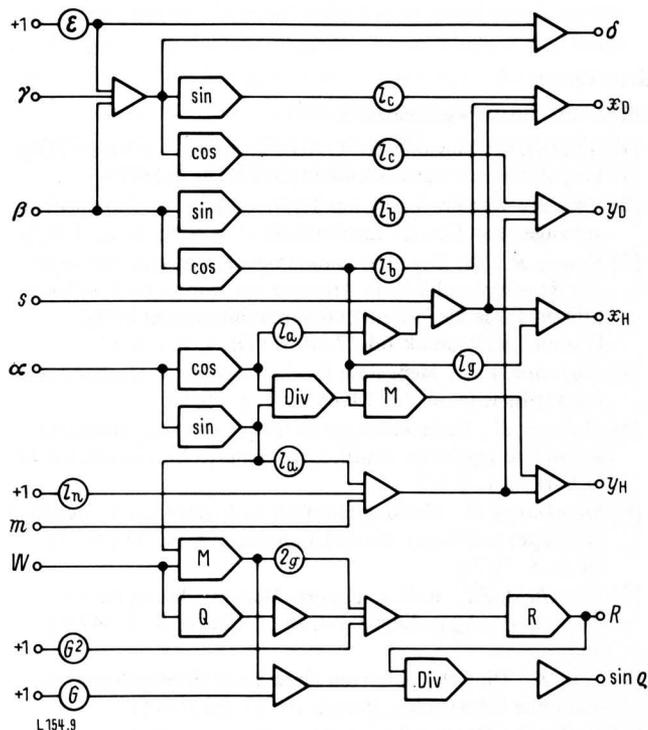


Bild 9. Analogrechenschaltung zum Ermitteln der Lagekoordinaten und der an einem einschichtigen Pflug angreifenden Kräfte.

- ⊖ Koeffizienten-Einstellpotentiometer für die jeweils angegebene Größe
 - addierende Übertragungsglieder
 - sin, cos kennzeichnen Funktionsgeber
 - M kennzeichnet multiplizierende Übertragungsglieder
 - Div kennzeichnet dividierende Übertragungsglieder
 - Q kennzeichnet quadrierende Übertragungsglieder
 - R kennzeichnet radizierende Übertragungsglieder
- die den Eingängen (links) und den Ausgängen (rechts) zugeordneten Symbole sowie alle anderen Symbole haben die in Bild 2 angegebene Bedeutung

und die Kräfte berechnen lassen. Die in **Bild 9** verwendeten Schaltungssymbole repräsentieren die Funktionselemente – z.B. Addierer, Multiplizierer, Dividierer, Quadrierer, Radizierer, Funktionsgeber – des Analogrechners, die die erforderlichen Rechenoperationen ausführen. Im Analogrechner werden alle Meßgrößen, alle vorgegebenen Systemparameter und auch alle berechneten Größen stets durch eine elektrische Spannung ausgedrückt, die der ihr jeweils zugeordneten Größe proportional ist.

Ein Beispiel erläutere den Rechenvorgang. Betrachtet sei Gl. (1), die angibt, wie man die Wegkoordinate x_D der Scharspitze D nach **Bild 2** zu berechnen hat. Zunächst wird der konstante Winkel ϵ an einem Potentiometer als elektrische Spannung eingestellt; zum Erfassen der Winkel β und γ dienen Meßpotentiometer. Ein Addierer bildet die Summe $\beta + \gamma + \epsilon$. Ein Funktionsgeber liefert als Ausgangsgröße die Winkelfunktion $\sin(\beta + \gamma + \epsilon)$, die mit dem an einem Potentiometer eingestellten Systemparameter l_c multipliziert wird. Als Ergebnis erhält man den Term $l_c \sin(\beta + \gamma + \epsilon)$. Außerdem ermittelt ein Funktionsgeber die Winkelfunktion $\cos \beta$, aus der sich durch Multiplikation mit dem ebenfalls an einem Potentiometer eingestellten Systemparameter l_b der Term $l_b \cos \beta$ ergibt.

Auch den Winkel α erfaßt ein Meßpotentiometer. Ein Funktionsgeber liefert die Größe $\cos \alpha$, die mit dem an einem Potentiometer eingestellten konstanten Systemparameter l_a multipliziert wird. Auf diese Weise erhält man die Größe $l_a \cos \alpha$, aus der ein Vorzeichen-Umkehrer die Größe $-l_a \cos \alpha$ bildet. Schließlich ergibt sich hieraus durch Addition des Weges s die Ausgangsgröße $s - l_a \cos \alpha$ eines Addierers.

Werden nach **Bild 9** alle drei Terme als Eingangsgrößen einem Addierer zugeführt, so erhält man gemäß Gl. (1) als Ausgangsgröße des Addierers die Koordinate x_D ; dieser entspricht eine elektrische Spannung, die z.B. ein Koordinatenschreiber (X,Y-Schreiber) aufzeichnen kann. Auf diese Weise läßt sich während des Meßvorgangs die Koordinate x_D der Scharspitze des Pfluges berechnen und aufzeichnen. Die entsprechenden Aussagen gelten für die Größen y_D , x_H , y_H , R , $\sin Q$ und δ , die ebenfalls Ausgangsgrößen des Analogrechners nach **Bild 9** sind; sie werden nach den durch Gl. (2) bis (7) erfaßten Bildungsgesetzen berechnet.

4. Auswertung

Durch Auswerten der auf einem Magnetband gespeicherten Daten sollen die Schlepp- und Bahnkurven sowie der Kraftverlauf ermittelt und mit einem Plotter aufgezeichnet werden. Hierzu ist es nötig, den Analogrechner mit Hilfe einer Auswerteschaltung neu zu programmieren. Diese Auswerteschaltung hat den folgenden Forderungen zu genügen: Sie muß die vom Bandgerät ausgegebenen Meßwerte so normieren, daß die Anpassungsbedingungen erfüllt sind, die sich aus den Eigenschaften der Rechenschaltung ergeben. Das Normieren ist mit Hilfe von Eichkurven und einem Kontrolloszillogramm vorzunehmen. Außerdem sollen die Bahnkurven für mehrere vorgegebene Fixpunkte des Pfluges so berechnet werden, daß sie sich bei dem jeweils gewählten Maßstab aufzeichnen (Plotter) lassen.

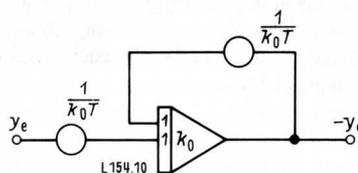


Bild 10. Analogrechenschaltung zur Mittelwertbildung.

- T Zeitkonstante
- k_0 konstanter Integrationsfaktor; es gilt $k_0 T > 1$
- y_e Eingangsgröße der Schaltung
- y_a Ausgangsgröße der Schaltung

Bild 11. Die Eingangsgröße und die Ausgangsgröße (Mittelwert der Eingangsgröße) der Schaltung nach Bild 10 als Funktionen der Zeit.

- a Verlauf der Eingangsgröße y_e
b Verlauf der Ausgangsgröße y_a

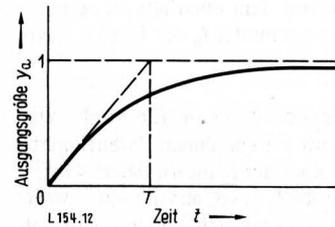
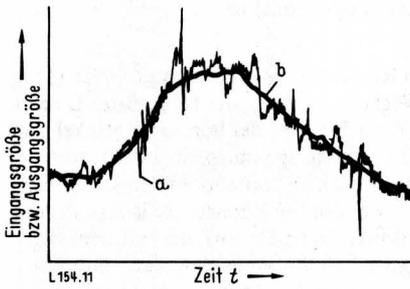


Bild 12. Übergangsfunktion der Schaltung nach Bild 10.

Da die Bahnkurven ausreichend oberwellenfrei, d.h. kaum von hochfrequenten Schwingungen überlagert sind, kann man sie unmittelbar aufzeichnen. Auf die Zeitfunktion hingegen, die der Zugkraft W entspricht, wirken sich die Schwingungen erheblich aus, die wahrscheinlich durch das Aufreißen des Bodens verursacht werden. Damit sich in diesem Fall eine auswertbare Kurve ergibt, ist es nötig, die höherfrequenten Anteile auszufiltern und so den Mittelwert zu bilden; die gleiche Aussage gilt für die resultierende Bodenkraft R .

Bild 10 zeigt eine Schaltung zur Mittelwertbildung; sie besteht aus Rechenelementen, die im Analogrechner vorhanden sind. Ihrer Ausgangsgröße y_a entspricht der Mittelwert der Eingangsgröße y_e , **Bild 11.** Der Mittelwertbildner nach Bild 10 glättet also den Kurvenverlauf. Die glättende Wirkung nimmt mit wachsender Zeitkonstante T des Integrierers – mit dem konstanten Integrationsfaktor k_0 – zu. Mit zunehmender Zeitkonstante T wächst aber auch die Einstellzeit des Mittelwertbildners; dies geht aus der in **Bild 12** dargestellten Übergangsfunktion der Schaltung nach Bild 10 hervor.

Bild 13 zeigt einen Schrieb derjenigen Größen, die der Analogrechner als elektrische Spannungen ausgibt. Bild 13.1. gibt, mit den in Bild 2 erklärten Bezeichnungen, den Verlauf von Kräften, von Winkeln und des Parameters m in Abhängigkeit vom Weg s wieder. Die in Bild 13.2. erfaßten Schleppkurven beziehen sich auf die Punkte A_0 , A, B, D und H nach Bild 2; um die Übersicht zu fördern, wurde der Pflug zweimal eingezeichnet.

L 154

Bild 13. Schleppkurven und zugehörige Einflußgrößen als Funktionen des Weges s .

- a dem Winkel β zugeordneter Verlauf
b dem Winkel γ zugeordneter Verlauf
c dem Winkel δ zugeordneter Verlauf
d dem Winkel Q zugeordneter Verlauf
e der Kraft W zugeordneter Verlauf
f der Kraft R zugeordneter Verlauf
g der Verschiebung m zugeordneter Verlauf
h Verlauf der Koordinate des Punktes A_0
i Verlauf der Koordinate des Punktes A
k Verlauf der Koordinate des Punktes B
l Verlauf der Koordinate des Punktes D
m Verlauf der Koordinate des Punktes H
alle benutzten Symbole haben die in Bild 2 angegebene Bedeutung

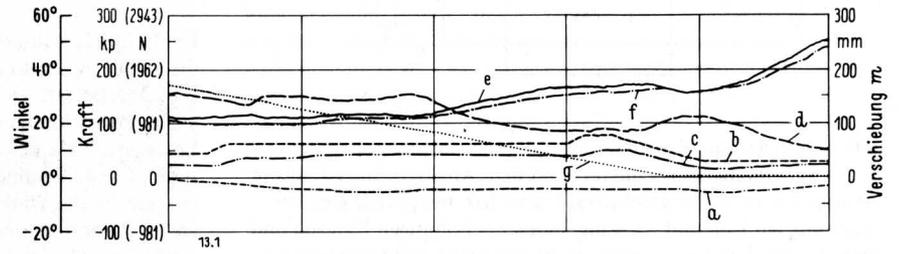


Bild 13.1. Winkel, Kräfte und Verschiebung m in Abhängigkeit vom Weg s .

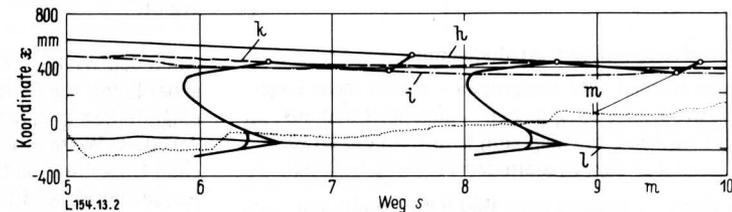


Bild 13.2. Koordinate y von vorgegebenen Fixpunkten in Abhängigkeit vom Weg s .

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Getzlaff, G.*: Messung der Kraftkomponenten an einem Pflugkörper. *Grundl. Landtechnik* (1951) Nr. 1, S. 16/24.
- [2] *Hain, K.*: Zur Kinematik der Tiefenhaltung von Schlepperanbaugeräten. *Grundl. Landtechnik* (1952) Nr. 3, S. 119/28.
- [3] *Krause, R.*: Die Zug- und Lenkfähigkeit schwerer Schlepper mit Regelhydraulik beim Arbeiten mit Anbau- und Aufsattelpflügen sowie die Tiefen- und Seitenführung der Pflüge. *Grundl. Landtechnik* Bd. 17 (1967) Nr. 4, S. 132/42.
- [4] *Nagornov, V.N.*: Meßgeräte für die Pflugarbeit. *Mechanizacija i elektrifikacija* Bd. 24 (1966) Nr. 1, S. 49/51.
- [5] *Skalweit, H.*: Feldmessungen an Schleppern mit Dreipunktanbau und regelnden Krafthebern. *Landtechn. Forsch.* Bd. 14 (1964) Nr. 1, S. 1/5.
- [6] *Steinkampf, H.*: Messung räumlich wirkender Kräfte zwischen Schlepper und Gerät. *Grundl. Landtechnik* Bd. 21 (1971) Nr. 3, S. 71/76.
- [7] *Wegscheid, E.L.*, u. *H.A. Meyers*: Meßeinrichtung für eine Bodenrinne. *Agric. Engng.* Bd. 48 (1967) Nr. 8, S. 442/45, 463.
- [8] *Hain, K.*: Die Schleppkurven eines Streichblechpfluges mit und ohne Schleifsohle. *Bericht Hn 27*, Ba 168/11.
- [9] *Möller, R.*: Überlegungen beim Aufbau einer Bodenrinne. *Grundl. Landtechnik* Bd. 17 (1967) Nr. 5, S. 175/79.
- [10] ● *Giloi, W.*, u. *R. Lauber*: *Analogrechnen*. Berlin: Springer 1963.