

Über die selbsttätige Regelung an Landmaschinen

Von W. Batel und R. Thiel, Braunschweig-Völkenrode

Die angespannte Lage der deutschen Landwirtschaft im Hinblick auf den Arbeitsmarkt ist hinreichend bekannt. Ohne nach den Ursachen zu fragen, wollen wir von dieser Tatsache ausgehen und erörtern, welche Möglichkeiten der Abhilfe die Technik bietet. Eine grundsätzliche Antwort bereitet keine Schwierigkeiten, weil in der Industrie vielfältige Lösungen für das gleiche Problem zu finden sind.

Die ständige Zunahme des Produktionsvolumens der Industrie bedingt einen steigenden Bedarf an Arbeitskräften. Da die Reserve an Arbeitskräften jedoch beschränkt ist, ist entweder das Produktionsvolumen begrenzt, oder man muß neben anderen Möglichkeiten — wie z. B. die Mechanisierung — versuchen, menschliche Arbeitskraft durch automatisch arbeitende Elemente zu ersetzen oder zu erweitern. Durch eine solche Maßnahme läßt sich der Bedarf an Arbeitskräften, auf das Produktionsvolumen bezogen, erheblich senken, wie die Entwicklung in der Industrie gezeigt hat. Es drängt sich damit die Frage auf, ob man über die Automation auch in der Landwirtschaft eine Entlastung des Arbeitsmarktes herbeiführen kann.

Da es für die Automation in der Landtechnik allgemeingültige Vorbilder noch nicht gibt und in der Literatur im wesentlichen nur hinweisende Ausführungen zu finden sind [1; 2], wollen wir zunächst nach Anwendungsarten suchen. Solche sind die Steuerung und vor allem die Regelung. Da letztere für die Entwicklung der Landtechnik besonders interessant erscheint, seien hierfür im folgenden, von der Hypothese ausgehend, Anwendungsmöglichkeiten und prinzipielle konstruktive Lösungen erörtert.

Als Anwendungsbereich der Regelungstechnik in der Landtechnik bietet sich in erster Linie der Ersatz der oft vorkommenden Handregelung durch eine selbsttätige Regelung an. Ferner ist sie für Aufgaben geeignet, für deren Durchführung die menschlichen Sinnesorgane nicht leistungsfähig genug sind oder fehlen.

Anwendungsbeispiele für die Regelung

Erörtern wir zunächst den Ersatz der Handregelung durch eine selbsttätige an einem Fall, der bereits praktisch erprobt ist, und zwar die Tiefgangregelung beim Pflügen, wie sie die Firma Hanomag entwickelt hat, **Bild 1** [2]. Der Soll-Wert, in diesem Fall die Pflugtiefe, wird durch das Handrad 1 vorgegeben. Ein Radpaar tastet die Oberfläche des Bodens ab und gibt die Regel-

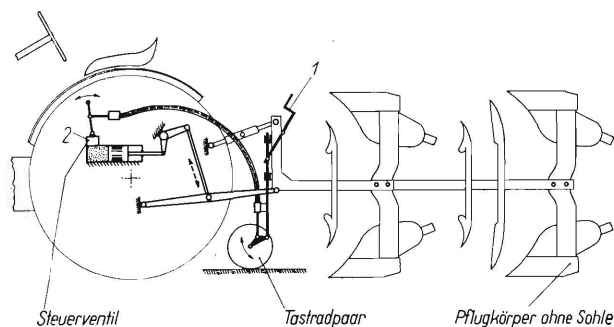


Bild 1. Tiefgangregelung eines Pfluges. System Hanomag.

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel VDI ist Direktor des Institutes für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, und Dr.-Ing. Roman Thiel Abteilungsleiter im gleichen Institut.

größe in den Steuerschieber 2. Über den Kraftheber wird die Arbeitstiefe des Pfluges entsprechend nachgestellt. Weitere, jedoch indirekte Pflugtiefenregelungen sind z. B. die von *Ferguson* und *John Deere* [2].

Als weitere Möglichkeit sei die selbsttätige Höheneinstellung der Schneidwerke oder Pick-up-Einrichtungen an Mähdreschern genannt. Eine Lösung zeigt das Schema nach **Bild 2**. In ähnlicher Weise läßt sich auch die Höhe der Schneidelemente bei Feldhäckslern regeln, wodurch sich eine Mitnahme von Erdboden auf ein Minimum herabsetzen läßt.

Die selbsttätige Nachführung eines Köpfmessers wird bei den z. Z. üblichen Bauarten dadurch gelöst, daß Taster und Messer fest miteinander verbunden sind. Diese Anordnung erlaubt aber nur geringe Fahrgeschwindigkeiten, weil sonst die Rüben unzulässig hoch beansprucht werden. Für höhere Arbeitsgeschwindigkeiten käme u. a. die Anordnung nach **Bild 3** in Frage, bei der zwischen Taster und Köpfmesser eine Kraftquelle für die Verstellung des Arbeitselementes eingeschaltet ist.

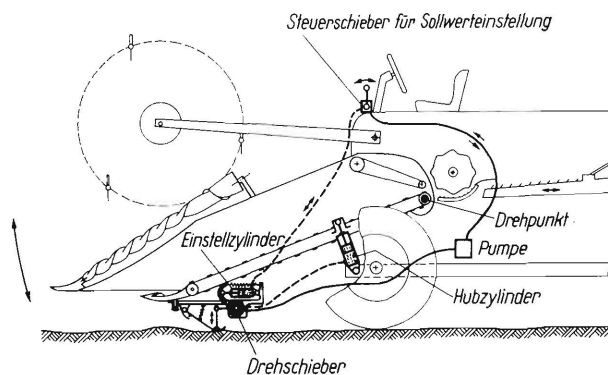


Bild 2. Schema einer möglichen Höhenregelung am Mähdrescher (Schneidwerk usw.).

Die oben genannten Beispiele lösen im Grunde die gleiche Aufgabe, nämlich die selbsttätige Einstellung einer Höhe. Eine weitere große Gruppe umschließt die selbsttätige Regelung einer Länge quer zur Fahrtrichtung in einer horizontalen Ebene. Hierher gehört z. B. die Führung von Rodeelementen an Zuckerrüben- oder Kartoffelerntemaschinen, von Hack- und Häufel-

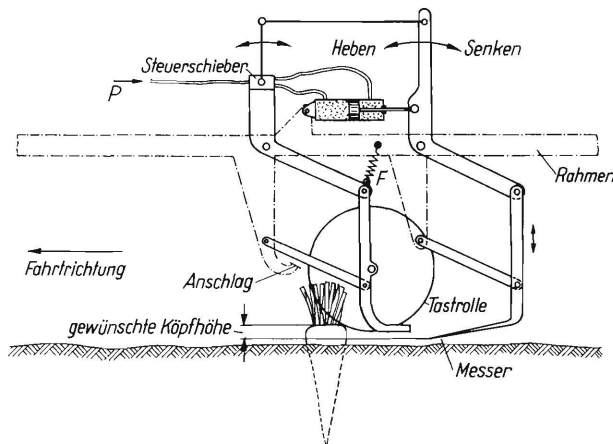


Bild 3. Mögliche selbsttätige Regelung der gewünschten Köpfhöhe von Rüben.

elementen, von Aufnahmeverrichtungen bei Reis- oder Baumwollerntemaschinen oder auch die Führung eines Schleppers in der Pflugfurche, die seither von Hand erfolgt. Die Nachführung an Leitlinien, wie Pflanzenreihen, Furche usw., läßt sich selbsttätig durchführen; eine mögliche Anordnung zeigt **Bild 4**. Bei dieser Anordnung bewegen sich z. B. Kartoffelrodeschare, Hackmesser oder Rübenrodeschare relativ zum Fahrgestell. Es gibt jedoch auch Anordnungen, bei denen die Arbeitselemente fest mit dem Gestell verbunden sind und die Nachführung über achsschenkelgelenkte Räder erfolgt.

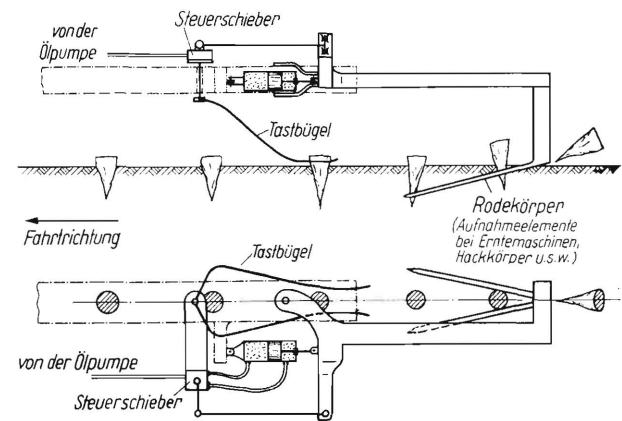


Bild 4. Mögliche Anordnung zur selbsttätigen Nachführung von Rode- oder anderen Aufnahmeelementen.

In dieses Gebiet der Nachführung fällt auch die von Schleppern längs einer Pflugfurche oder einer Pflanzenreihe, beispielsweise mit Hilfe einer Ausrüstung, wie sie in **Bild 5** dargestellt ist [3].

Mit den bisherigen, stichprobenartig ausgewählten Beispielen ist eine Reglergruppe gekennzeichnet, bei der die Regelgröße eine „Länge“ ist. Die gezeigten Anordnungen unterscheiden sich zwar hinsichtlich der Aufgabenstellung, aber nicht in der prinzipiellen Wirkungsweise.

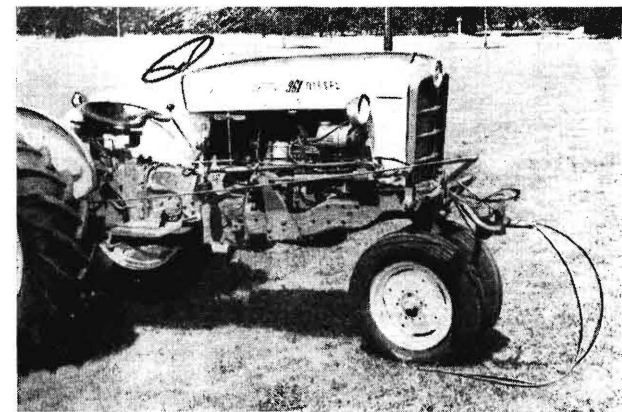


Bild 5. Schlepper mit Tastelement von Ford zur selbsttätigen Nachführung längs einer Pflugfurche oder Pflanzenreihe.

Eine andere Regelgröße ist die Leistung. Als Beispiel wählen wir den selbstfahrenden Mähdrescher, bei dem im Betrieb die Fahrgeschwindigkeit von Hand so eingestellt wird, daß die installierte Motorleistung möglichst voll abgenommen wird. Trotz Hilfsvorrichtungen, z. B. geeignete Anzeigergeräte, ist dies jedoch nur begrenzt möglich, weil eine dauernde Nachregelung von Hand zu anstrengend ist und die Aufmerksamkeit des Fahrers von anderen Aufgaben ablenkt. Hier bietet sich die selbsttätige Regelung an. Dies ist z. B. derart denkbar, daß an der Welle des Antriebsmotors eine Leistungsmessung vorgenommen wird und über die so erhaltene Größe die Fahrgeschwindigkeit und damit die zugeführte Getreidemenge so verstellt wird, daß der Antriebsmotor optimal ausgelastet ist. Dies ist der Fall der Leistungsregelung über die Fahrgeschwindigkeit bei vorgegebener Antriebsleistung eines Schleppers oder selbstfahrender Geräte [4].

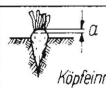
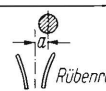
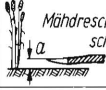
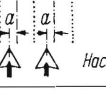
Regelgröße	Länge		Leistung
	Höhe	Seite	
Beispiele			z.B. auf konstante Leistung durch Änderung der Fahrgeschwindigkeit (oder umgekehrt)
			
			bei Mähdreschern, Schleppern, Geräteträgern u.a.
	Festwertregelung $a = \text{Sollwert}$	Folgeregelung $a = \text{Istwert}$	

Bild 6. Zusammenstellung einiger Regelaufgaben für fahrbare Landmaschinen.

Schon diese unvollständige Aufzählung ergibt eine gewisse Systematik in der regeltechnischen Aufgabenstellung, **Bild 6**. Im Bereich der fahrbaren Landmaschinen sind im wesentlichen drei Regelgrößen zu erwarten, die Länge, die Leistung und die Geschwindigkeit.

Der Regelkreis

Die Grundbegriffe der Regelungstechnik sind genormt [5]. Unter Regelung versteht man einen geschlossenen selbsttätigen Wirkungsablauf in einem aus Regelstrecke, Meßfühler, Regler und Stellglied bestehenden Regelkreis, **Bild 7**. Der Meßfühler liefert den Ist-Wert der Regelgröße an den Regler. Dieser beeinflußt die Stellgröße nach einem vorgegebenen Soll-Wert, der fest eingestellt oder auch mit der Zeit veränderlich sein kann oder, wie z. B. bei der Folgeregelung, von einer sogenannten Führungsgröße abhängt. Diese Führungsgröße kann z. B. eine Leitlinie, wie die Pflanzenreihe o. ä., sein.

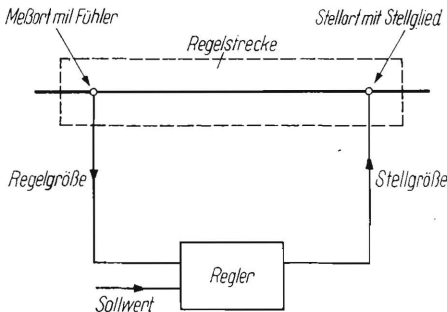


Bild 7. Der Regelkreis wird gebildet aus Regelstrecke, Regelgröße, Regler und Stellgröße, die an dem Wirkungsablauf der Regelung teilnehmen.

Wenden wir diese Begriffe auf die bisher genannten Beispiele an. In **Bild 1** ist das Tastradpaar der Meßort, der die Regelgröße liefert. Der Soll-Wert wird durch das Handrad 1 vorgegeben, während der Regler durch das Steuerventil gebildet wird. Dieses Steuerventil liefert eine Stellgröße in den Kraftheber, der in Verbindung mit dem Pflug Stellort und Stellglied bildet. In **Bild 4** ist der Tastbügel der Meßort mit Fühler. Der Soll-Wert wird durch die Leitlinie (Rüben-, Kartoffel-, Pflanzenreihe) gegeben. Regler ist der Steuerschieber, während das Stellglied aus der hydraulischen Anordnung mit dem drehbar aufgehängten Hebel besteht, an dem die Aufnahmeelemente, z. B. Rodeschare, befestigt sind. Das Stellglied kann auch, wie schon erwähnt, aus einem Hydraulikzylinder und achsschenkelgelenkten Rädern oder anderen kinematischen Anordnungen bestehen.

Bei den Reglern unterscheiden wir Zweipunkt- bzw. Dreipunktregler und stetige Regler. Beim Zweipunktregler wird die Stellgröße auf den einen oder den anderen Wert eingestellt, z. B. „ein“ oder „aus“, der Dreipunktregler hat drei Schaltstellungen, z. B. rechts, null und links. Beim stetigen Regler kann die Stellgröße

innerhalb des Stellbereiches jeden Wert annehmen. Die Änderung kann dabei zügig oder auch in Schritten erfolgen. Hinsichtlich ihres Zeitverhaltens werden die stetigen Regler in folgende Hauptgruppen eingeteilt: proportional wirkende Regler (P-Regler), integral wirkende Regler (I-Regler), proportional-integral wirkende Regler (PI-Regler) und Regler mit differenzierend wirkendem Einfluß (PD-, ID- und PID-Regler) [5].

Ein wichtiges Kennzeichen für das Zeitverhalten der Regler ist die Übergangsfunktion. Hierunter versteht man den zeitlichen Verlauf der Stellgröße, wenn man die Eingangsgröße des von der Regelstrecke abgetrennten Reglers sprunghaft ändert.

Über die Regler als solche sollen keine Erörterungen angestellt werden, da hierüber hinreichend Unterlagen in der Literatur vorhanden sind [6]. Für den Bereich der Landmaschinen interessieren im wesentlichen das Zeitverhalten der gesamten Anordnung in Abhängigkeit von der Bauart der Meßfühler und der Bauart des Stellgliedes und deren Kinematik (auch Schleppkurven).

Da es hierüber noch keine Unterlagen gibt, die selbsttätige Regelung aber im Bereich der Landtechnik bereits Interesse findet und in Zukunft sicher eine hervorragende Bedeutung erlangen wird, scheint es ratsam zu sein, diese Unterlagen zu erarbeiten.

Aufgabenstellung

Um die für den konstruktiven Aufbau von Regelkreisen erforderlichen, noch unbekannten Unterlagen für verschiedene Aufgaben im Bereich der Landtechnik erarbeiten zu können, ist folgender Versuchsplan vorgesehen:

1. Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten der Regelung im Bereich der Landtechnik
2. Untersuchungen der Regelkreise, insbesondere im Hinblick auf das Zeitverhalten; Parameter sind: Art des Reglers (Dreipunkt, stetig) und Art der Regelstrecke (Fühler, Stellglied).

Die zu erstellenden Versuchsapparaturen sollen nach Möglichkeit sehr viele Einflußfaktoren (Parameter) erfassen. Oben wurde festgestellt, daß man Höhen- und Seitenregelung (Nachführung) zusammenfassen kann. Aus diesem Grunde wurde zuerst die in **Bild 8** schematisch dargestellte Versuchsanordnung für die Nachführung von Aufnahmeelementen, Werkzeugen u. ä. längs einer Leitlinie aufgebaut. An diesem Versuchsanhänger lassen sich verschiedene kinematische Anordnungen ausführen, z.B. Relativbewegungen der Aufnahmeelemente gegenüber dem Fahrgestell oder Relativbewegungen des Fahrgestells mit den fest angebauten Aufnahmeelementen gegenüber der Leitlinie durch Achsschenkelenkung. Ferner lassen sich verschiedene Meßfühler und Stellglieder (mechanisch, hydraulisch usw.) ausführen. Eine weitere Versuchsanordnung umfaßt die Leistungsregelung, die am Beispiel eines Mähdreschers untersucht wird.

Erklärung der Zahlenhinweise in Bild 9

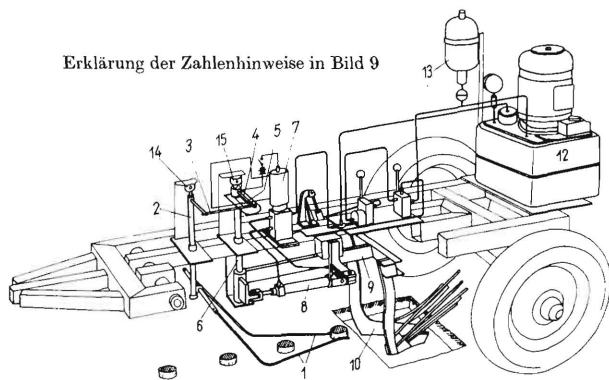


Bild 8. Versuchseinrichtung mit der elektro-hydraulischen Dreipunkt-Regelungsanlage zur selbsttätigen Nachführung eines Rodekörpers mittels Hebelverstellung.

Der Meßfühler muß dem jeweiligen Zweck angepaßt sein; seine Ausbildung hängt meist von einer Vielzahl von Einflußgrößen ab und wirft besonders zu untersuchende Probleme auf. Für die Meßfühler kommen verschiedenartige Systeme in Frage, so z. B. mechanische, optische, elektrische, akustische, thermodynamische

und auch kombinierte Systeme. Als Regelgeräte werden mit Rücksicht auf den Betrieb auf der Landmaschine hauptsächlich hydraulische, ferner elektrische und pneumatische Geräte eingesetzt.

Wegen der Fülle der Aufgaben ergibt sich ein komplexes Arbeitsgebiet, das im Institut von einem Team (Landtechniker, Kinematiker, Regelungstechniker, Meßtechniker) bearbeitet wird. Aus diesem Gesamtgebiet wird im folgenden über Versuche bei der Nachführung von Arbeitselementen mit Hilfe eines Dreipunktreglers berichtet¹⁾.

Das Beispiel einer Längenregelung

Versuchseinrichtung

Zu Beginn der Untersuchungen über die Nachführung von Werkzeugen auf fahrenden Landmaschinen wird ein einfaches kinematisches System zur Nachführung des Werkzeuges über einen Stellhebel gewählt, der sich relativ zum geradeaus fahrenden Maschinengestell bewegt. Ferner wird die Nachführung des an dem fahrbaren Gestell fest befestigten Werkzeuges über die Achsschenkelenkung untersucht. Als Werkzeug wurde ein Polderschar für Zuckerrüben mit seinen verhältnismäßig schwierigen Betriebsbedingungen in bezug auf Genauigkeit der Nachführung und auf die Kraftwirkungen am Werkzeug gewählt. Bei hartem Boden ist bekanntlich die Selbstführung des Rodeschares an der Rübe nicht möglich.

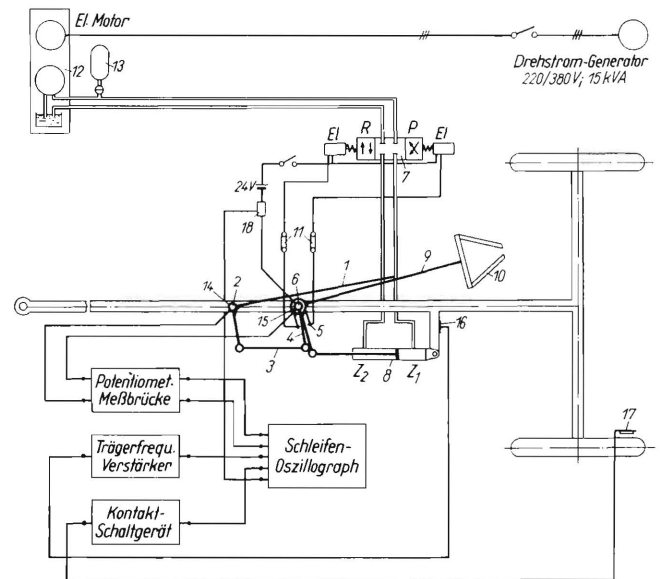


Bild 9. Geräteschema der elektrisch-hydraulischen Nachführungseinrichtung in Bild 8.

- 1 Tastfühler
- 2 Drehachse des Tastfühlers
- 3 Koppel
- 4 Kontakthebel, lose auf Achse 6
- 5 Steuerkontakte, fest auf Achse 6
- 6 Drehachse des Werkzeugstellhebels
- 7 elektromagnetischer Steuerschieber
- 8 hydraulischer Arbeitszylinder
- 9 Stellhebel des Werkzeuges
- 10 Rübenrodekörper
- 11 Endkontakt zur Begrenzung des Stellhebelausschlages
- 12 hydraulische Einheit
- 13 Hydraulik-Speicher
- 14 Meßgeber für den Winkelausschlag des Fühlers 1
- 15 Meßgeber für den Winkelausschlag des Stellhebels 9
- 16 Meßgeber für die Stellkraft
- 17 Radkontakt für die Messung der Fahrgeschwindigkeit
- 18 Stromteiler zur Registrierung des Stromes des elektromagnetischen Steuerschiebers

Die zunächst verwendete elektro-hydraulische Regelungsanlage arbeitet nach dem Prinzip der unstetigen Dreipunktregelung. Nach dem im **Bild 9** dargestellten Geräteschema wirkt die Nachführungsanlage mittels Hebelverstellung folgender-

¹⁾ Für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Untersuchungen sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft auch an dieser Stelle verbindlichst gedankt.

maßen: Mit dem mechanischen Tastfühler 1, der auf der Achse 2 drehbar gelagert ist, wird durch die momentane Abweichung α der Führungslinie (Rübenreihe) von der Bezugslinie des Systems (Mittelachse des Gestelles) der Fühler um den Winkel α als Führungsgröße gedreht. Durch den Fühler wird über die Koppel 3 der Kontakthebel 4 um die Drehachse 6 des Stellhebels gedreht, wobei der Kontakthebel 4 die Steuerkontakte 5 in Mikroschaltern schaltet.

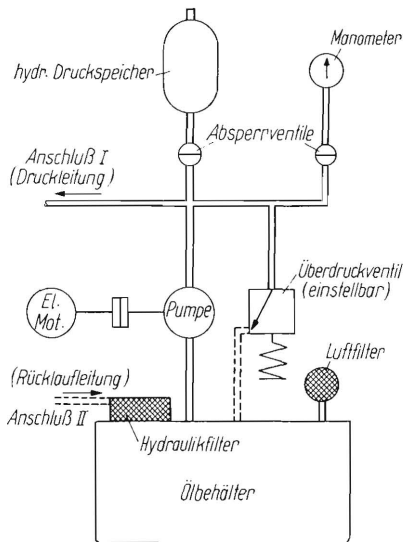


Bild 10. Schaltschema der Hydraulikeinheit.

Der magnet-betätigte Vierwege-Steuerschieber 7, der durch die Kontakte 5 nach rechts oder links betätigt wird, beaufschlagt bei dem hydraulischen Arbeitszylinder 8 entweder die Zylinderseite Z_1 oder Z_2 . Der Zylinderkolben dreht den Stellhebel 9 um die Regelgröße β und verschiebt damit den Rübenrodekörper 10 in die (durch a vorgegebene) Lage b gegenüber der Mittelachse des Gestells. Die feste Verbindung der Kontakte 5 mit der Stellhebeldrehachse 6 wirkt als Rückführung. Mit Hilfe der Endschalter 11 wird ein Überspringen des Stellgliedes vermieden. Die hydraulische Einheit 12 versorgt die Anlage mit Drucköl. Sie kann entweder mit oder ohne Speicher 13 betrieben werden. Die Schaltung der Hydraulik-Einheit ist in Bild 10 schematisch dargestellt. Mit dem Überdruckventil sind beliebige Drücke zwischen 20 und 120 atü einstellbar. Da die Längen von Meßfühler und Stellhebel gleich groß gewählt wurden, sind bei gleichen Auslenkungen der Hebelenden die Auslenkungswinkel ebenfalls gleich groß.

Für die meßtechnische Erfassung der Fühler- und Stellhebelbewegung gegenüber dem Fahrgestell werden gemäß Bild 9 der Fühlerwinkel α und der Stellhebelwinkel β mit den Präzisionsdrehwiderständen 14 und 15 als Winkelmeßgeber über eine Zweikanal-Potentiometer-Meßbrücke gemessen.

Die Stellkraft wird mit dem Kraftmeßgeber 16 (Dehnungsmeßstreifen in einer Halbbrücke auf einem einseitig eingespannten Biegestab) über einen Trägerfrequenzverstärker registriert. Die Fahrgeschwindigkeit bei den Versuchen wird mit Hilfe des Radkontaktes 17 über das Kontaktschaltgerät markiert. Der am Stromteiler 18 gemessene Strom ergibt die Ein- und Ausschaltunkte des magnetbetätigten Steuerschiebers. Der zeitliche Verlauf aller genannten Meßgrößen wird mit einem Schleifenoszillographen registriert.

Das Geräteschema der Regulationsanlage für die selbsttätige Nachführung des Werkzeuges über die Achsschenkellenkung des Fahrgestelles zeigt Bild 11. Die elektro-hydraulische Regulationsanlage arbeitet ähnlich wie die bereits beschriebene Anlage nach Bild 9. Der Arbeitszylinder verstellt jedoch hier die Achsschenkel der Räder des Versuchsgestelles. Da hierbei der Nachführungsvorgang nicht mehr nur als Relativbewegung gegenüber dem fahrenden Gestell erfaßt werden konnte, wurde zusätzlich die Bewegung des Fühlerendes sowie des Werkzeuges gegenüber einer geradeaus laufenden Bezugsschiene gemessen.

Das aus dem Geräteschema abgeleitete Blockschaltbild für den Nachlaufregelkreis der untersuchten beiden Anlagen ist in Bild 12 dargestellt. Während der Fahrt des Versuchsanhängers wird die momentane Abweichung α der Führungslinie (z. B. Rübenreihe) von dem Bezugssystem (Versuchsgerät) über den Tastfühlerwinkel α als Führungsgröße gemessen. Diese Führungsgröße α wird mit der Regelgröße β , die der Abweichung b des Werkzeuges gegenüber dem Bezugssystem proportional ist und über die starre Rückführung zur Vergleichseinrichtung geführt wird, in Vergleich gesetzt. Der Unterschied dieser beiden Größen ist die Regelabweichung $\Delta\beta$, die über den Verstärker und den Stellmotor das Stellglied (z. B. Hebelverstellung oder Achsschenkellenkung) so lange verstellt, bis das Werkzeug im richtigen Zeitpunkt in die durch die Führungsgröße vorgegebene Lage kommt.

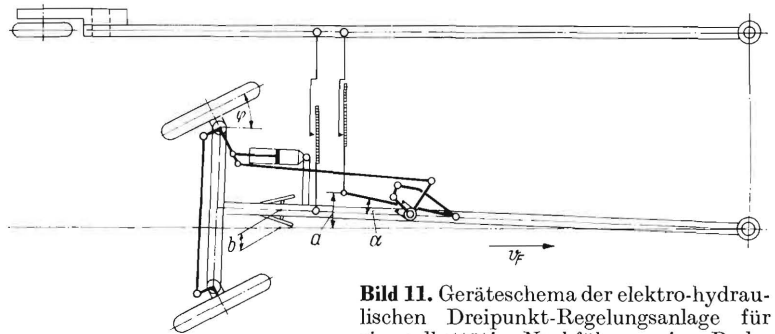


Bild 11. Geräteschema der elektro-hydraulischen Dreipunkt-Regelungsanlage für eine selbsttätige Nachführung eines Rodekörpers mittels Achsschenkellenkung.

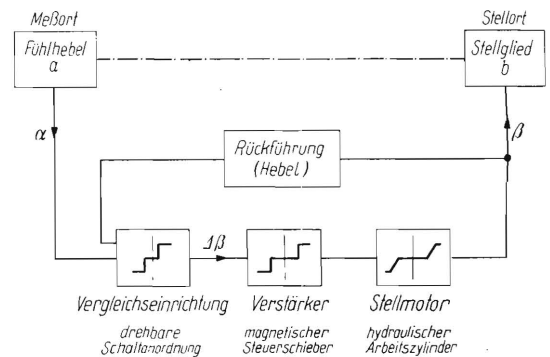


Bild 12. Blockschaltbild des Nachlaufregelkreises der untersuchten beiden Versuchsanlagen.

Stellglied = Stellhebel des Werkzeuges oder Achsschenkellenkung des Fahrgestelles

Der Dreipunktschalter in der Vergleichseinrichtung mit seinem Totbereich steuert über den elektro-hydraulischen Steuerschieber den hydraulischen Arbeitszylinder mit Integralverhalten, der seinerseits das Stellglied verstellt. Bei richtiger Auslegung zeigt der Regler ein stabiles Verhalten.

Eine Situationsaufnahme der gesamten Versuchseinrichtung bei einem Feldversuch zeigt Bild 13. Der Schlepper zieht den Meßanhänger mit der aufgebauten Regulationsanlage und einen besonderen Anhänger mit dem Elektromaschinensatz für die Stromversorgung. Die Geber der Versuchseinrichtung sind über lange Meßkabel mit den elektronischen Meßgeräten im Meßwagen (VW-Bus) verbunden.

Versuchsergebnisse

Nachführungsvorgang längs einer Rübenreihe

Als Beispiel für die selbsttätige Nachführung eines landwirtschaftlichen Werkzeuges längs einer Führungslinie soll die Nachführung eines Rübenrodeschares längs einer Rübenreihe behandelt werden. Die angenommenen örtlichen Verhältnisse für die Nachführung mittels Hebelverstellung entsprechen einer sinusförmigen Abweichung der Rübenreihe gegenüber dem geradeaus fahrenden Bezugssystem nach Bild 14. Bei einer Betrachtung des Nachführungsvorganges besteht etwa folgender näherungsweise linearisierter Zusammenhang: Die Fühlerhebellänge und die

Stellhebellänge sind mit $l = 85$ cm gleich groß. Der Abstand zwischen den Achsen von Fühlerhebel und Stellhebel und damit auch zwischen deren Endpunkten entspricht etwa dem Rübenabstand von 30 cm. In dem in Bild 14 dargestellten Augenblick befindet sich das Fühlerende bei der Rübe A und der Rodekörper bei der Rübe B. Das Versuchsgerät bewegt sich in Richtung seiner Mittellinie (Bezugslinie) in der Richtung des Weges s mit der Fahrgeschwindigkeit v_F .

Die Regelabweichung ist $\Delta\beta = \beta - \alpha$, wenn die Führungsgröße α in Einheiten der Regelgröße β (hier z. B. in Winkelgraden) ausgedrückt wird. Da für kleine Winkel näherungsweise $\alpha = l\alpha$ und $\beta = l\beta$ (mit α und β in Bogengraden) ist, ergibt sich die seitliche Abweichung der Rübe A von der Rübe B zu $\Delta b = b - a = l(\beta - \alpha)$. Wenn nun Δs der Abstand zwischen Tastfühler und Rodekörper bzw. der Mindestabstand zwischen zwei Rüben in der Reihe ist und Δt die Zeit, in der diese Strecke von dem Versuchsgerät bei der Fahrgeschwindigkeit v_F zurückgelegt wird, dann müßte bei gleichbleibendem Wert von α die Abweichung Δb mindestens in dem Zeitintervall $\Delta t = \Delta s/v_F$ durchlaufen werden bzw. müßte die seitliche Stellgeschwindigkeit des Werkzeuges mindestens $v_b = \Delta b/\Delta t$ betragen. Beispielsweise ergibt sich für einen Fahrweg von $\Delta s = 30$ cm und eine Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,75$ m/s die Gesamtzeit $\Delta t = 0,4$ s. Für eine Abweichung von $\Delta b = 5$ cm wäre in diesem Falle eine Mindeststellgeschwindigkeit von $v_b = 0,05/0,4 = 0,125$ m/s erforderlich.

In der Versuchseinrichtung sind maximale Stellwinkel von $\beta = 10$ bis 12° (je nach Stellung der Endschalter) vorgesehen. Damit ergeben sich näherungsweise die größtmöglichen Werkzeugverschiebungen zu $b = l\beta\pi/180 = 15$ bis 18 cm. Dies ist für die Nachführung eines Rodekörpers längs der Rübenreihen mit einem Reihenabstand von 40 bis 50 cm (meistens 41,7 cm) ausreichend. Der Totbereich des Fühlerwinkels in der Vergleichseinrichtung beträgt etwa $\pm 1^\circ$. Daraus ergibt sich eine Nachführungsunsicherheit von etwa $\pm 1,5$ cm. Durch Messungen werden nun im Feldversuch die Zusammenhänge zwischen der Rübenabweichung, Fahrgeschwindigkeit, Stellgeschwindigkeit und hydraulischem Druck untersucht²⁾.

Oszillogramme von Nachlaufkurven

Bei der gleichzeitigen Registrierung der zeitlich veränderlichen Winkel α und β in einem Oszillogramm ist der registrierte Verlauf dieser beiden Größen infolge des Nachführungsvorganges phasenverschoben. Im Prinzip ergibt sich z. B. bei sinusförmigem Verlauf der Größen β und α ein Oszillogramm nach Bild 15. Die α -Kurve des Fühlers eilt der β -Kurve des Stellhebels vor.

Unter der Voraussetzung der bereits oben angewendeten vereinfachten Beziehungen läßt sich die zeitliche Nacheilung der Werte von β gegenüber α berechnen zu $\Delta t = \Delta s/v_F$, wenn für eine gegebene Rübenabweichung Δb die Stellgeschwindigkeit $v_b = \Delta b/\Delta t$ ist. Als Beispiel hierfür ergibt sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 0,75$ m/s eine zeitliche Nacheilung von $\Delta t = 0,3/0,75$ s = 0,4 s; bei einer Rübenabweichung von $\Delta b = 8$ cm ist dann die Stellgeschwindigkeit $v_b = 0,08/0,4 = 0,2$ m/s.

Bild 16 zeigt ein Oszillogramm, das während eines Nachführungsversuches mittels Stellhebel an einer etwa sinusförmig verlaufenden Rübenreihe mit einer maximalen Abweichung von der theoretischen Mittellinie von $b_{\max} = \pm 10$ cm bei einer Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,73$ m/s aufgenommen wurde. Die Periode der sinusförmigen Rübenreihe betrug etwa 2,4 m. In diesem Oszillogramm sind die Winkel α und β , die Stellkraft P_H am Stellzylinder, der Strom J durch die Magnetspule des Steuerschiebers, ein Kontakt zur Markierung der Fahrgeschwindigkeit und die Zeit registriert.

Die Phasenverschiebung zwischen den Winkelkurven α und β ist gut zu erkennen. Die kleinen Stufen im Winkelverlauf rühren z. T. von den Winkelmeßgebern her, deren Winkelauflösung um etwa $0,5^\circ$ liegt und für die vorliegenden Zwecke noch zu grob ist. Die größeren Schwankungen in der Kurve für den Winkel α sind wahrscheinlich durch die Fühlerabtastung bedingt, denn ihre



Bild 13. Die gesamte Versuchseinrichtung während eines Feldversuches.

Periode entspricht der des Rübenabstandes. Diese Beobachtungen zeigen, daß der Tastfühler zur Abtastung der Rübenreihen noch verbessert werden muß.

Bild 16 läßt allgemein erkennen, daß die Winkel α und β in ihrem zeitlichen Verlauf ungefähr, in der Amplitude jedoch mit der erwarteten Sicherheit von etwa $\pm 1,5$ cm übereinstimmen. Die Güte des zeitlichen Verlaufes der Nachführung muß noch durch besondere Untersuchungen analysiert werden. Zwischen der Fühlerbewegung $\alpha(t)$ und der Werkzeugbewegung $\beta(t)$ bestehen sehr verwickelte Zusammenhänge. Der Nachführungsvorgang wird in Wirklichkeit durch Totzeiten im Regler, durch Nichtlinearitäten, durch die Fühlerbewegung beim Abtasten der Rüben usw. beeinflusst.

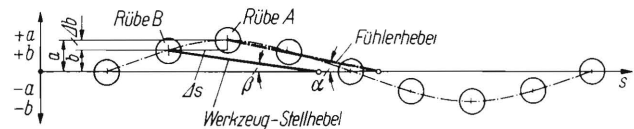


Bild 14. Die örtlichen Verhältnisse bei der Nachführung längs einer Rübenreihe.



Bild 15. Prinzipieller zeitlicher Verlauf des Fühlerwinkels α und des Stellgliedwinkels β .

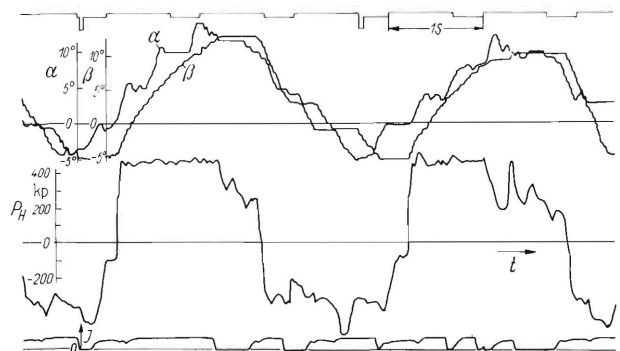


Bild 16. Zeitlicher Verlauf der Meßgrößen (nach Oszillogramm) bei einem Nachführungsversuch mit Hebelverstellung des Werkzeuges.

Öldruck $p = 50$ atü (ohne Speicher) Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,72$ m/s

Ein entsprechendes Oszillogramm für einen Nachführungsvorgang mittels Achsschenkelenkung zeigt Bild 17. Hierin sind die Winkel α und φ , die Verschiebungen a und b des Fühlerhebels bzw. eines Punktes am Gestell (s. Bild 11), ein Kontakt zur Markierung der Fahrgeschwindigkeit und die Zeit registriert. Es ergeben sich wieder ähnliche Verhältnisse wie bei der Nach-

²⁾ Bei den Messungen und Auswertungen wirkten besonders die Herren H.-D. Wiemann und F. Wiemann mit.

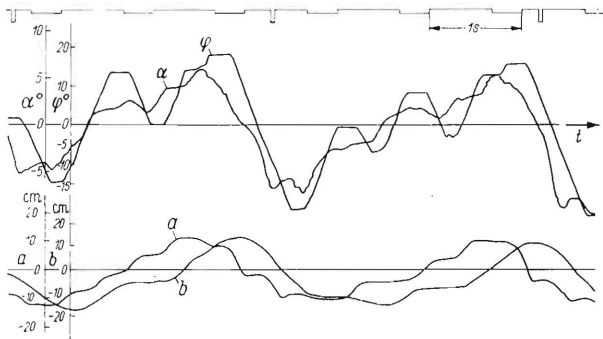


Bild 17. Zeitlicher Verlauf der Meßgrößen (nach Oszillogramm) bei einem Nachführungsversuch mit Achsschenkellenkung.
Öldruck $p = 30$ atü Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,72$ m/s

führung mit Hebelverstellung. Die Vorgänge müssen jedoch noch vor allem über Schleppkurven des rädergelenkten Versuchsanhängers usw. näher untersucht werden.

Zahlenmäßige Unterlagen für die richtige Bemessung des Regelkreises von Nachlaufreglern erhält man einfacher durch die experimentelle Aufnahme der Übergangsfunktion von vorhandenen Regelungsanlagen, die nachfolgend näher beschrieben werden.

Übergangsfunktionen

Durch die Übergangsfunktion erhält man einen guten Einblick in den Regelungsvorgang. Sie gibt vor allem über das zeitliche Verhalten des Stellgliedes und damit über die Werte der Stellgeschwindigkeiten, der Totzeiten und über die nötigen Stellkräfte Auskunft.

Für die Erklärung der Übergangsfunktion ist es wichtig, Begriffsbestimmungen festzulegen. **Bild 18** zeigt eine Übergangsfunktion des elektrohydraulischen Nachlaufreglers mit zwangsläufiger Hebelverstellung mit den eingetragenen Begriffen. In diesem Bild ist der zeitliche Verlauf des Fühlerwinkels α , des Stellgliedwinkels β , der Stellkraft P , des magnetischen Steuergerätsstromes J sowie der Zeitmarkierung T dargestellt. Der Regelungsvorgang beginnt mit der Fühlerverstellung. Aus den eingetragenen Begriffen erkennt man z. B., daß sich die Stelltotzeit annähernd aus der Summe der Fühlertotzeit, bedingt durch den Totwinkel des Fühlers, und der Stellkrafttotzeit infolge der Verzögerung im magnetisch betätigten Steuerschieber zusammensetzt.

Bei den Versuchen zur Ermittlung der Übergangsfunktion wurde der Fühler möglichst sprunghaft um etwa 10° bewegt.

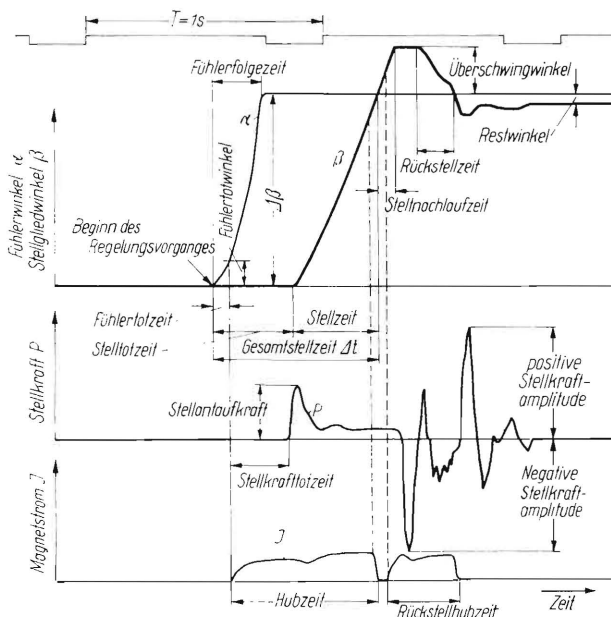


Bild 18. Übergangsfunktion eines elektro-hydraulischen Nachlaufreglers mit Begriffsbezeichnungen.

Nach der Fühlertotzeit schaltet der Magnetsteuerschieber ein; nach dem Ablauf der Stellkrafttotzeit verstellt der hydraulische Arbeitszylinder das Stellglied etwa linear. Der Stellgliedwinkel β schwingt eventuell über, der Regler schaltet dann rückwärts und gelegentlich noch einmal vorwärts, bis das Stellglied bei einem Winkel β , der ungefähr gleich dem Fühlerwinkel α ist, stehen bleibt. Die negative und positive Stellkraftamplitude am Ende der Verstell- und der Rückstellbewegung hängen wahrscheinlich mit den Verzögerungskräften des Stellgliedes, die auf den Öldruck wirken, zusammen.

Wenn bei der Bewegung des Werkzeuges in der Luft bei zu kleinem Fühlertotwinkel oder zu großer Verstellgeschwindigkeit ein stationärer Schwingungszustand, d. h. eine Instabilität des Reglers auftritt, so kann bei gleicher Reglereinstellung bei einem Nachführungsvorgang im Boden der Regler stabil werden. Durch die Dämpfung des Bodens wird die Stabilität meist durch Verkleinerung der Stellgeschwindigkeit verbessert, aber die Nachführung wird träge.

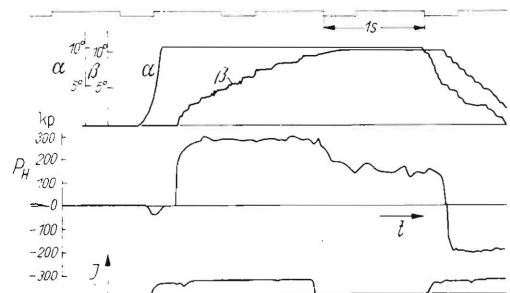


Bild 19. Übergangsfunktion bei der Nachführung eines Werkzeuges im Boden.

Öldruck $p = 30$ atü Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,4$ m/s

Bild 19 zeigt das Oszillogramm einer Übergangsfunktion, die bei Nachführung eines Werkzeuges im Boden aufgenommen ist. Aus solchen Oszillogrammen wurde die Stellgeschwindigkeit

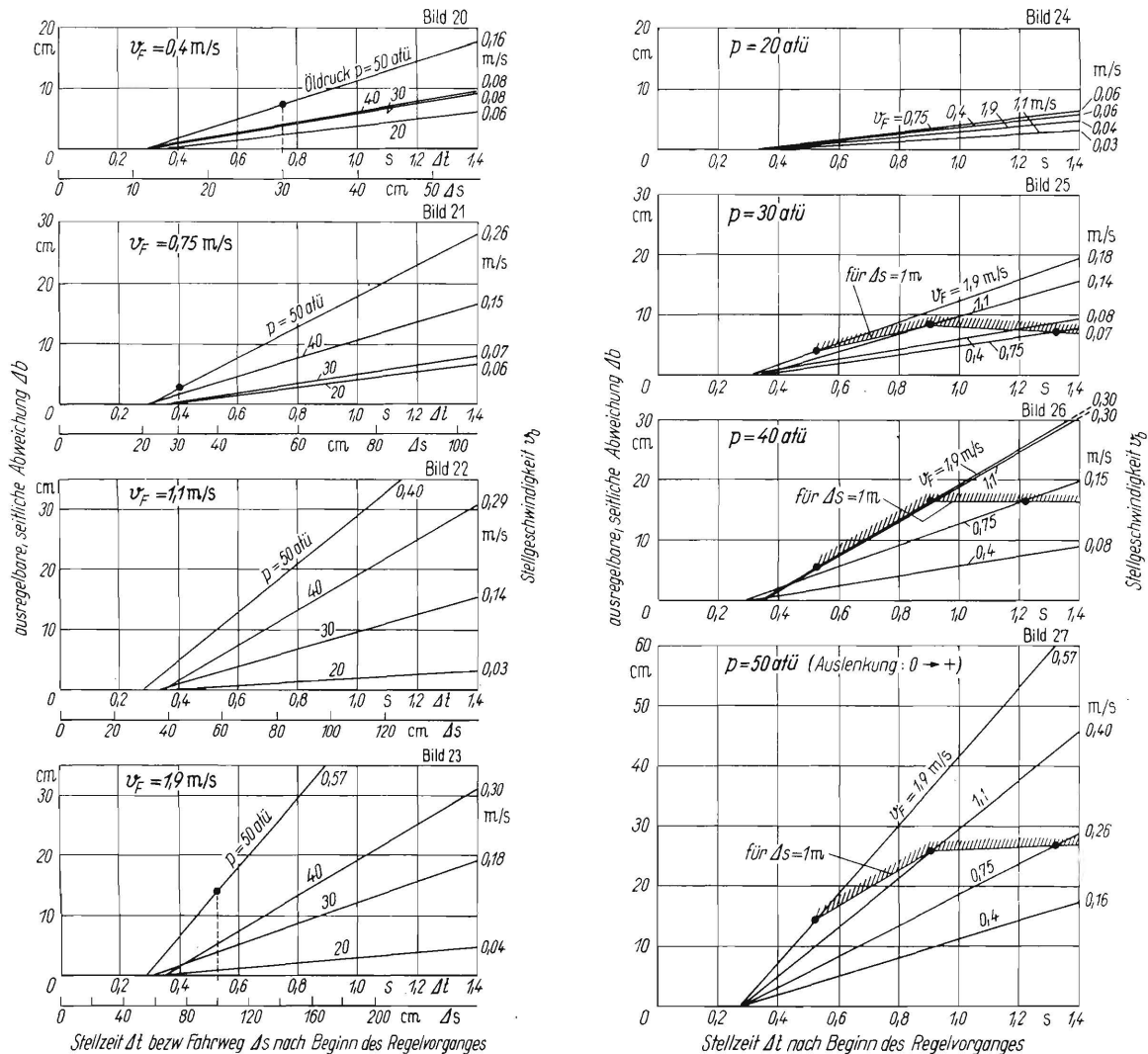
$$v_b = \frac{db}{dt} = \frac{\pi l}{180} \frac{d\beta}{dt} \quad \text{entnommen.}$$

Größe der Stellgeschwindigkeit

Aus den Übergangsfunktionen, die bei der Werkzeugverstellung im Boden unter verschiedenen Betriebsbedingungen, z. B. bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, bei verschiedenem Ölbetriebsdruck der hydraulischen Anlage ohne oder mit Speicher usw., aufgenommen wurden, sind vor allem die Stellgeschwindigkeit, die Stelltotzeit und die Stellkraft ermittelt worden. Um eine Übersicht über die Ergebnisse zu bekommen, ist in den folgenden Diagrammen die Werkzeugverschiebung Δb in Abhängigkeit von der Zeit auf Grund von Mittelwerten, die den Oszillogrammen der Übergangsfunktion entnommen sind, idealisiert wiedergegeben. Die Fühlertotzeit (s. Bild 18) beträgt bei den Versuchen im allgemeinen weniger als etwa 10% der Stelltotzeit und kann somit vernachlässigt werden. Es erscheint nicht notwendig, die Verzögerung zwischen dem Beginn der Kraftwirkung und der Verstellung näher zu behandeln, weil die Stellkrafttotzeit von der Stelltotzeit ebenfalls um weniger als 10% abweicht.

Die **Bilder 20 bis 23** zeigen die idealisierten Übergangsfunktionen Δb über der Zeit Δt für vier verschiedene Fahrgeschwindigkeiten zwischen 0,4 und 1,9 m/s. Parameter ist dabei der Ölbetriebsdruck $p = 20; 30; 40$ und 50 atü. Die Verstellung des Rodekörpers erfolgte bei diesen Versuchen durch Z_1 in Richtung $+b$. Die auf der Abszissenachse aufgetragene Zeit Δt stellt die seit Beginn des Regelungsvorganges abgelaufene Zeit dar. Der zweite Abszissenmaßstab für Δs bedeutet den dabei zurückgelegten Fahrweg. Mit Hilfe dieses Maßstabes für Δs kann man aus den Diagrammen ablesen, auf welcher Wegbasis ein Fühlerkommando im voraus gegeben werden muß, um bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit und bei einem bestimmten Ölbetriebsdruck eine gewünschte Abweichung Δb auszuregeln.

Nach Bild 20 und 21 können z. B. mit der untersuchten Anlage bei vorgegebenen kurzen Rübenabständen von $\Delta s = 30$ cm, bei



Bilder 20 bis 27. Idealisierte Übergangsfunktionen der Werkzeugnachführung im Boden mittels Hebelverstellung bei Druckrichtung Z_1 ohne Speicher. Ausregelbare Abweichung Δb in Abhängigkeit von der Zeit nach Beginn des Regelvorganges für vier verschiedene Fahrgeschwindigkeiten v_F und vier verschiedene Ölbetriebsdrücke p .

einem Öldruck $p = 50 \text{ atü}$ und einer Fahrgeschwindigkeit $v_F = 0,4 \text{ m/s}$ Rübenabweichungen bis etwa $\Delta b = \pm 7 \text{ cm}$, und bei $v_F = 0,75 \text{ m/s}$ nur noch bis $\Delta b = \pm 3 \text{ cm}$ ausgeregelt werden. Für eine Rübenköpfeinrichtung würde somit diese Regelungsanlage nicht schnell genug arbeiten, weil hierbei mit Abweichungen bis maximal etwa $\pm 10 \text{ cm}$ gerechnet werden muß. Für die Nachführung größerer Abweichungen über die kurze Wegbasis muß die Stellgeschwindigkeit erhöht und vor allem auch die Stelltotzeit verringert werden. Bei langsamer Änderung der Abweichung der Rüben von der Bezugslinie kann jedoch eine Ausregelung von etwa $\pm 15 \text{ cm}$ durchaus erfüllt werden. So ergibt sich nach Bild 23 bereits auf einer Wegbasis von 100 cm und bei einem Druck von 50 atü eine ausregelbare Abweichung von $\Delta b = \pm 14 \text{ cm}$, selbst bei der hohen Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 1,9 \text{ m/s}$.

Die bei der Nachführung mit Hebelverstellung im Boden gemessene Stellgeschwindigkeit v_b liegt etwa zwischen $0,05$ und $0,60 \text{ m/s}$. Die Stelltotzeit schwankt zwischen $0,28$ und $0,37 \text{ s}$. Bei der Nachführung des Werkzeuges im Leerlauf, d. h. in der Luft, beträgt die Stellgeschwindigkeit $v_b = 0,5$ bis $1,9 \text{ m/s}$. Eine Vorausberechnung der Stellgeschwindigkeit ist im vorliegenden Falle weder für die Bewegung des Werkzeuges in der Luft noch im Boden möglich, da die Ölfördermengen der hydraulischen Anlage bei den verschiedenen Ölbetriebsdrücken nicht genau bekannt sind. Für die Nennfördermenge der hydraulischen Pumpe von 20 l/min ergibt sich eine Stellgeschwindigkeit des Arbeitszylinderkolbens Z_1 von $v_b = 0,26 \text{ m/s}$. Unter Berücksichtigung eines Stellhebelübersetzungsverhältnisses von $i = 23:85 = 1:3,7$ würde die rechnerisch ermittelte Stellgeschwindigkeit des Werkzeuges $v_b = 0,96 \text{ m/s}$ betragen.

Die unter verschiedenen Bedingungen gemessenen Werte der Stellgeschwindigkeit liegen somit unter und über dem berechneten Wert. Dazu kommen noch Unterschiede der Stellgeschwindigkeit bei Betätigung des Stellhebels durch die Zylinderseite Z_1 oder Z_2 . Die gemessenen Stellgeschwindigkeitswerte für Z_1 sind etwas größer als für Z_2 . Ihr zahlenmäßiges Verhältnis entspricht aber nicht dem Verhältnis der beiden Kolbenflächen $F_1:F_2 = 12,6:9,4 = 1,34:1$, sondern ist im allgemeinen kleiner.

Bei der Nachführung im Boden wird die Stellgeschwindigkeit auch noch von der Ausgangslage des Werkzeuges beeinflusst. Je nachdem ob das Werkzeug von der Mittellage aus nach der Seite oder von der Endlage aus zur Mitte hin betätigt wird, wird die Stellgeschwindigkeit durch die dabei unterschiedlichen Seitenkräfte auf das Werkzeug verändert. Der Betrieb der hydraulischen Anlage mit Speicher hat im allgemeinen keinen besonders großen Einfluß auf die Stelltotzeiten, da diese hauptsächlich durch die davon nicht beeinflusste Verzögerung im magnetisch betätigten Steuergerät bedingt sind. Die Stellgeschwindigkeiten werden in dem untersuchten Bereich durch den Betrieb mit oder ohne Speicher nicht wesentlich verändert. Infolge der sich aus diesen aufgeführten Einflüssen ergebenden Unterschiede können die Stellgeschwindigkeitswerte von etwa -30 bis $+150\%$ gegenüber den Werten, die bei Betätigung des Stellhebels mittels Z_1 von der Mitte aus ohne Speicher ermittelt wurden, abweichen.

Auf Grund der vielen unbekannten Einflüsse ist es kaum möglich, die Stellgeschwindigkeit ausreichend genau im voraus zu berechnen. Sichere Werte für die zeitlichen Vorgänge in der Regelungsanlage erhält man nur durch Messungen.

Die **Bilder 24 bis 27** zeigen dieselben Ergebnisse in einer anderen Darstellung. Während man in den vorhergehenden Bildern gut die Zunahme der Stellgeschwindigkeit mit größer werdendem Ölbetriebsdruck erkennen kann, ist in den Bildern 24 bis 27 deutlich die Zunahme der Stellgeschwindigkeit v_b mit höherer Fahrgeschwindigkeit sichtbar. Für die Verhältnisse beim Betrieb der hydraulischen Anlage mit Speicher gelten wiederum ähnliche Verhältnisse. Begrenzt man in diesen Bildern die Δb , Δt -Linien für einen bestimmten Stellweg Δs ($= 1$ m) auf Grund der Funktion $\Delta t = \Delta s/v_b$, so ergibt sich für die untersuchte Anordnung die wichtige Erkenntnis, daß bei einem bestimmten Ölbetriebsdruck die ausregelbare seitliche Abweichung in einem weiten Fahrgeschwindigkeitsbereich (bis etwa $v_F = 1,5$ m/s) annähernd unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist. Bei einer bestimmten Wegvorgabe des Führerkommandos werden also vorhandene Abweichungen in der Rübenreihe unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit gleich gut ausgeregelt.

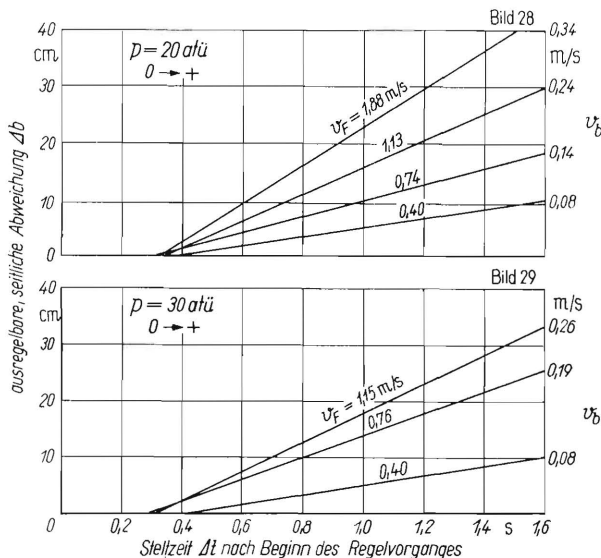


Bild 28 und 29. Idealierte Übergangsfunktionen der Werkzeugnachführung im Boden mittels Achsschenkellenkung bei Druckrichtung Z_2 ohne Speicher.

Bodenfeuchtigkeit in 1 bis 10 cm Tiefe 10%, Porenvolumen in 1 bis 5 cm Tiefe 41% und in 6 bis 10 cm Tiefe 36%

In **Bild 28 und 29** sind idealisierte Übergangsfunktionen für die untersuchten Verhältnisse bei der Nachführung mit Achsschenkellenkung dargestellt. Im Vergleich der Nachführung mit Hebelverstellung sind hier die Stellgeschwindigkeitswerte fast unabhängig vom Ölbetriebsdruck und entsprechen etwa den bei der Hebelverstellung für $p = 40$ atü erhaltenen Werten (**Bild 26**). Bei der Ausregelung von Abweichungen von der Seite gegen die Mitte vergrößern sich bei Achsschenkellenkung zwar meist im günstigen Sinne die Stellgeschwindigkeitswerte, aber auch im ungünstigen Sinne die Stelltotzeitwerte gegenüber den Werten nach **Bild 28 und 29**. Die Nachführung mit Hebelverstellung arbeitet somit teils träger, teils schneller als die Nachführung mit Achsschenkellenkung.

Größe der Stellkraft

Wichtig für den Entwurf einer Nachführungsanlage eines Rübenrodekörpers ist ferner die Kenntnis der Stellkraft. Die bei Nachführungsversuchen eines Polderschares mittels Hebelverstellung gemessenen Spitzenwerte der Stellkraft bei verschiedenem Ölbetriebsdruck ohne und mit Speicher in der hydraulischen Anlage sind in **Bild 30** dargestellt. Diese Werte gelten für die Stellkraft am Werkzeug, die aus den Meßwerten unter Berücksichtigung des Hebelverhältnisses $i = 23:85 = 1:3,7$ ermittelt worden sind. Die Stellkraftspitzen nehmen mit größer werdendem Ölbetriebsdruck zu und zeigen praktisch keine Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Beim Betrieb der hydraulischen Anlage mit Speicher sind die Werte jeweils etwa 20% größer als ohne Speicher.

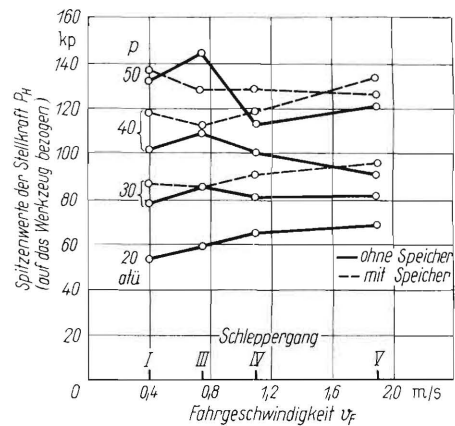


Bild 30. Die Spitzenwerte der Stellkraft P_H zur Nachführung des Werkzeuges mittels Hebelverstellung im Boden in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenem Ölbetriebsdruck p mit und ohne Speicher (für eine Auslenkung in Richtung Z_1).

Die Stellkraftspitzenwerte in den verschiedenen Stellbereichen von der Mitte oder vom Rande des Auslenkungsbereiches aus bei Verstellung durch den Zylinder Z_1 oder Z_2 bei einem Ölbetriebsdruck von 50 atü sind in **Bild 31** über der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. Die Spitzenwerte der Stellkraft P_H in Richtung Z_1 liegen bei etwa 130 kp, für Z_2 sind sie um etwa 30% kleiner. Diese Werte sind kaum von der Fahrgeschwindigkeit, vom Stellbereich und wie durch weitere Versuche festgestellt wurde, vom Betrieb ohne oder mit hydraulischem Speicher abhängig. Für die Ermittlung von Richtwerten genügt es somit, die Spitzenwerte der Stellkraft z. B. in der Stellrichtung Z_1 von der Mittellage aus für den gewählten Ölbetriebsdruck zu messen.

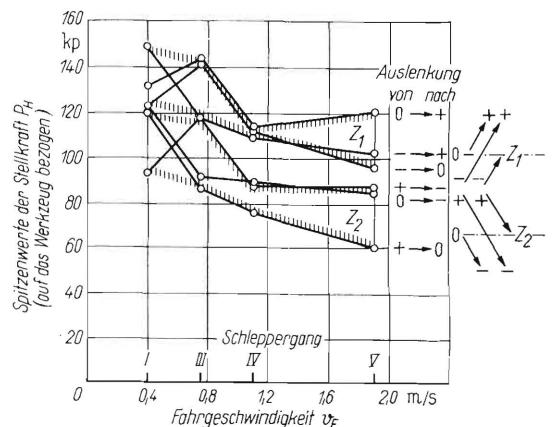


Bild 31. Die Spitzenwerte der Stellkraft P_H zur Nachführung des Werkzeuges mittels Hebelverstellung im Boden bei verschiedenen Druckrichtungen Z_1 und Z_2 bei konstantem Ölbetriebsdruck $p = 50$ atü ohne Speicher.

Bodenfeuchtigkeit in 1 bis 5 cm Tiefe 10%, in 6 bis 10 cm Tiefe 13%, Porenvolumen in 1 bis 5 cm Tiefe 42%, in 6 bis 10 cm Tiefe 35%

Der momentane Spitzenwert der Stelleistung $N_{Hmax} = P_{Hmax} \cdot v_b$ hängt vor allem von der Stellkraftamplitude und der Stellgeschwindigkeit beim gewählten Betriebsdruck ab. Mit $P_{Hmax} = 130$ kp (als mittlerer Wert) und $p = 50$ atü ergeben sich mit Hilfe der Stellgeschwindigkeiten für Z_1 aus **Bild 27** die in **Bild 32** als Beispiel gezeigten Werte der momentanen Spitzenverstelleistung für die elektrohydraulische Nachführungsanlage mit zwangsweiser Hebelverstellung des Polderschares.

In **Bild 33** sind die gemessenen Spitzenwerte der Stellkraft P_L , die während der Nachführung mittels Achsschenkellenkung an einem Achsschenkelhebel von der Länge $l_L = 200$ mm bei Verstellung durch Z_2 und Z_1 bei verschiedenem Ölbetriebsdruck p und verschiedener Fahrgeschwindigkeit gemessen wurden. Insbesondere infolge der kleineren Stellgeschwindigkeiten am Achsschenkel im Bereich von 0,15 bis 0,35 m/s ergeben sich hier gegenüber Nachführung mittels Hebelverstellung geringere Spitzen-

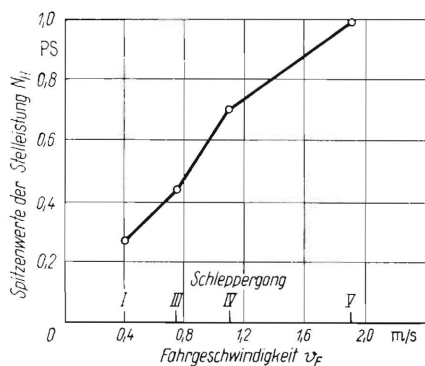


Bild 32. Spitzenergebnisse der Stelleistung N_H zur Nachführung des Werkzeuges im Boden mittels Hebelverstellung mit Z_1 bei verschiedener Fahrgeschwindigkeit und konstantem Öldruck $p = 50 \text{ atü}$ (für $P_{H\max} = 130 \text{ kp}$).

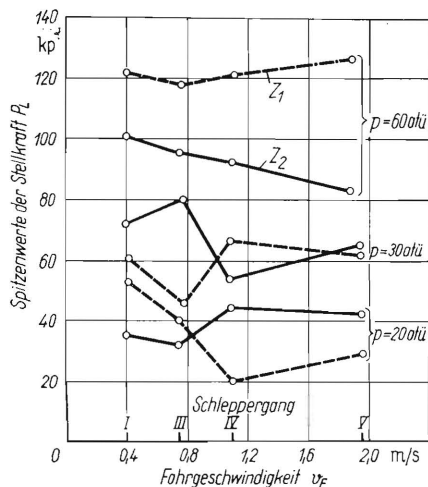


Bild 33. Spitzenergebnisse der Stellkraft P_L zur Nachführung eines Rübenrodekörpers im Boden mittels Achsschenkelenkung in den Druckrichtungen Z_1 und Z_2 .

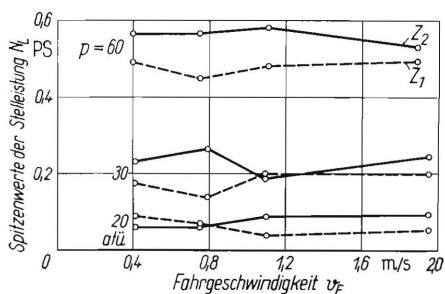


Bild 34. Spitzenergebnisse der Stelleistung N_L zur Nachführung eines Werkzeuges im Boden (wie in Bild 33) mittels Achsschenkelenkung.

stelleistungen, wie **Bild 34** im Vergleich zu **Bild 32** erkennen läßt. Bei Nachführung mittels Achsschenkelenkung erscheint es somit leicht möglich, den hydraulischen Stellmotor durch einen elektrischen Stellmotor mit Getriebe mit z. B. $N = 0,2 \text{ PS}$ zu ersetzen. Mit den beschriebenen Meßergebnissen sind die wichtigsten Daten für den Entwurf einer elektrohydraulischen Nachführungsanlage (Dreipunktregelung) für einen Rübenrodekörper ermittelt.

Zusammenfassung

Die Regelung an Landmaschinen ist ein Mittel zur Automatisierung und Rationalisierung in der Landwirtschaft. Es lassen sich Arbeitskräfte einsparen, die Arbeitsgeschwindigkeiten erhöhen und die Maschinen optimal ausnützen.

Das Gebiet der Regelungstechnik an Landmaschinen umfaßt sowohl Regelungsprobleme an fahrenden Landmaschinen, wie z. B. die Leistungsregelung, die selbsttätige Nachführung von

Arbeitselementen und Maschinen bei der Bodenbearbeitung, beim Pflanzen, Pflegen und Ernten als auch Regelungsprobleme an Anlagen auf dem Hofe, wie z. B. Temperaturregelung beim Lagern und bei der Tierhaltung, und Mengenregelung beim Trocknen.

Für die ersten Untersuchungen wurden aus der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten Nachführungseinrichtungen für Rübenrodekörper mit elektrohydraulischer Dreipunktregelungsanlage gewählt. Damit lassen sich z. B. bei Nachführung eines Rübenrodekörpers mittels Hebelverstellung auf einer kurzen Wegbasis von 30 cm sprunghafte, seitliche Rübenabweichungen von $\pm 7 \text{ cm}$ bei Fahrgeschwindigkeiten bis etwa 0,4 m/s ausregeln. Auf längerer Wegbasis von 1 m sind Rübenabweichungen von $\pm 25 \text{ cm}$ bei Fahrgeschwindigkeiten bis etwa 1,1 m/s bzw. von $\pm 14 \text{ cm}$ bei 1,9 m/s ausregelbar. Die Einstellunsicherheit der Nachführung beträgt dabei etwa $\pm 1,5 \text{ cm}$. Bei der Nachführung des Werkzeuges mittels Achsschenkelenkung des Versuchsgesetzes ergeben sich ähnliche Werte. Für eine schnellere Nachführung auf kürzerer Wegbasis — z. B. für eine Rübenköpfeinrichtung — müssen gegenüber den bisherigen Ergebnissen die Stellgeschwindigkeit erhöht und vor allem die Stellzeit der Regelungsanlage verringert werden.

Bei der Nachführung des Rübenrodekörpers mittels Hebelverstellung wurden am Werkzeug maximale Stellkräfte von etwa 130 kp und momentane Spitzenergebnisse von etwa 1 PS gemessen. Da sich bei der Nachführung mittels Achsschenkelenkung Spitzenergebnisse von nur etwa 0,2 PS ergeben, läßt sich hierbei an Stelle eines hydraulischen Stellzylinders evtl. ein elektrischer Stellmotor mit Getriebe einsetzen.

Auf Grund der Ergebnisse im untersuchten Beispiel kann kein abschließendes Urteil für die Wahl des günstigsten Reglers für Nachführungseinrichtungen gegeben werden. Die bisherigen Unterlagen lassen sich in ähnlicher Weise sowohl für die Nachführung nach der Seite in der horizontalen Ebene als auch für die Nachführung in der Höhe in der vertikalen Ebene anwenden. Für besondere Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit anderen Werkzeugen sind jedoch jeweils weitere Versuche nötig.

An Stelle des Dreipunktreglers können sich in vielen Fällen stetige Regler besser eignen, ohne daß diese teurer sein müssen. Bei der weiter vorgesehenen Untersuchung von Systemen mit stetigen Reglern sollen neben der Übergangsfunktion auch Ortskurven des Frequenzganges aufgenommen werden. Dabei ist beabsichtigt, die Systeme auch theoretisch mit Hilfe von Analogrechnern zu untersuchen.

Die Nachführung über die gewählte Hebelverstellung ist einfach. Sie erfordert jedoch verhältnismäßig große Stellkräfte. Die Nachführung mittels Achsschenkelenkung erfordert kleinere Stellkräfte bzw. Stelleistungen. Da aber bei dieser Bauweise im allgemeinen das gesamte Fahrgestell und damit große Massen bewegt werden, ist dieses System durch die Massenkräfte begrenzt. Weitere kinematische Systeme mit kleineren Massen und kleineren Stellkräften werden daher im Fortgang der Untersuchungen mit einbezogen.

Schrifttum

- [1] Fedorov, W.: Avtomatizacija v selskomchozjaistve (Die Automation in der Landwirtschaft). Kolchoznoe Proizvodstvo (Kolchos-Erzeugung) **20** (1960) Nr. 8.
- [2] Seifert, Artur: Die Regelsysteme bei hydraulischen Krafthebern für Ackerschlepper aus der Sicht der Regeltechnik. Landtechn. Forsch. **11** (1961) S. 97/100.
- [3] Richey, C. B.: „Automatic Pilot“ for farm tractors. Agric. Engng. **40** (1959) Nr. 2, S. 78/79.
- [4] Coenenberg, H.-H.: Einige Grundbedingungen und Möglichkeiten für die automatische Regelung stufenloser Getriebe in Schleppern. Landtechn. Forsch. **11** (1961) S. 101/07.
- [5] DIN 19226, Regelungstechnik. Benennungen und Begriffe. Berlin und Köln: Beuth-Vertrieb 1954.
- [6] Oppelt, W.: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie GmbH 1960, 3. Aufl.