

# Experimentelle und simulierte Untersuchung eines elektrohydraulischen Pflugregelungssystems

Von **H. Hesse** und **R. Möller**, Braunschweig-Völkenrode

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Die Untersuchung gliedert sich in drei Teile. Zunächst wurden mit einer näher beschriebenen elektrohydraulischen Tiefenregelung Feldversuche durchgeführt und die Regelgüte im praktischen Einsatz ermittelt. Davon ausgehend wurde ein Modell des Regelungssystems auf dem Analogrechner entwickelt und durch Eingabe einer bei den Feldversuchen auf Magnetband aufgenommenen Störgröße simuliert. Im dritten Teil der Arbeit wurde diese Störgröße einem Rauschgenerator entnommen, also künstlich erzeugt, womit eine von Feldversuchen völlig unabhängige Untersuchung der Pflugregelung erreicht wurde.

## Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Vorteile elektrohydraulischer Systeme
- 3 Aufbau und Funktion des untersuchten Regelungssystems
- 4 Zweck und Durchführung der Untersuchung
- 5 Modellentwicklung für die Simulation
- 6 Versuchsergebnisse
  - 6.1 Beurteilung von Regelungssystemen
  - 6.2 Feldversuche
  - 6.3 Simulation mit realer Störgröße
  - 6.4 Simulation mit künstlicher Störgröße
- 7 Schlußbetrachtung
- 8 Schrifttum

## 1 Einleitung

Zur automatischen Regelung der Arbeitstiefe von Schlepperanbaupflügen haben sich mechanisch-hydraulische Regelungssysteme allgemein durchgesetzt und bewährt. Da im Laufe der letzten Jahre sehr zuverlässige und robuste elektrische und elektrohydraulische Bauelemente entwickelt worden sind, bieten sich elektrohydraulische Systeme wegen ihrer größeren Möglichkeiten als eine Alternative zu den herkömmlichen Regelungssystemen an.

In anderen Bereichen der Technik werden ähnliche Aufgaben wie Pflugregelungen in zunehmendem Maße mit elektrohydraulischen Elementen durchgeführt, weil diese Kombination von Elektrotechnik und Hydraulik bezüglich Funktion, Flexibilität und Einfachheit der Bedienung der mechanisch-hydraulischen Lösung überlegen ist. Vor allem im Werkzeugmaschinenbau, bei Regelungen in der Industrie, aber z. B. auch bei Baumaschinen [7; 11] ist diese Entwicklung festzustellen.

Im Bereich der Landtechnik kann man davon ausgehen, daß mit fortschreitender Entwicklung die Anforderungen, die an die Arbeitsgüte von Maschinen sowie an ihren Arbeits- und Bedienungskomfort gestellt werden, steigen werden. Darüber hinaus ist damit zu rechnen, daß auch komplexere Regelungssysteme, als sie bisher erforderlich waren, zum Einsatz kommen werden, mit dem Ziel, z. B. bei Pflugregelungen eine optimale Ausnutzung der Motorleistung des Schleppers zu erreichen oder um bei anderen Maschinen bestimmte Optimalwerte verwirklichen zu können. Die hier aufgeführten steigenden Anforderungen an Regelungssysteme lassen sich mit elektrischen und elektrohydraulischen Elementen leichter erfüllen als mit den herkömmlichen Mitteln. Bislang sind elektrohydraulische Pflugregelungen

weder untersucht noch praktisch eingesetzt worden, obwohl solche Systeme in der Patenlliteratur bereits beschrieben worden sind [13; 14]. Deshalb sollte in der vorliegenden Untersuchung im Hinblick auf eine Lehre zum technischen Handeln geklärt werden, ob mit einem relativ einfachen elektrohydraulischen Regelungssystem bereits die Forderungen, die bezüglich Tiefenhaltung an Pflugregelungen gestellt werden, erfüllt werden können, und wie das Arbeitsergebnis eines solchen Systems von seinen wichtigsten Parametern und äußeren Einflußgrößen abhängt. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen im Feldeinsatz sollte versucht werden, das Systemverhalten durch Simulation mit einem Analogrechner zu analysieren, weil die Simulation im Gegensatz zu den Feldversuchen reproduzierbare Ergebnisse liefert und eine erhebliche Zeitersparnis ermöglicht.

## 2 Vorteile elektrohydraulischer Systeme

Die charakteristischen Vorteile der elektrohydraulischen Systeme gegenüber den mechanisch-hydraulischen ergeben sich vor allem durch die vielseitigen Möglichkeiten der elektrischen Meßtechnik und dadurch, daß sich elektrische Meß- und Steuersignale leicht übertragen, anpassen und verarbeiten lassen [12]. Mit Hilfe elektrischer Meßglieder kann man Regelgrößen messen, die mechanisch nicht meßbar sind, und wegen der leichten Übertragbarkeit der Meßwerte können die Meßstellen für die Regelgrößen dort angeordnet werden, wo sie auftreten oder wo sie am leichtesten meßbar sind. Dabei braucht man auf die Länge der Übertragungswege an einer Maschine im Gegensatz zu mechanischen Meßsystemen keine Rücksicht zu nehmen.

Aufgrund der aufgezählten wichtigsten Vorteile der Elektrotechnik und elektrischen Meßtechnik ergibt sich eine Fülle von Möglichkeiten, von denen im folgenden einige kurz skizziert sind [6]. Da sich elektrische Meß- und Steuersignale leicht übertragen lassen, kann man alle Bedienungs- und Einstellelemente eines Systems in einem Steuer- und Bedienungspult zentral zusammenfassen. An einer solchen zentralen Bedienungseinheit ist neben der Steuerung eines Systems von Hand auch die Einstellung der Systemparameter sowie der Sollwerte z. B. mit Hilfe von Drehknöpfen (Potentiometer) möglich, d. h., daß eine wesentliche Erleichterung der Bedienung erreicht wird.

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil ist der, daß wichtige Größen (Sollwerte, Regelgröße) mit Instrumenten angezeigt werden können; dadurch können den Bedienungs-personen Informationen über die Funktion und die Einstellung des Systems gegeben werden. Neben den aufgezeigten Verbesserungen, die vor allem die Bedienung betreffen, gibt es noch solche, die sich auf die Funktion beziehen. So ist z. B. die Verarbeitung mehrerer Regelgrößen mit elektronischen Operationsverstärkern auf einfache Weise möglich. Die Wirkung der verschiedenen Größen auf den geregelten Prozeß ist dabei leicht an Potentiometern einstellbar. Mechanisch bereiten solche Aufgaben bei mehreren Regelgrößen Schwierigkeiten. Der Leistungsinhalt der Meßsignale ist von untergeordneter Bedeutung, da er mit elektronischen Verstärkern soweit angehoben werden kann, daß eine rückwirkungsfreie Aussteuerung der verschiedenen elektrohydraulischen Ventile möglich wird. Eine Filterung elektrischer Signale zum Zwecke der Abspaltung hoch- oder niederfrequenter Anteile ist elektrisch relativ einfach möglich; ferner sind Netzwerke mit bestimmtem Zeitverhalten zur Güteverbesserung oder Stabilitätserhöhung leichter realisierbar. Zur Zeit sind elektrohydraulische Systeme zwar noch teurer als mechanisch-hydraulische; dieser Nachteil wird aber in einigen Jahren entfallen, weil die Elemente wegen der steigenden Serien immer billiger werden. Erinnerung sei nur daran, daß eine elektronisch

Dipl.-Ing. Horst Hesse ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ing. (grad.) Rudolf Möller Versuchingenieur im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

gesteuerte Einspritzung für Ottomotoren zu einem Preis möglich ist, der ihre Einführung bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt ermöglichte.

### 3 Aufbau und Funktion des untersuchten Regelungssystems

Ein wichtiges Glied, von dem das Verhalten einer elektrohydraulischen Regelung sehr wesentlich beeinflusst wird, ist das Ventil (Stellglied). Da die Anforderungen an die Schnelligkeit und an die Genauigkeit von Pflugregelungssystemen nicht sehr hoch sind, wurde bei der Projektierung von der Auffassung ausgegangen, daß zur Erfüllung der Aufgabenstellung ein einfaches und auch billiges Magnetventil ausreichend ist. Magnetventile sind im Gegensatz zu den teuren Servoventilen langsamer und schalten immer die volle von der Pumpe geförderte Ölmenge auf den Zylinder (3-Punkt-Verhalten). Mit ihrer Hilfe ist deshalb eine stetige Regelung oder Einstellung der Stellgeschwindigkeit der Hydraulik nicht möglich. Um eine feinfühligere Betätigung der Hydraulik von Hand, z. B. beim Ankoppeln von Geräten, zu erreichen, muß die Pumpenfördermenge und damit die Stellgeschwindigkeit der Hydraulik hier mit Hilfe der Schlepper-motordrehzahl gesteuert werden, was, wie die Versuche gezeigt haben, leicht möglich ist.

Die Lasterhöhung für die Triebachse des Schleppers und die Einhaltung der Pflugtiefe sind die wichtigsten Aufgaben einer Pflugregelung; deshalb wurde als Regelgröße die Pflugtiefe gewählt. In gleicher Weise wären auch eine Zugwiderstands- oder eine Mischregelung möglich gewesen, wenn statt der elektrischen Tiefenmessung entsprechende Meßglieder für den Zugwiderstand oder die Lage verwendet worden wären. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau der Regelung an einem Unimog, während in Bild 2 das Geräteschaltbild des Regelkreises dargestellt ist. Mit Hilfe eines Tastrades wird die Tiefe an einem zweifurchigen Anbaupflug gemessen. Es hätten auch andere Möglichkeiten der Tiefenmessung (z. B. berührunglose Fühler) zur Anwendung kommen können. Da die Tiefenmessung aber nicht Gegenstand der Untersuchung war, wurde der Einfachheit wegen ein Tastrad gewählt. Das Tastrad ist so neben den beiden Pflugkörpern angebracht, daß ein mittlerer Wert für die Tiefe beider Körper erhalten wird. Es ist über einen Hebel mit einem kapazitiven Winkelgeber verbunden. Dieser gibt näherungsweise einen zur Pflugtiefe proportionalen eingepprägten Gleichstrom ab, der auf den Eingang eines elektronischen Verstärkers gegeben wird. Dieser Verstärker ist aus zwei Operationsverstärkern aufgebaut und seine Verstärkung kann an einem Drehknopf eingestellt werden. Dem Verstärker ist ein elektronisches Dreipunktglied mit einer fest eingestellten Totzone von  $\epsilon = \pm 10$  Volt nachgeschaltet, d. h., wenn der Betrag der Eingangsspannung dieses Gliedes  $\pm 10$  Volt überschreitet, dann schaltet es nach entsprechender Leistungsverstärkung die Magnete eines 4/3-Wege-Magnetventils (Bild 2).

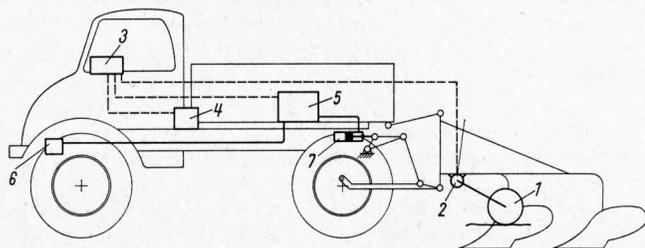


Bild 1. Prinzipieller Aufbau der Tiefenregelung eines Pfluges an einem Unimog.

- |               |                                 |
|---------------|---------------------------------|
| 1 Tastscheibe | 5 Mengenregler und Magnetventil |
| 2 Winkelgeber | 6 Hydraulikpumpe                |
| 3 Verstärker  | 7 Hubzylinder                   |
| 4 Batterie    |                                 |

Mit Hilfe der Verstärkung kann der Wert für die Regelabweichung (effektive Totzone) eingestellt werden, bei der das Ventil geschaltet und ein Regelvorgang ausgelöst wird. Bezogen auf die Pflugtiefe ist das System so ausgelegt, daß bei größter Verstärkung die effektive Totzone etwa 0,8 cm beträgt, d. h., daß das System bei größter Empfindlichkeit bereits bei Regelabweichungen von  $\pm 0,4$  cm anspricht. Die gesamte in Bild 2 mit Verstärker bezeichnete Apparatur kann als kontaktlos arbeitender Dreipunktregler mit stetig einstellbarer Totzone

aufgefaßt werden. Das Gerät ist im Institut für landtechnische Grundlagenforschung entwickelt worden.

Ursprünglich war im Verstärker noch ein Zeitglied in Form eines Integralteiles vorgesehen worden, um damit die Schalthäufigkeit noch weiter beeinflussen zu können als das mit einer Totzone allein, bei Einhaltung bestimmter Regelgenauigkeiten, möglich ist. Bei sehr schnell schaltenden Ventilen kann ein solcher Anteil sehr wichtig sein [3]. Beim vorliegenden System erwies sich diese Maßnahme aber als überflüssig, da das Magnetventil aufgrund seiner eigenen Trägheit bei sehr kurzen Schaltimpulsen nicht anspricht.

Bild 2. Geräteschaltbild der elektrohydraulischen Pflugregelung nach Bild 1.

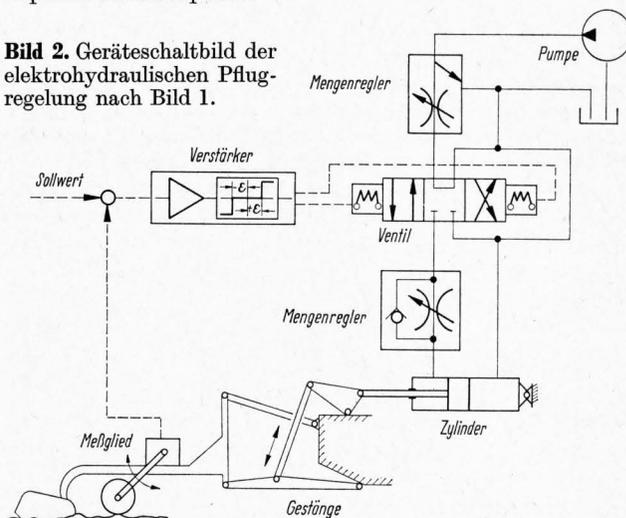


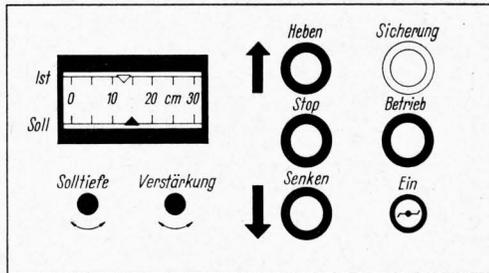
Bild 3 zeigt das im Fahrerhaus untergebrachte Gehäuse, in dem außer dem Verstärker und dem Dreipunktglied auch das Netzteil zur Versorgung der elektrischen Elemente sowie die Leistungsstufe untergebracht sind. An der Frontplatte des Verstärkergehäuses sind alle Bedienungs- und Einstellelemente angeordnet. Mit Hilfe des Verstärkerreglers ist die effektive Totzone der Regelung einstellbar. Damit kann die Genauigkeit und auch die Schalthäufigkeit des Systems beeinflusst werden [6]. Neben der Verstärkungseinstellung kann die Wahl des Sollwertes für die Pflugtiefe vorgenommen werden. Soll- und Istwert der Pflugtiefe werden an einem Instrument angezeigt, so daß dem Schlepperfahrer hierdurch eine Information über Einstellung und Funktion des Systems gegeben wird. Hub- und Senkvorgänge können durch einmaliges Drücken entsprechender Knöpfe von Hand eingeleitet und mit einer Stoptaste an beliebiger Stelle angehalten werden. Wird die Stoptaste nicht betätigt, dann wird der Hubvorgang in der obersten Stellung durch einen elektrischen Endschalter abgebrochen. Mit dem Knopf „Senken“ wird bei angebautelem Meßsystem auch die Regelung eingeschaltet. Bei abgenommenem Meßsystem wird mit dem Knopf „Senken“ in Schwimmstellung geschaltet.

Die vorhandene Hydraulikanlage wurde durch das Magnetventil und zwei Mengenregler erweitert, Bild 2. Um den Ölstrom und damit die Hubgeschwindigkeit des Regelungssystems einstellen zu können und unabhängig von der Belastung und der Motordrehzahl zu machen, wurde ein 3-Wege-Mengenregler zwischen Pumpe und Magnetventil geschaltet. In gleicher Weise

#### Verwendete Formelzeichen

$c$	Konstante
$K_V$	Verstärkungsfaktor
$M$	Aufbaumasse des Schleppers
$v_F$	Fahrgeschwindigkeit des Schleppers
$v_S$	Stellgeschwindigkeit der Hydraulik
$T$	Integrationszeit
$T_S$	Schaltzeit des Magnetventils
$x$	Regelgröße (Arbeitstiefe)
$x_K$	Sollwert (der Arbeitstiefe)
$x_W$	Regelabweichung (Tiefenabweichung)
$ x_W $	Betrag der Regelabweichung
$ x_W _m$	Betragsmittelwert der Regelabweichung
$y$	Stellgröße (Hubarmstellung)
$Z, Z_1, 2, 3, \dots$	Störgröße
$Z_{ns}$	Totzone des elektronischen Dreipunktgliedes
effektive Totzone	Bereich, innerhalb dessen sich die Regelgröße ändern kann, ohne daß ein Regelvorgang ausgelöst wird.

kann die Senkgeschwindigkeit an einem zweiten belastungs-unabhängigen Mengenregler eingestellt werden. Die Unabhängigkeit der Senkgeschwindigkeit des Pfluges von der Größe der angreifenden Kräfte ist bei Systemen mit einfachen Senkdrosseln nicht gegeben. Beim vorliegenden System wird sie durch den Mengenregler erzwungen, um den Einfluß der schwer analysierbaren Kräfte auf den Senkvorgang auszuschalten.



**Bild 3.** Bedienungs- und Kontrollelemente an der Frontseite des Verstärkergehäuses.

Die beiden doppelwirkenden Zylinder der Hydraulikanlage des Unimog wurden so angeschlossen, daß ihre Arbeitsweise der einer normalen Kraftheberanlage mit einseitig beaufschlagtem Zylinder entspricht, außerdem wurde die Federung der Hinterachse des Unimog ausgeschaltet, um sie als Einflußgröße des Systems zu eliminieren.

#### 4 Zweck und Durchführung der Untersuchung

Die Untersuchungen sollten zeigen, ob das beschriebene elektrohydraulische Regelungssystem für eine Pflugregelung hinreichend genau ist und wie seine Regelgüte von den wichtigsten Parametern abhängt. Letzteres ist wichtig, um optimale Parameterkombinationen ermitteln zu können. Nach welchen Gütekriterien das System beurteilt wurde, ist weiter unten ausführlich beschrieben.

Die wichtigsten Größen, von denen das dynamische Verhalten der Regelung abhängt, sind: die Verstärkung des Systems (effektive Totzone, Empfindlichkeit), die Stellgeschwindigkeit (Heben und Senken), die Schaltzeit des Magnetventils sowie die Fahrgeschwindigkeit des Schleppers.

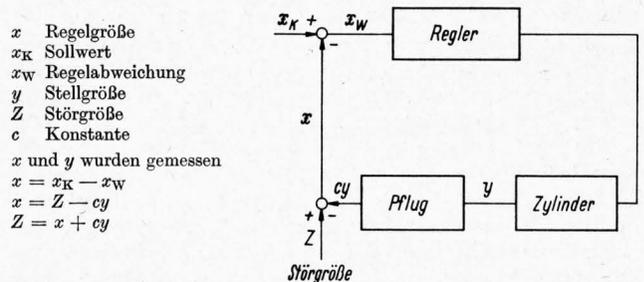
Das Verhalten der Anlage wurde im praktischen Einsatz auf dem Acker und durch Simulation mit einem Analogrechner untersucht. Die Feldversuche wurden auf einem ungeschalteten Stoppelacker mit einer Solltiefe von 20 cm und drei Fahrgeschwindigkeiten  $v_F = 0,95; 1,6$  und  $2,2$  m/s durchgeführt. In Parallelversuchen wurde hier die Verstärkung des Systems variiert. Der Einfluß der anderen wichtigen Systemgrößen wurde durch Simulation ermittelt. Bei allen Feldversuchen wurde die Arbeitstiefe, die Hubarmstellung, der Öldruck in den Hydraulikzylindern und die Steuerspannung der Magnete des Ventils mit einem Oszillographen registriert. Parallel dazu wurden die Tiefe des Pfluges und die Hubarmstellung auf Magnetband aufgezeichnet, um mit dem Analogrechner aus diesen Werten die Störgröße, genauer gesagt die Summe der Störgrößen, ermitteln zu können, die in das Regelungssystem eintritt. Diese konnte nicht direkt gemessen werden, war aber für die Simulation erforderlich, **Bild 4**.

Eine Simulation bietet neben der Zeitersparnis gegenüber einem realen Experiment den großen Vorteil, daß die Ergebnisse reproduzierbar werden, weil man bei jedem Versuch die gleiche Störgröße von einem Magnetband oder aus einem Rauschgenerator verwenden kann. Bei Versuchen auf dem Felde sind dagegen wegen der veränderlichen Oberflächenbeschaffenheit des Ackers die Störgrößen bei jedem Versuch andere. Die beiden angedeuteten Möglichkeiten, die Störgrößen für die Simulation entweder aus der Realität oder künstlich aus einem Generator zu beschaffen, wurden für die Untersuchung herangezogen.

Im ersten Teil der Simulation des Systems mit dem Analogrechner wurden dem Rechner die aus den Feldversuchen ermittelten Störgrößen vom Magnetband eingespeist, und es wurden die Verstärkung, die Stellgeschwindigkeit, die Fahrgeschwindigkeit des Schleppers und die Schaltzeit des Ventils variiert. Die Stellgeschwindigkeit, die bei den Feldversuchen 15 cm/s

betragen hatte, wurde bei der Simulation zwischen 10 und 40 cm/s geändert. Eine Fahrgeschwindigkeitsänderung von 1 m/s auf 2 m/s wurde durch Verdoppelung der Geschwindigkeit des Magnetbandes bei der Wiedergabe erreicht. Die Schaltzeit des Magnetventils von 0,10 s bei realem System wurde auf einen theoretischen Wert von 0,05 s verringert, um den Einfluß eines schnelleren Ventils ermitteln zu können.

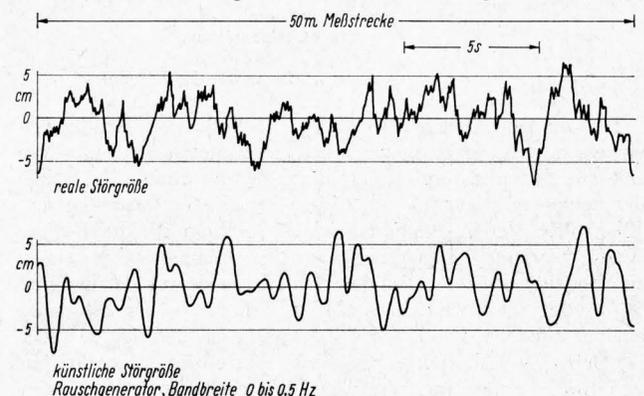
Im zweiten Teil der Simulation wurde die Störgröße des Regelungssystems einem Rauschgenerator entnommen. Die Verwendung von Rauschgeneratoren zur Erzeugung regelloser Signale, die reale Störungen ersetzen sollen, hat in der Regelungstechnik, aber auch in der Festigkeits- und Fahrzeugforschung, große Verbreitung gefunden [4; 9]. Deshalb sollte auch hier der Versuch gemacht werden, die reale Störgröße durch eine künstliche zu ersetzen. Wenn es nämlich gelingt, einerseits ein brauchbares elektronisches Modell des Regelungssystems am Analogrechner zu entwickeln und andererseits die Stör- oder Führungsgrößen mit einem Generator zu erzeugen, dann können Systemuntersuchungen vollkommen im Labor durchgeführt werden.



**Bild 4.** Ermittlung der Störgröße  $Z$  aus Stellgröße  $y$  und Regelgröße  $x$ .

Rauschgeneratoren geben elektrische Spannungen ab, deren Amplituden normalerweise gaußverteilt sind, und deren Leistungsdichte im eingestellten Frequenzbereich konstant ist (weißes Rauschen). Die Bandbreite dieses Signals ist meistens in Stufen einstellbar. Mit modernen Rauschgeneratoren ist es möglich, ein sogenanntes Pseudoräuschen zu erzeugen. Dieses Pseudoräuschen liefert eine periodische Wiederholung eines Rauschvorganges von einstellbarer Zeitdauer, wodurch bei einer Parametervariation die gleiche Reproduzierbarkeit wie beim wiederholten Abspielen einer realen Störung vom Magnetband erreicht wird.

Um einen Rauschgenerator so einstellen zu können, daß sein Signal einer realen Störgröße entspricht, muß außer der Amplitudenverteilung der realen Störgröße auch der Verlauf der Leistungsdichte oder ihre Amplitudenfrequenzcharakteristik bekannt sein. Verschiedene von Hand ermittelte Amplitudenverteilungen der wirklichen Störgröße zeigten, daß die Amplituden näherungsweise eine Gaußverteilung besitzen. Die Leistungsdichte des realen Signals oder die Amplitudenfrequenzkennlinie konnte nicht gemessen werden, da entsprechende Geräte nicht zur Verfügung standen. Der Generator wurde deshalb nach einem optischen Vergleich seines Signals mit dem aus der Wirklichkeit gewonnenen eingestellt. **Bild 5** zeigt den Verlauf der realen Störgröße und des Generatorsignals. Man sieht,

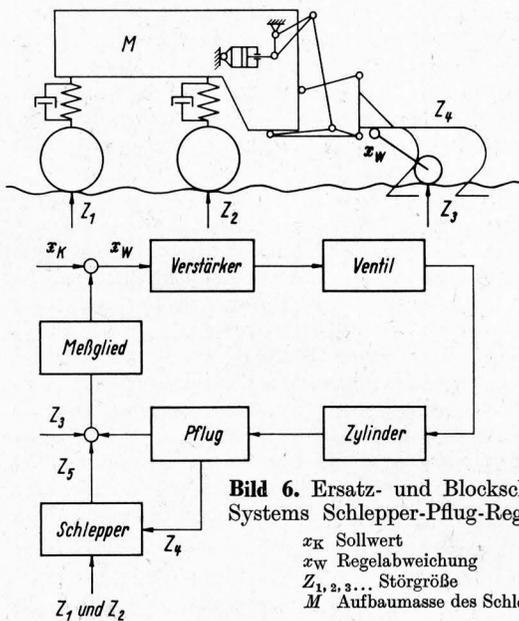


**Bild 5.** Zeitlicher Verlauf einer realen und einer künstlichen Störgröße.

daß die Grundfrequenzen etwa übereinstimmen, während die höheren Frequenzen des realen Signals vom Generator nicht geliefert werden. Diese höheren Frequenzen haben auf das Verhalten des Regelungssystems aber auch keinen großen Einfluß, so daß sie vernachlässigbar sind. Die Amplituden des Generatorsignals wurden für die Simulation so eingestellt, daß der Betragsmittelwert des Signals dem der wirklichen Störgröße entsprach.

### 5 Modellentwicklung für die Simulation

Für eine umfassende analytische Darstellung der dynamischen Vorgänge bei Pflugregelungen müssen die Einflußgrößen des gesamten Systems, das aus dem Fahrzeug mit angebautem Pflug und Regelungssystem besteht, berücksichtigt werden. In **Bild 6** ist der Komplex Schlepper-Pflug-Regelungssystem als ebenes Ersatzsystem in der hier interessierenden vertikalen Ebene dargestellt. Bei einer Pflugregelung, bei der die Tiefe als Regelgröße benutzt wird, rühren die Abweichungen des Pfluges von der eingestellten Solltiefe im wesentlichen von der Unebenheit der Bodenoberfläche und, da jeder Schlepper als elastisches Element aufgefaßt werden muß, von den am Pflug angreifenden Kräften her. Diese von außen in das System eintretenden Störgrößen sind mit  $Z$  bezeichnet. Bei  $Z_1, Z_2$  und  $Z_3$  handelt es sich um Oberflächenunebenheiten, während  $Z_4$  die Summe aller am Pflug angreifenden und veränderlichen Kräfte darstellen soll. Im unteren Teil des Bildes ist das Blockschaltbild angegeben. Die wichtigsten Störgrößen sind die Unebenheiten  $Z_1, Z_2$  und  $Z_3$ .  $Z_5$  ist die aus  $Z_1, Z_2$  und  $Z_4$  resultierende Störgröße, die über den Schlepper auf das Regelungssystem einwirkt. Inwieweit die veränderlichen Kräfte  $Z_4$  als Störung von Bedeutung sind und sich auf das Verhalten der Regelung auswirken, hängt im wesentlichen von der Federung des Fahrzeuges und von der Größe dieser Kräfte ab. Diese Kräfte sind eine Funktion des Bodenzustandes, der Fahrzeug- und Pflugparameter, sie werden aber auch von den Regelvorgängen selbst beeinflusst. Ihre analytische Beschreibung ist beim gegenwärtigen Stand des Wissens nicht möglich.



**Bild 6.** Ersatz- und Blockschaltbild des Systems Schlepper-Pflug-Regelungssystem.

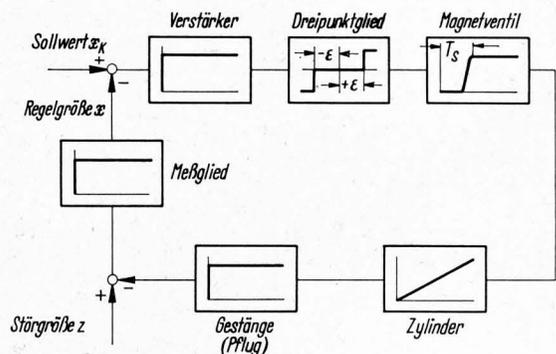
$x_K$  Sollwert  
 $x_W$  Regelabweichung  
 $Z_1, 2, 3, \dots$  Störgröße  
 $M$  Aufbaumasse des Schleppers

Bei den Feldversuchen wurde der Einfluß dieser Kräfte mitgemessen, d. h., er ist in der später errechneten Störgröße, die sich aus  $Z_3$  und  $Z_5$  ergibt, enthalten. Bei der Simulation wurde der Schlepper bezüglich der Kräfte  $Z_4$  als starr angenommen. Eine solche Vereinfachung ist zulässig, solange die durch diese Kräfte bewirkten Lageänderungen des Gesamtsystems relativ zur Bodenoberfläche gegenüber den Einwirkungen der anderen Störgrößen klein sind. Das ist der Fall, wenn der Schlepper eine ungefederte Hinterachse hat, wenn die Kräfte, wie hier bei einem Zweischarppflug, bestimmte Werte nicht überschreiten und wenn außerdem, wie bei Pflugregelungen, durch den Boden eine genügend große Dämpfung des gesamten Systems vorhanden ist.

Da beim vorliegenden System der Einfluß der Kräfte auf die Stellgeschwindigkeit des Krafthebers durch die vorhandenen Mengenregler ausgeschaltet wurde, konnte für die Simulation ein Modell angesetzt werden, das vollkommen frei von inneren Kräfteinflüssen ist. Kräfte wirken nur indirekt über die eingegebenen Störgrößen auf das Modellsystem ein. Trotz dieser Vereinfachung gegenüber der Wirklichkeit wurde eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Feldversuche und der Simulation erreicht. Das zeigt, daß die für die hier untersuchten Fragestellungen wesentlichen Parameter erfaßt worden sind.

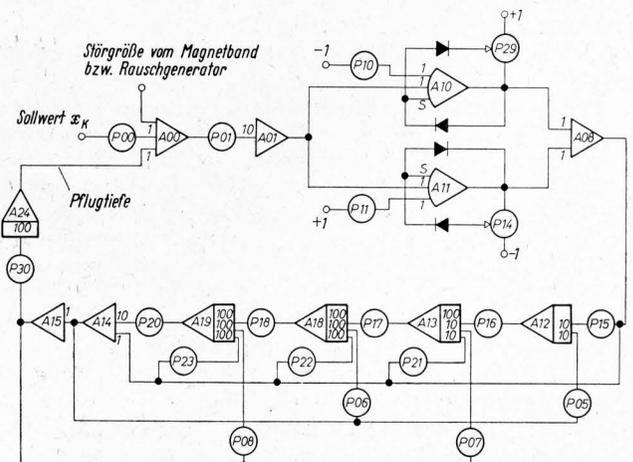
Da Schlepper und Pflüge und damit auch die Kräfte, die von den Pflügen auf die Schlepper einwirken, immer größer werden, ist vorgesehen, bei der Analyse des gesamten Komplexes von Fahrzeugen mit angebauten Regelungssystemen, die Werkzeuge relativ zur Fahrbahnoberfläche führen sollen, auch die Elastizität, d. h. vor allem die Federung der Fahrzeuge, mit zu berücksichtigen. Abgesehen von Pflugregelungen können bei weniger gedämpften Systemen, bei denen nur Massen bewegt werden (z. B. Schneidischregelung beim Mähdrescher), gefährliche Instabilitäten auftreten, wenn die Einstellung der Parameter der Regelungssysteme nicht auf das Federungsverhalten der Fahrzeuge abgestimmt ist.

Unter den oben gemachten Voraussetzungen bleibt nach Ausklammerung des Fahrzeuges nur das Regelungssystem mit dem angebauten Pflug als Modellsystem für die Simulation übrig. **Bild 7** zeigt das Blockschaltbild des Regelungssystems und **Bild 8** die daraus entwickelte Analogrechnerschaltung. Das Meßglied, der Verstärker und das Übertragungsgestänge vom Kraftheber zum Pflug sind als Proportionalglieder ohne Verzögerung angenommen worden.



**Bild 7.** Blockschaltbild der Pflugregelung.

Das Zeitverhalten des Magnetventils, das durch eine Totzeit und ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung beschrieben werden kann, wurde auf dem Analogrechner durch eine Padé-Approximation vierter Ordnung nachgebildet [5]. Dieses ist eine Näherungsschaltung für reine Totzeiten, die aber auch bereits einen Verzögerungseffekt enthält, so daß auf die Nachbildung des Verzögerungsgliedes zweiter Ordnung verzichtet werden konnte. Für den Hydraulikzylinder ist ein integrierendes Glied eingesetzt worden.



**Bild 8.** Analogrechnerschaltung zur Simulation der Pflugregelung (Symbole nach [5]).

## 6 Versuchsergebnisse

### 6.1 Beurteilung von Regelungssystemen

Bei der Beurteilung der Güte eines Regelungssystems muß von einem auf den Zweck der Regelung ausgerichteten Gütekriterium ausgegangen werden. Die wichtigsten Aufgaben von Pflugregelungssystemen sind die Tiefenhaltung des Pfluges und die Achslasterhöhung für den Schlepper. Letztere wird dadurch erreicht, daß der Schlepper den Pflug trägt und dabei ein Teil der statischen und dynamischen Kräfte auf den Schlepper übertragen wird. Die erreichbare Zusatzlast ist aber nicht Regelgröße, sondern ergibt sich vom Regelungssystem her gesehen als zusätzlicher Effekt. Gütekriterien für Regelungssysteme enthalten immer die Regelgrößen bzw. die Regelabweichungen, weshalb hier die Tiefenhaltung des Pfluges, also die Fähigkeit des Systems, den Pflug auf gleichbleibender Tiefe zu halten, als Gütekriterium benutzt wurde. Andere Größen, die auch zur Beurteilung eines Regelungssystems mit herangezogen werden können, sind die relative Einschaltzeit sowie die Schalthäufigkeit des Stellgliedes, d. h. die Anzahl der Regelvorgänge pro Zeiteinheit. Beide Größen sind vor allem für den Leistungsverbrauch und die Lebensdauer der Anlage von Bedeutung.

Bei der Beurteilung von Pflugregelungen ist häufig von einer Forderung der Praxis die Rede, wonach die Regelgenauigkeit etwa  $\pm 10\%$  der Solltiefe betragen soll. Was darunter regelungstechnisch zu verstehen ist, wurde bis heute nicht festgelegt und bedarf deshalb noch einer genaueren Definition. Von Seifert [10] wurde zur Bewertung von Pflugregelungen die maximale Schwankungsbreite der Pflugtiefe und von Pflüger [8] die Streuung der Regelgröße verwendet. In anderen Bereichen der Technik werden zur Beurteilung von Regelungssystemen mit regellosen Stör- oder Führungsgrößen häufig der quadratische Mittelwert der Regelabweichung oder andere Mittelwerte benutzt. Beim quadratischen Mittelwert werden die größeren Abweichungen stärker bewertet als die kleinen, was nach Auffassung der Verfasser nicht im Sinne der hier vorliegenden Aufgabenstellung ist. Der lineare Mittelwert des Fehlers kann für eine Bewertung nicht herangezogen werden, da er, über genügend lange Zeit gebildet, gleich Null ist. Deshalb wurde der Betragsmittelwert der Regelabweichung (Tiefenfehler) als Gütekriterium für die Regelung benutzt, Bild 9. Dieser Mittelwert kann mit dem Analogrechner leicht ermittelt werden, wenn die Regelabweichung auf Magnetband registriert ist.

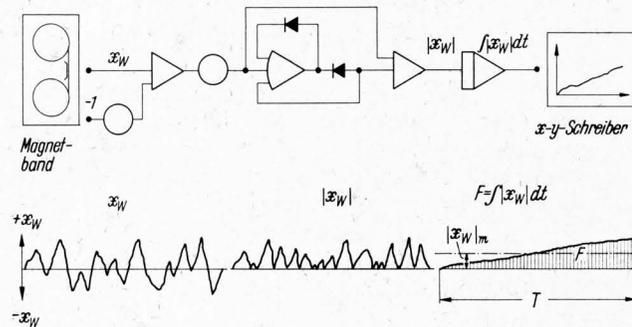


Bild 9. Berechnung der Betragsmittelwerte.

$x_W$  Regelabweichung  
 $|x_W|$  Betrag der Regelabweichung  
 $T$  Integrationszeit  

$$|x_W|_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x_W| dt = \text{Betragsmittelwert der Regelabweichung (Tiefenabweichung)}$$

### 6.2 Feldversuche

Die Befürchtung, daß infolge des dreipunktgesteuerten Magnetventils (Bild 2 und 7) hohe Druckspitzen im Hydrauliksystem auftreten würden, erwies sich als unbegründet, da durch die Trägheit des Ventils ein entsprechend langsamer Druckaufbau stattfindet. Bild 10 zeigt einen Ausschnitt aus einem Oszillogramm, das bei Feldversuchen aufgenommen wurde. An dem Druckverlauf im Hubzylinder sieht man, daß die Druckspitzen beim Einschalten eines Hubvorganges etwa 90 bis 100  $\text{kp/cm}^2$  betragen. Sie liegen damit in der gleichen Größenordnung, wie

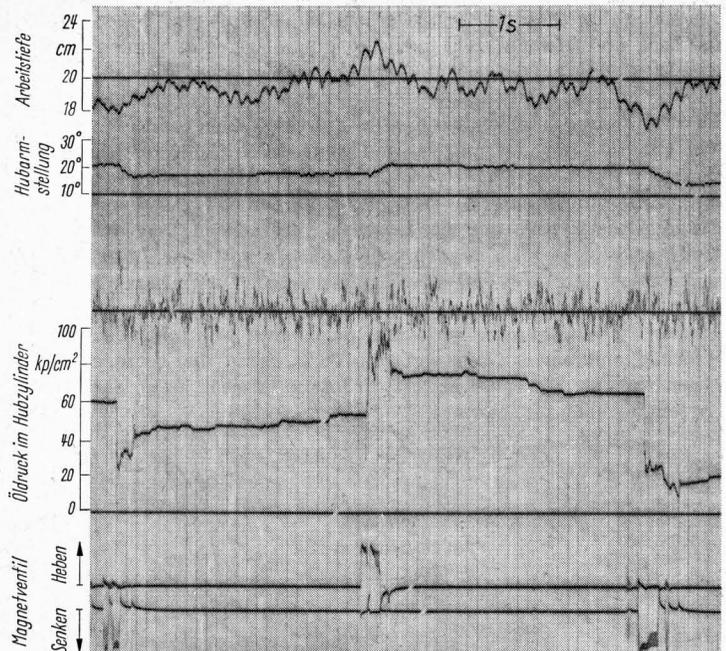


Bild 10. Oszillogrammausschnitt eines Feldversuches.

sie von Seifert [10] an herkömmlichen Regel-Hydraulik-Anlagen gemessen wurden.

Zur Beurteilung der Güte der Regelung im praktischen Einsatz wurde von der bei den Feldversuchen auf Magnetband registrierten Arbeitstiefe des Pfluges mit Hilfe des Analogrechners der Mittelwert  $|x_W|_m$  des Betrages der Tiefenabweichung vom Sollwert  $x_K$  ermittelt (Bild 9).

Die für alle Feldversuche errechneten Betragsmittelwerte der Regelabweichung sind in Bild 11 über der Verstärkung aufgetragen. Mit zunehmender Verstärkung nehmen die Mittelwerte bei allen Versuchen bis auf Werte, die um 1 cm herum liegen, ab. Dieses Optimum der Regelgüte wird bereits bei Verstärkungsfaktoren von 30 bis 40 erreicht. Durch weitere Erhöhung der Verstärkung kann die Regelgüte, wenn alle anderen Parameter konstant gehalten werden, nicht verbessert werden.

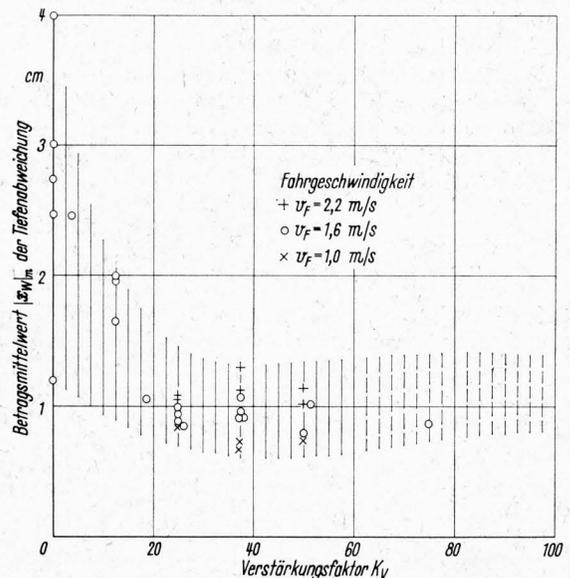
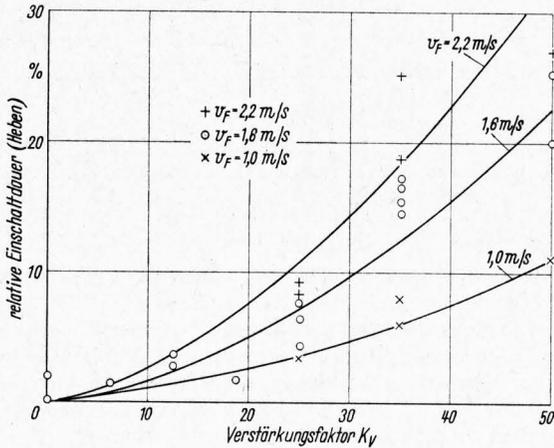


Bild 11. Regelgüte als Funktion der Verstärkung bei den Feldversuchen.

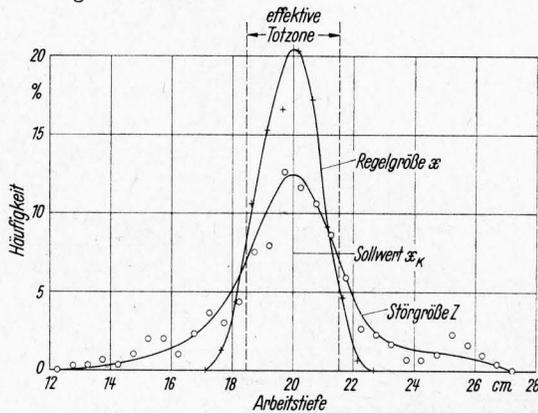
Bei allen Versuchen ist die Regelgüte, die mit Verstärkungsfaktoren  $K_V \geq 15$  erreicht wird, bei einer Solltiefe von 20 cm besser als 10%. Es werden sogar Mittelwerte besser als 5% der Solltiefe erreicht, womit die Brauchbarkeit des Systems hinreichend nachgewiesen ist. Aus den eingetragenen Meßpunkten ist ersichtlich, daß die Regelgüte mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit abnimmt, was auf den Einfluß der Trägheit des Systems, also der Trägheit des Magnetventils und der beschränkten Stellgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Mit stei-

gender Fahrgeschwindigkeit werden die Störungen höherfrequent und können nicht mehr so gut ausgegelt werden. **Bild 12** zeigt die auf die gesamte Versuchszeit bezogene Einschalt-dauer für die Hubvorgänge in Abhängigkeit von der Verstärkung für drei Fahrgeschwindigkeiten. Die Einschalt-dauer wurde aus den Oszillogrammen ermittelt, und zwar durch Addition der Zeiten, in denen der Magnet, der das Ventil auf Heben schaltet, unter Spannung stand. (Es wurden nur die Zeiten für Hubvorgänge addiert, weil nur sie Leistung verbrauchen und das Hydrauliksystem hoch beanspruchen.) Die ermittelten Zeiten streuen sehr stark, so daß die eingezeichneten Kurven nur als grobe Näherung angesehen werden können. Im gesamten Bereich bis zur Stabilitätsgrenze verlaufen die Kurven wahrscheinlich S-förmig, mit einem Grenzwert von 50%, wenn die Totzone gleich Null ist. Dieser Grenzwert wird dann erreicht, wenn das System ungedämpft schwingt.



**Bild 12.** Relative Einschalt-dauer als Funktion von Verstärkung und Fahrgeschwindigkeit.

Da eine regellose Größe durch einen Mittelwert allein nicht hinreichend gekennzeichnet ist, wurde für einige Versuche auch die Amplitudenverteilung der Stör- und der Regelgröße ermittelt. **Bild 13** zeigt die Amplitudenverteilung dieser Größen für einen Versuch mit einer Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 1 \text{ m/s}$  und einem Verstärkungsfaktor  $K_V = 25$ . Im Bild ist die bei der eingestellten Verstärkung vorhandene effektive Totzone eingetragen. Man sieht, daß die Werte, die die Regelgröße annehmen kann, fast auf den Bereich der Totzone zusammengedrängt werden. Außerdem zeigt das Bild, daß die Amplituden der Störgrößen annähernd eine Gaußverteilung haben, was für die Erzeugung einer Ersatzstörung mit einem Rauschgenerator sehr wichtig ist.

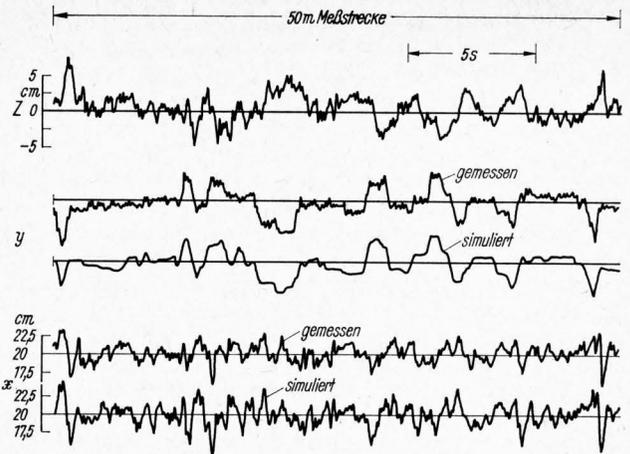


**Bild 13.** Amplitudenverteilung von Stör- und Regelgröße eines Versuches.

Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 1 \text{ m/s}$   
Verstärkungsfaktor  $K_V = 25$

### 6.3 Simulation mit realer Störgröße

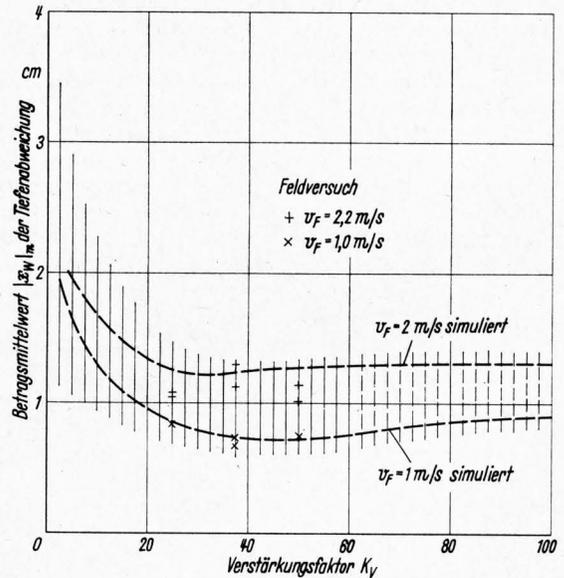
Um die Brauchbarkeit des Analogrechnermodells nach Bild 8 nachzuweisen, zeigt **Bild 14** einen Vergleich zwischen den Ergebnissen eines Feldversuches und einer Simulation mit der bei demselben Feldversuch gewonnenen Störgröße Z. Außer der für beide Fälle gleichen Störgröße sind die Stell- und die



**Bild 14.** Vergleich von Stell- und Regelgrößen beim realen und simulierten Regelungssystem.

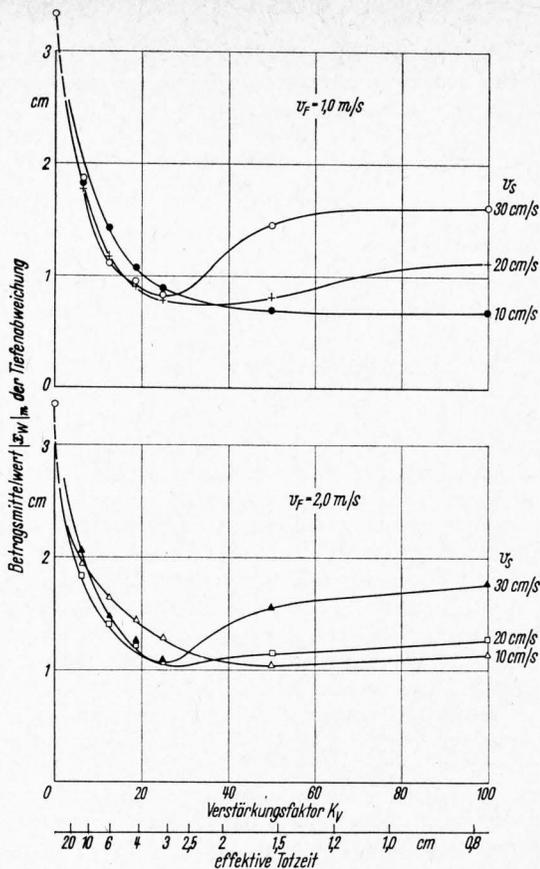
Verstärkungsfaktor  $K_V = 25$                        $x$  Regelgröße (Arbeitstiefe)  
Stellgeschwindigkeit  $v_S = 15 \text{ cm/s}$             $y$  Stellgröße (Hubarmstellung)  
Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 2,24 \text{ m/s}$          $Z$  Störgröße

Regelgrößen für eine 50 m Meßstrecke aufgetragen. Abgesehen von den Oberschwingungen des realen Vorganges weichen die Verläufe der Größen nur geringfügig voneinander ab. **Bild 15** zeigt einen weiteren Vergleich von Ergebnissen der Feldversuche und der Simulation. Das Bild entspricht der Darstellung von Bild 11. Die gestrichelten Linien geben zwei mit dem Analogrechner ermittelte Kurven für die Fahrgeschwindigkeit von 1,0 und 2,0 m/s wieder. Außerdem sind die Meßpunkte für die Geschwindigkeiten  $v_F = 1,0$  und  $2,2 \text{ m/s}$ , die aus Feldversuchen ermittelt wurden, eingetragen. Auch dieses Bild zeigt die gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment.



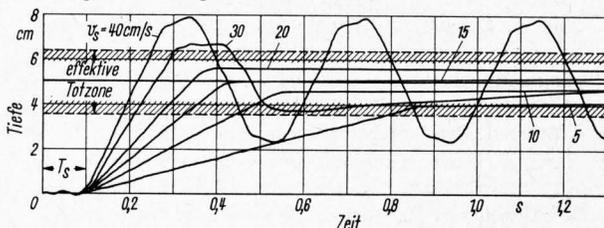
**Bild 15.** Vergleich der Regelgüte von Feldversuch und Simulation für zwei Fahrgeschwindigkeiten.

Den Einfluß der Stellgeschwindigkeit auf die Regelgüte zeigt **Bild 16**. Aufgetragen ist der Betragsmittelwert  $|x_w|_m$  der Regelabweichung über dem Verstärkungsfaktor  $K_V$ . Zusätzlich ist auf der Abszisse die dem Verstärkungsfaktor entsprechende effektive Totzone des Systems aufgetragen. Die Zusammenhänge sind jeweils für drei Stellgeschwindigkeiten  $v_S$  bei konstanter Fahrgeschwindigkeit eingezeichnet. Alle Kurven nehmen von einem Ausgangswert, der sich aus dem Betragsmittelwert  $|x_w|_m$  der Abweichung des unregulierten Pfluges ergibt, mit zunehmender Verstärkung ab und steigen mit einer von der Stellgeschwindigkeit abhängigen Steilheit auf einen Wert wieder an, der dann unabhängig von der Verstärkung konstant bleibt. Diese Zunahme des Fehlers mit steigender Verstärkung ist darauf zurückzuführen, daß das System instabil wird. Diese Instabilität muß im praktischen Betrieb vermieden werden, da sie schlechte Ergebnisse liefert und auch zur Zerstörung des Systems führen kann. Je niedriger die Stellgeschwindigkeit ist,



**Bild 16.** Einfluß der Stellgeschwindigkeit auf die Regelgüte bei einer Simulation mit realer Störgröße.  
Schaltzeit  $T_S$  des Ventils 0,1 s

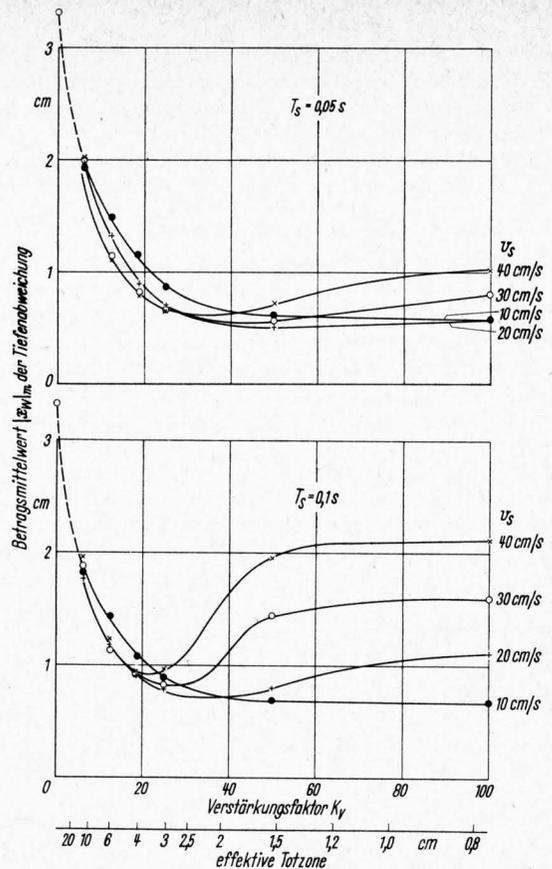
um so geringer ist bei einer bestimmten Verstärkung die Gefahr einer solchen Instabilität. Bei einer Stellgeschwindigkeit von 10 cm/s kann man z. B. noch mit der größten Verstärkung arbeiten. Oberhalb von  $K_V = 50$  ist die Regelgüte allerdings praktisch unabhängig von der Verstärkung. Das spricht für niedrige Stellgeschwindigkeiten von 10 bis 15 cm/s. Stellgeschwindigkeiten von 20 cm/s und mehr sind in der Praxis ohnehin nur für den Hubvorgang zu realisieren, da der Senkvorgang nicht nur von der Hydraulik, sondern auch vom Eindringvermögen der Pflugkörper, vom Pfluggewicht und noch anderen Größen abhängt [1; 2]. Das Bild zeigt sehr deutlich, daß die Regelgüte durch Steigerung der Stellgeschwindigkeit nicht verbessert werden kann. Die erreichbaren optimalen Werte sind bei allen Stellgeschwindigkeiten die gleichen.



**Bild 18.** Übergangsfunktion für einen Sollwertsprung von 5 cm bei verschiedener Stellgeschwindigkeit  $v_S$ .  
 $T_S$  Schaltzeit des Ventils

Eine wichtige Größe, von der die Dynamik des Systems abhängt, ist die Schaltzeit des Magnetventils. Der Unterschied zwischen einer Schaltzeit von 0,05 s gegenüber 0,10 s zeigt **Bild 17** für eine Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 1,0$  m/s. Mit dem schnelleren Ventil läßt sich eine geringfügig größere Genauigkeit der Regelung erzielen, außerdem wird die Gefahr einer Instabilität auch bei höheren Stellgeschwindigkeiten verringert. Besonders deutlich wird, wie wenig das Systemverhalten beim schnellen Ventil noch von der Stellgeschwindigkeit beeinflusst wird. Die Unterschiede sind hier in ganzen Verstärkungsbereich von geringerer Bedeutung.

Da Regelungssysteme im praktischen Betrieb stabil arbeiten müssen, ist es wichtig, die Parameterkombinationen zu kennen, bei denen mit Sicherheit ein stabiles Verhalten erreicht wird.



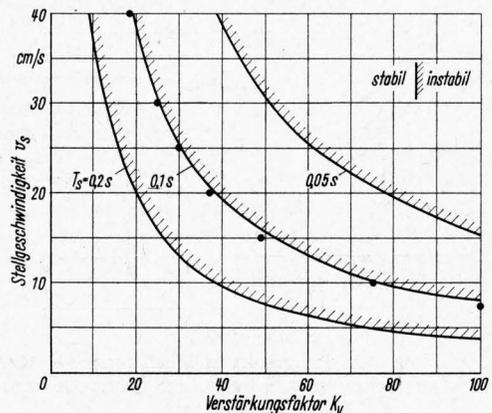
**Bild 17.** Einfluß der Schaltzeit des Ventils auf die Regelgüte bei einer Simulation mit realer Störgröße.  
Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 1,0$  m/s

Praktisch ist Stabilität dann vorhanden, wenn das System nach einem Führungs- oder Störungssprung wieder zur Ruhe kommt. **Bild 18** zeigt einige Übergangsfunktionen der Regelgröße mit verschiedenen Stellgeschwindigkeiten für einen Sprung des Sollwertes von 5 cm. Für Stellgeschwindigkeiten bis 30 cm/s verhält sich das System stabil. Bei einer Stellgeschwindigkeit von 40 cm/s wird es instabil. Die drei wichtigsten Größen, von denen das stabile Verhalten des Systems abhängt, sind die Stellgeschwindigkeit  $v_S$ , der Verstärkungsfaktor  $K_V$  und die Schaltzeit  $T_S$  des Magnetventils.

In **Bild 19** sind für drei Schaltzeiten die Stabilitätsgrenzen für bestimmte Kombinationen von Verstärkung und Stellgeschwindigkeit eingetragen. Für eine Schaltzeit von 0,1 s wurden die Meßpunkte mit dem Analogrechner ermittelt. Die Grenzen für 0,05 und 0,2 s wurden nach einer einfachen Formel ermittelt. Diese Formel lautet:

$$\frac{\text{effektive Totzone}}{\text{Stellgeschwindigkeit } v_S} \geq \text{Schaltzeit } T_S.$$

Diese Gleichung bedeutet: Wenn die Zeit, die die Regelgröße bei einem Übergangsprozeß benötigt, um die Totzone zu durchlaufen, größer ist als die Schaltzeit des Magnetventils, dann verhält sich das System stabil.



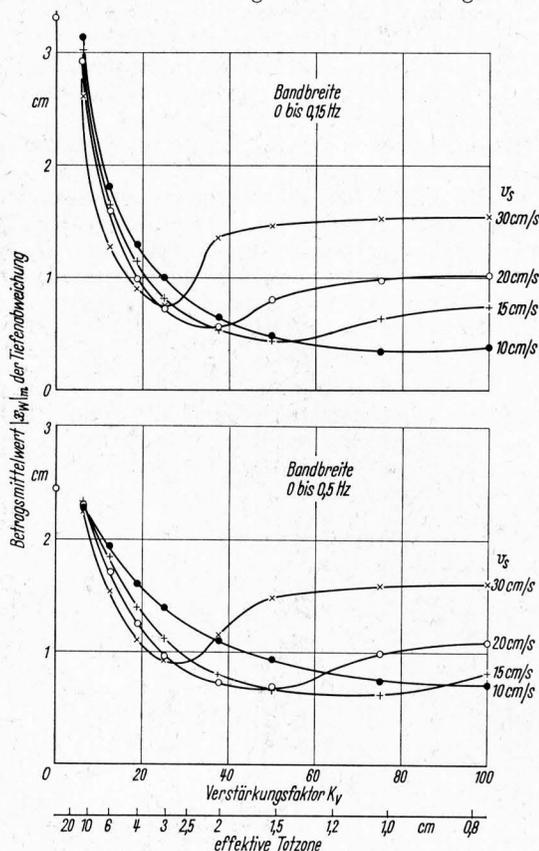
**Bild 19.** Stabilitätsgrenzen des Regelsystems bei verschiedenen Schaltzeiten  $T_S$  des Ventils.

Bei regellosen Führungs- oder Störgrößen arbeitet das System für Kombinationen von Verstärkung und Stellgeschwindigkeit noch stabil, bei denen es bei sprungförmigen Einwirkungen bereits instabil werden würde. Deshalb treten instabile Zustände in Bild 16, 17 und 20 erst bei größeren Werten von Stellgeschwindigkeit bzw. Verstärkung, als in Bild 19, deutlich in Erscheinung.

#### 6.4 Simulation mit künstlicher Störgröße

Wird statt der realen Störgröße aus dem Feldversuch eine künstliche Störgröße aus dem Rauschgenerator eingespeist, so ergeben sich die in Bild 20 gezeigten Ergebnisse. Man sieht, daß der Verlauf der Regelgüte als Funktion der Verstärkung und der Stellgeschwindigkeit prinzipiell dem Kurvenverlauf in Bild 16 und 17 entspricht. Die beiden in Bild 20 gezeigten Ergebnisse wurden mit zwei verschiedenen Einstellungen des Rauschgenerators gewonnen. Im ersten Fall wurde der Generator auf eine Grenzfrequenz von 0,15 Hz eingestellt. Diese Einstellung schien nach einem optischen Vergleich der Störung zu entsprechen, die in der Realität bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s auftrat. In der unteren Bildhälfte wurde die Grenzfrequenz des Generators auf 0,5 Hz eingestellt. Das Signal des Rauschgenerators entsprach bei dieser Einstellung etwa dem realen Signal bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2 m/s. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den entsprechenden aus der Simulation mit dem Magnetband und den Feldversuchen, dann werden mit dem Rauschgenerator kleinere Werte für die Fehler erhalten. Das ist dadurch zu erklären, daß das vom Rauschgenerator erzeugte Signal nicht genau dem in der Realität auftretenden entspricht.

Was aber hier vor allem entscheidend ist, ist die Tatsache, daß der Verlauf der Regelgüte als Funktion der Verstärkung prinzipiell der gleiche ist wie bei den anderen Versuchen, und daß die Optima für die verschiedenen Stellgeschwindigkeiten bei gleichen Werten für die Verstärkung erreicht werden wie bei der Simulation mit einer realen Störgröße. Man kann die Untersuchung eines solchen Systems bei entsprechender Abstimmung des Rauschgenerators also völlig im Laboratorium durchführen und die immer sehr aufwendigen Feldversuche umgehen. Dabei



**Bild 20.** Einfluß der Stellgeschwindigkeit auf die Regelgüte bei einer Simulation mit künstlicher Störgröße aus dem Rauschgenerator.

Die Bandbreite 0 bis 0,15 Hz entspricht einer Fahrgeschwindigkeit  $v_F \approx 1$  m/s und die Bandbreite 0 bis 0,5 Hz entspricht einer Geschwindigkeit  $v_F \approx 2$  m/s

muß auch berücksichtigt werden, daß Rauschgeneratoren definierbare und reproduzierbare Signale erzeugen, was besonders bei vergleichenden Untersuchungen sehr wichtig ist, da das Spektrum der realen Störungen so groß ist, daß es schwierig sein dürfte, sich auf eine repräsentative reale Störgröße festzulegen.

#### 7 Schlußbetrachtung

Die Untersuchung eines elektrohydraulischen Systems zur Regelung der Pflugtiefe hat ergeben, daß es die Forderungen, die bezüglich Tiefenführung gestellt werden, voll erfüllen kann. Dabei ergab sich als wichtiger Vorteil gegenüber den herkömmlichen Systemen eine wesentliche Erleichterung und Vereinfachung der Bedienung.

Trotz der Vernachlässigungen, die bei der Entwicklung eines Modells für die Pflugregelung am Analogrechner gemacht wurden, ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Feldversuchen und einer Simulation des Systems. Die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf das Verhalten des Systems konnten deshalb mit dem Analogrechner ermittelt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, mit welchen Kombinationen der verschiedenen Systemparameter die günstigsten Ergebnisse erreicht werden können. Um bei der Untersuchung ähnlicher Probleme wissenschaftlich gesicherte Ergebnisse zu erhalten, ist es nicht erforderlich, von Feldversuchen auszugehen oder sich die Störgrößen, die auf solche Systeme einwirken, durch Versuche zu beschaffen. Auch diese in der Realität auftretende Störung kann man mit einem Rauschgenerator, der entsprechende Einstellmöglichkeiten hat, simulieren. Das hier gewählte Beispiel einer reinen Pflugtiefenregelung stellt nur eine Anwendungsmöglichkeit des untersuchten Regelungssystems dar. Es wäre ebenso für Pflugregelungen verwendbar, bei denen andere Regelgrößen allein oder in Form einer Mischregelung verwendet werden. Aber auch für ganz andere Aufgaben ist ein solches System verwendbar, beispielsweise für die Höhenführung von Schneid- oder Aufnahmeorganen an Erntemaschinen oder auch für die Regelung der Lage von Planierschilden im Bereich der Baumaschinen.

#### 8 Schrifttum

Bücher sind mit ● gekennzeichnet

- [1] Batel, W.: Grundsätzliche Überlegungen zur Automatisierung der landwirtschaftlichen Produktion. Grndl. Landtechn. **18** (1968) Nr. 1, S. 14/20.
- [2] Cowell, P. A., und S. C. Lenn: Field performance of tractor draught control systems. J. Agric. Engng Res. **12** (1967) Nr. 3, S. 205/21.
- [3] Friebe, E.: Dreipunktregler mit minimaler Schaltheufigkeit. Siemens-Z. **34** (1960) H. 10, S. 578/81.
- [4] ● Giloi, W.: Simulation und Analyse stochastischer Vorgänge. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag 1967.
- [5] ● Giloi, W., und R. Lavber: Analogrechnen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verl. 1963.
- [6] Hesse, H.: Aufbau und Wirkungsweise elektrohydraulischer Regelsysteme. Grndl. Landtechn. **18** (1968) Nr. 1, S. 27/34.
- [7] MacDonald, A. T., und E. Thompson: A road grader with automatic blade control. Transact. Soc. Instrument Technology **19** (1967) Nr. 4, S. 179/86.
- [8] Pflüger, W.: Tiefenhaltung und ökonomischer Nutzen bei Anwendung der Regelhydraulik an Traktoren. Dt. Agrartechn. **17** (1967) H. 1, S. 37/38; H. 2, S. 87/89; H. 3, S. 139/40 und H. 4, S. 182/84.
- [9] ● Schlitt, H.: Stochastische Vorgänge in linearen und nichtlinearen Regelkreisen. Braunschweig: Vieweg-Verl. 1968.
- [10] Seifert, A.: Untersuchungen von drei Systemen regelnder hydraulischer Kraftheber beim Pflügen wechselnder Böden. Grndl. Landtechn. **15** (1965) Nr. 4, S. 107/15.
- [11] Wollschläger, U.: Hydraulische Steuerungssysteme im Fahrzeugbau. ölhydraulik u. pneumatik **11** (1967) Nr. 6, S. 219/24.
- [12] Zabeltitz, Chr. von: Meß- und Übertragungsprobleme bei der Automatisierung in der Landtechnik. Grndl. Landtechn. **18** (1968) Nr. 1, S. 21/27.
- [13] Deutsches Patent Nr. 1198 103.
- [14] Deutsches Patent (Auslegeschrift) Nr. 1183 295.