

# Übertragungsverhalten einer Meßeinrichtung zum Erfassen landwirtschaftlicher Bearbeitungsgrenzen mit Hilfe von Ultraschall

Dipl.-Phys. F. Ahrens, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg

## 1. Einleitung

Zum Erfassen einer Leitlinie als Führungsgröße, die durch ein mobiles Aggregat (z. B. Traktor und Anbaugerät) im vorhergehenden Arbeitsgang erzeugt wird, eignen sich vor allem bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten aus bekannten Gründen berührungslose Meßverfahren [1]. Wird die Führungsgröße mit entsprechender Genauigkeit erfaßt, ist es möglich, den Arbeitsbreitenanschluß nach den agrotechnischen Forderungen (ATF) durch einen Lenkregelkreis zu sichern [2]. Die Anwendung physikalisch möglicher berührungsloser Meßverfahren wird durch den Einsatzfall und sicherheitstechnische Bedingungen eingeschränkt. Für die Meßwerterfassung an Bearbeitungsgrenzen, die in der Pflanzenproduktion entstehen, erscheinen deshalb optische und akustische Meßverfahren geeignet. Optische Meßfühler können gute dynamische Eigenschaften und ein hohes räumliches Auflösungsvermögen, Vorteile beim Nachweis von Leitlinien größerer Arbeitsbreite und bei der Realisierung der Meßeinrichtung für möglichst breite Einsatzgebiete haben. Deshalb ergibt sich für akustische Meßfühler unter Vermeidung technisch-ökonomisch aufwendiger Lösungen z. Z. nur ein sehr eingeschränktes Anwendungsgebiet. Das Erfassen von Bearbeitungsgrenzen mit ausgeprägten Höhendifferenzen mit Hilfe von Ultraschall ist mit einer stationären Meßunsicherheit von  $\pm 20$  mm möglich [3]. Die Meßgenauigkeit liegt damit innerhalb der geforder-

ten Grenzen für die Erzielung des Arbeitsbreitenanschlusses von mobilem Aggregat und Anbaugerät nach ATF. Furchen oder Dämme können als Führungsgröße mit Ultraschall einfach erfaßt werden [4, 5]. Ein tageszeitunabhängiger Einsatz der Meßeinrichtung ist problemlos.

## 2. Störgrößen bei der Meßwerterfassung

Die Meßeinrichtung läßt sich als Übertragungsglied in den Regelkreis einordnen (Bild 1). Sie erfaßt die durch Störungen  $z_1$  verursachten Fahrkurswinkelländerungen  $\epsilon$  der Regelstrecke bzw. die Fahrkursabweichungen  $x$  als Regelgröße. Die jeweilige Fahrkursabweichung ist be-

Tafel 1. Auswirkungen von Störungen  $z_2$  auf die Meßwerterfassung

Störungen $z_2$	Auswirkungen auf die Meßwerterfassung
— Aggregateigenbewegung Rollen, Nicken, Hubbewegung	Schallwinkeländerungen und Änderungen des Meßabstands
Fahrbewegung in Bearbeitungsrichtung	geschwindigkeitsabhängige spektrale Verbreiterung des Echoempfangssignals
Fahren am Hang	Schallwinkeländerung
— Ultraschallausbreitungseigenschaften des Mediums Wind, Staub	Dämpfung der Energiestrahlung im Ausbreitungsmedium
— Ultraschallreflexionseigenschaften des Bodens Bodendichte, Bodenfeuchte und Oberflächenstruktur	Dämpfung der Energiestrahlung am Boden, ständige Änderung der Empfangsenergie und der Signalform der Echos
undefinierte Furche	Leitlinie nicht nachweisbar

Fortsetzung von Seite 103

- steuern — regeln 20 (1977) H. 12, S. 662—667.
- [6] Kollar, L.: Automatisierung in der Landwirtschaft. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
- [7] Hintze, K.: Die Anwendung des Omega-Funknavigationsverfahrens für die Standortbestimmung auf See. radio — fernsehen — elektronik 24 (1975) H. 8, S. 271—273.
- [8] Schirman, J.D.: Theoretische Grundlagen der Funkortung. Berlin: VEB Militärverlag der DDR 1977.
- [9] Jahns, G.: Möglichkeiten zum Erzeugen von Kurssignalen für das automatische Lenken von Landfahrzeugen. Grundlagen der Landtechnik 20 (1970) H. 3, S. 65—71.
- [10] Mac Hardy, F. V.: An automatic guidance system for farm tractors. Can. Agric. Engng. Bd. 9 (1967) Nr. 1, S. 17-19.
- [11] Batel, W.: Grundsätzliche Überlegungen zur Automatisierung der landwirtschaftlichen Produktion. Grundlagen der Landtechnik 18 (1968) Nr. 1, S. 14—20.
- [12] Kollar, L.: Studie zur technischen Realisierung eines Systems zum selbsttätigen Einhalten des Arbeitsbreitenanschlusses der Werkzeuge einer Bodenbearbeitungs- und Bestellmaschine. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, 1971 (unveröffentlicht).
- [13] Berfeld, D.: Statistische Ermittlung der Übertragungsfunktionen mobiler Aggregate unter Einsatzbedingungen zur Beschreibung des Lenkverhaltens. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. November 1979.
- [14] Reiner, A.; Wiegand, R.: Überblick über Algorithmen zur digitalen Regelung. Regelungstechnik 24 (1976) H. 6, S. 181—226; H. 7, S. 227—232.

A 2636

Bild 1  
Meßeinrichtung im Regelkreis;  
 $z_1, z_2$  Störgrößen,  
 $\beta$  Lenkwinkel  
 $\epsilon$  Fahrkurswinkel  
 $x$  Meßgröße ( $\Delta$  Fahrkursabweichung)

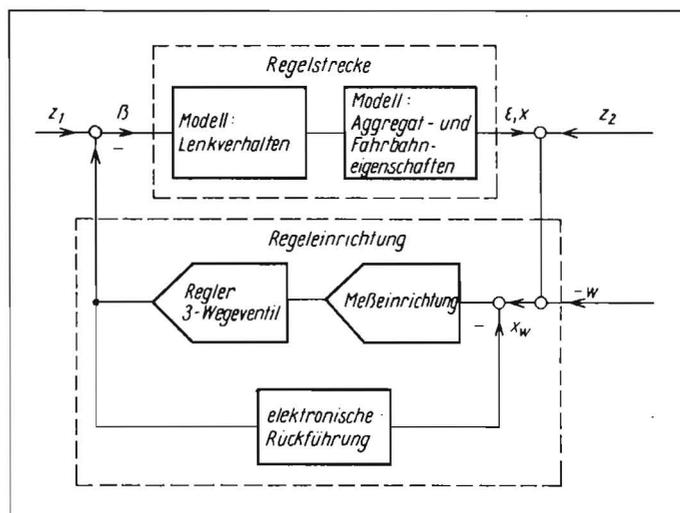
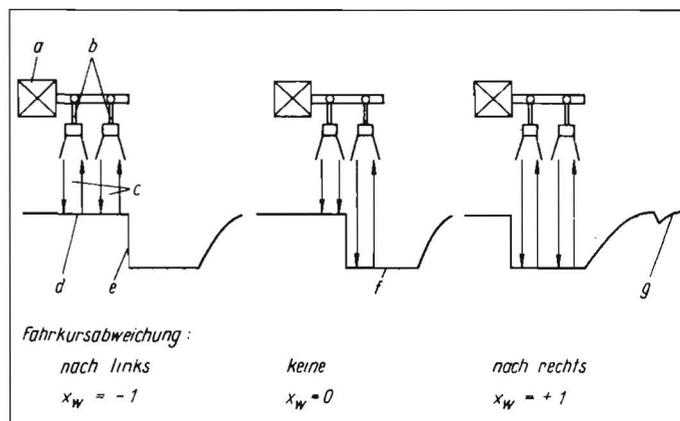


Bild 2  
Führungsgrößenvorgabe an der Furche:  
a Ausleger  
b Meßfühler  
c Schallfeld  
d unbearbeiteter Boden  
e Furchenkante  
f Furchensohle  
g bearbeiteter Boden



kannt, wenn z. B. der Abstand bzw. die seitliche Verschiebung der Aggregatlängsachse zur Profilkante eines Bezugssystems bestimmt sind. Durch eine starre Kopplung des Meßfühlers an das mobile Aggregat mit Hilfe eines Auslegers läßt sich die Führungsgröße bei entsprechender Positionierung der Ultraschallgeber über der Pflugfurche erfassen (Bild 2). Als Meßinformation liegen für diesen Fall eine vorhandene Fahrkursabweichung und deren Richtung als diskretes Mehrpunktsignal (3-Punkt- und 5-Punkt-Verhalten) vor. Die Einsatzgrenzen der Meßeinrichtung werden durch auftretende Störungen  $z_2$  beeinflusst (Tafel 1) [6].

### 3. Zum Übertragungsverhalten einer akustischen Meßeinrichtung

#### 3.1. Modellbildung

Für die Festlegung des Übertragungsverhaltens der Meßeinrichtung ist die Kenntnis des Einflusses der Störungen  $z_2$  auf die Meßwertfassung notwendig [7]. Die Probleme der Ultraschallausbreitung und -reflexion sind von denen der Informationsauswertung zu trennen. Systemtheoretische Betrachtungsweisen haben sich bei der Bestimmung der Eigenschaften des Ausbreitungskanals (Antenne — Übertragungsmedium — Boden — Übertragungsmedium — Antenne) durchgesetzt. Das Empfangsecho setzt sich zusammen aus dem Sendesignal und der Impulsreaktion des Bodens. Mit gewissen Einschränkungen ist für die Übertragungsglieder der Informationsverarbeitung (selektiver Verstärker, Impulsformer, Logik) ein Modell als Meßinformationssystem ableitbar, wobei die Kennfunktionen Übertragungsfehler, Tastfrequenz und Parameterempfindlichkeit optimiert werden können (Bild 3) [8]. Ein hoher Informationsfluß  $n_e(t)$  bei minimalem Meßfehler  $\epsilon(t)$  ergibt sich, wenn die Übertragungsfunktion  $G(\omega)$  der Meßeinrichtung dem Spektrum des Eingangssignals, bestehend aus den Spektren des Nutzsignals  $P_{ne}(\omega)$  und des Störsignals  $P_{re}(\omega)$  (Einfluß der Störungen  $z_2$ ), angepaßt wird. Die Übertragungseigenschaften beider Systeme (Ausbreitungskanal und Informationsverarbeitungskanal) bestimmen die erreichbare Meßgenauigkeit der Einrichtung. Alle Einflußfaktoren können durch die verwendeten Modellansätze nicht berücksichtigt werden. Eine experimentelle Untersuchung der Einflüsse ist notwendig, um die Güte der Modelle abzuschätzen und die Zulässigkeit der vereinfachten Randbedingungen zu überprüfen. Um Echosignale über einer Mindestschwelle nachweisen und auswerten zu können, muß eine energetische Betrachtung des Reflexionsverhaltens von Ackerböden im Aufnahmebereich der Furche durchgeführt werden. Die mittlere Signalintensität ist zu bestimmen, die bei der Reflexion an rauen Oberflächen von Zeit, Sendeleistung, Dauer und Form der Sendesignale, Richtung der Sende- und Empfangsantennen sowie Streueigenschaften des Bodens abhängt. Bei Annahme unregelmäßig verteilter diskreter Streuer, deren mittlere Anzahl innerhalb des beschallten Oberflächenvolumens konstant ist, läßt sich ein statisches Modell für die Eigenschaften der Rückstreuung genähert angeben, das dem Wahrscheinlichkeitscharakter des Schallstreuungsprozesses und den akustischen Eigenschaften der Streuer Rechnung trägt. Für Oberflächenrauigkeiten kleiner bzw. größer als die Sendewellenlänge lassen sich entsprechend verschiedene Reflexionskoeffizienten angeben. Sie sind vom Schalleinfallswinkel sowie von den reflexionsbestimmenden Bodenparametern Bodenrauig-

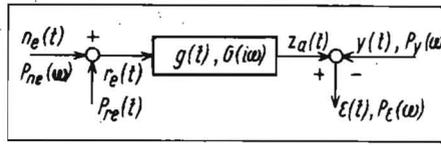


Bild 3. Meßeinrichtung als Informationsübertragungssystem;  $n_e(t)$  Eingangsinformation,  $z_a(t)$  Ausgangsinformation,  $\epsilon(t)$  Übertragungsfehler,  $y(t)$  Meßinformation

keit und Bodendichte abhängig. Der Einfluß der Bodenfeuchte wird durch dieses Modell direkt nicht erfaßt. Auch der Einfluß einer hohen Staubkonzentration und eines Windgradienten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schallfeldes im Ausbreitungsmedium läßt sich modellmäßig schwer erfassen. Ihr Einfluß muß unter Laborbedingungen experimentell ermittelt werden. Ein Vergleich der theoretischen und experimentellen Ergebnisse der Einflußfaktoren ermöglicht eine Abschätzung der Güte des Modells und der Verallgemeinerungsfähigkeit auf die Einsatzbedingungen realer Ackerböden für den Aufnahmebereich der Furche. Die Eigenschaften des Ausbreitungskanals sind damit bekannt, und eine Energiebilanz, umgerechnet auf Schalldruckpegel, kann angegeben werden (Bild 4).

#### 3.2. Einfluß der Störgrößen

Die richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften des Bodens müssen bestimmt werden. Dazu sind die Bodenparameter Oberflächenrauigkeit, Dichte und Feuchte entsprechend dem neuen Untersuchungsgegenstand zu definieren und mit Meßmitteln reproduzierbar zu erfassen. Eine möglichst berührungslose Erfassung der Bodenrauigkeit bereitet dabei große Schwierigkeiten. Die gesuchte Meßgröße (richtungsabhängige Reflexionseigenschaft des Bodens) könnte über physikalische Vorgänge, wie Reflexion, Brechung, Absorption, Interferenz usw., die mit den tatsächlich gesuchten Kenngrößen des Bodens verknüpft sind, bestimmt werden. Es könnte z. B. möglich sein, die Bodenrauigkeit durch Auswertung der Anzahl der Licht-Schattenzonen, die bei definiertem Lichteinfall an der Bodenoberfläche entstehen, zu erfassen. Eine Umrechnung auf eine dimensionslose Kennzahl (fraktionierte Dimension) wäre ebenfalls möglich [9]. Die Bestimmung der Reflexionskoeffizienten unter Laborbedingungen am Modellboden (z. B. definierte Aggregatgrößen) ist infolge der miteinander korrelierenden Bodenparameter zweckmäßiger als Messungen auf dem Feld. Die Werte der Bodenparameter sind denen unter realen Einsatzbedingungen vorkommenden möglichst gut anzupassen und in den daraus ableitbaren Grenzen zu variieren. Die Stör-

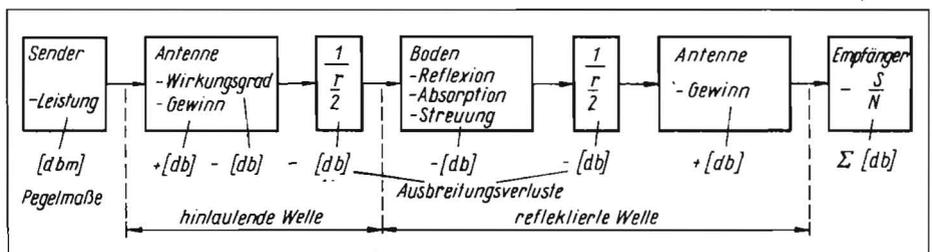
größen, resultierend aus der Aggregateigenbewegung, müssen unter Einsatzbedingungen ermittelt werden. Dazu eignen sich kreiselgestützte Beschleunigungsaufnehmer, die unmittelbar am Ort des Meßfühlers befestigt sind.

Die Vergrößerung der Empfangsechobandbreite durch die Aggregatbewegung in Fahrtrichtung ist nach dem Dopplereffekt fahrgeschwindigkeitsabhängig. Die entstehenden Frequenzdifferenzen können berechnet und auch meßtechnisch nachgewiesen werden. Durch den Vergleich der Meßergebnisse ist eine Abschätzung des Einflusses der Störungen  $z_2$  auf die Meßwertfassung möglich und die zu entwerfende Meßeinrichtung bezüglich ihrer einzelnen Übertragungsglieder optimierbar.

#### 3.3. Konzeption der Meßeinrichtung

Um Signallaufzeitdifferenzen, die durch unterschiedliche Meßabstände zwischen Meßfühler und Boden (Profilkante) entstehen, auszuwerten, ist ein Impulselbetrieb der Ortungsanlage notwendig. Der monostatische Betrieb verringert zugleich Störungen, die durch die akustische Kopplung zwischen Sende- und Empfangsschallfeld entstehen. Durch die Bandbreite des Sendesignals werden die Reflexionseigenschaften des Bodens festgelegt. Die Eigenschaften piezoelektrischer Schallwandler erfordern bei maximaler Empfindlichkeit eine schmalbandige Erregung. Dadurch wird eine sendesignalgetreue Reflexion ermöglicht, wenn eine Konstanz der räumlichen Lage der verteilten Bodenaggregate als Einzelstreuer während der Sendesignaldauer vorausgesetzt wird. Der störende Einfluß der Interferenzbildung wird bei schmalbandiger Erregung allerdings verstärkt. Der Empfänger ist so zu optimieren, daß das Echosignal mit einem der Energiebilanz entsprechenden Mindeststörabstand ausgewertet werden kann. Der Dynamikumumfang für die Signalaufbereitung ist aus der Variationsbreite der Reflexionskoeffizienten für unterschiedliche Bodenzustände ableitbar. Die stationäre Meßgenauigkeit wird entscheidend durch die Richtcharakteristik der Sender-Empfänger-Antennen und ihre räumliche Anordnung über dem Aufnahmebereich der Furche bestimmt. Die Antennen (Ultraschallschwinger) sind durch Schallreflektoren so zu verändern, daß sich ihr Gewinn erhöht, die Furchengeometrie mit der geforderten Genauigkeit erfaßt und der Einfluß der Aggregateigenbewegung auf die Meßwertfassung reduziert werden können. Die Störungen infolge der Aggregateigenbewegung und die dem Meßabstand zur Furche proportionale Abtastfrequenz bestimmen die dynamische Genauigkeit der Meßeinrichtung. Bei Kenntnis der am Eingang des Empfängers wirkenden Störungen ist eine Optimierung der Meßeinrichtung als Meßinformationssystem durch Minimierung des Übertragungsfehlers

Bild 4. Energiebilanz;  $r$  Abstand zwischen Sende-/Empfangsantenne und Boden,  $S/N$  Echosignalausgang



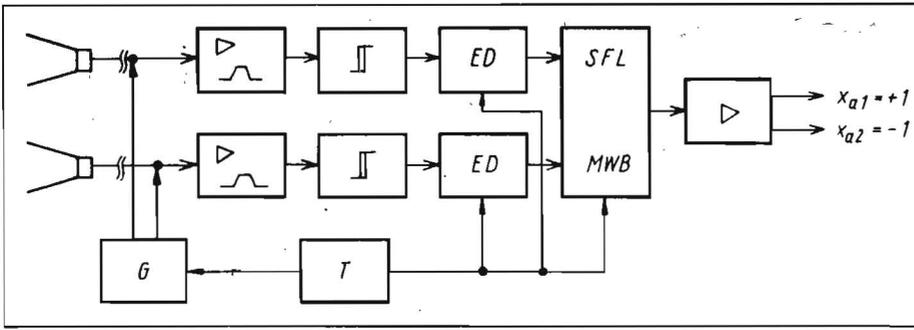


Bild 5. Meßeinrichtungsaufbau; ED Entfernungsdiskriminator, SFL Spurfehlerlogik, MWB Mittelwertbildner

möglich. Die Meßunsicherheit der übertragenen Information kann durch mittelwertbildende Übertragungsglieder verkleinert werden.

Eine Erhöhung der Störfestigkeit durch signalangepaßte Empfängerstrukturen, wie Optimalfilter, Laufzeitkorrelatoren oder Barker-codierung, erscheint z. Z. zu aufwendig.

#### 4. Aufbau der Meßeinrichtung

Um die zur Mittelwertbildung notwendigen längeren Meßzeiten teilweise zu kompensieren, arbeitet die Meßeinrichtung mit unterschiedlichen Arbeitsfrequenzen ( $f_1 = 37 \text{ kHz}$ ,  $f_2 = 45 \text{ kHz}$ ) im Echtzeitbetrieb (Bild 5). Die piezoelektrischen Geber wurden als Hornantennen ausgebildet und in ihrer Richtcharakteristik der Furchengeometrie bei einem optimalen Meßabstand von 500 mm über der Furchenkante angepaßt. Der geometrische Abstand beider Sender-Empfänger-Gruppen senkrecht zur Furchenkante kann variiert werden, so daß sich für den Regler als freier Parameter die Totzone verändern läßt. Mit einer maximalen Abtastfrequenz von rd. 200 Hz werden die Schallaufzeiten elektronisch klassiert und als Regelabweichung von der Leitlinie einem noch anzupassenden Regler als diskretes Mehrpunktsignal (3-Punkt- oder 5-Punkt-Kennlinie) bereitgestellt.

#### 5. Anpassung der Meßeinrichtung an den Lenkregelkreis

An den Einheitssignalpegelbereich (TTL) der Meßeinrichtung ist ein geeigneter Regler anzupassen. Die freien Einstellparameter der möglichen Reglerstrukturen (Schaltamplitude, Totzone, Hysterese, Rückführverstärkung, Rückführzeitkonstante) können durch Simulation z. B. auf einem Analogrechner optimiert werden, wenn eine Approximation der Regelstrecke, eine Abschätzung des Grenzfrequenzverhältnisses für die Störungen und für die Regelstrecke sowie der Angriffsort der Störungen bekannt sind. Der Lenkregelkreis arbeitet optimal, wenn die an eine Lenkung gestellten Forderungen [2] möglichst bei allen in Frage kommenden Fahrgeschwindigkeiten erfüllt werden. Bei Verwendung von unstetigen Reglern sind prinzipiell schlechtere Reglergebnisse als bei der Verwendung stetiger Regler zu

erwarten. Erst im Feldeinsatz ist die Möglichkeit gegeben, zu überprüfen, ob für die in Laboruntersuchungen optimierte Meßeinrichtung mit Mehrpunktverhalten eine anpaßbare Reglerstruktur existiert, so daß reale Störungen als Fahrkursabweichung ausgeregelt werden können und damit der Arbeitsbreitenanschluß nach ATF möglich wird. Dabei kann sich die durch die Knicklenkung des K-700 vorhandene mechanisch starre Rückführung der Regelgröße in Verbindung mit einem optimalen Vorhalt mit Hilfe eines Auslegers vorteilhaft auswirken.

#### 6. Bisherige Meßergebnisse und Schlußfolgerungen

Unter Laborbedingungen (Modellboden, Modellprofilkanten) bei Variation der Parameter Bodenzustand, Meßabstand sowie Öffnungswinkel der Meßfühler konnte die Meßeinrichtung (Meßfühler, Signalverarbeitungsstufen) soweit optimiert werden, daß die stationäre Meßgenauigkeit innerhalb der geforderten Grenzen der ATF lag. Die Baugruppen der Informationsaufbereitung und -verarbeitung konnten schaltungstechnisch so ausgelegt werden, daß sie eine Parameterunempfindlichkeit bezüglich der unter Einsatzbedingungen existierenden Temperatur- und Betriebsspannungsschwankungen haben. Die Störfestigkeit konnte durch mittelwertbildende Impulsstufen und codierte Impulsverarbeitung erhöht werden. Bei längeren Störungen der Meßwert-erfassung ist ein Havarieschutz wirksam.

Nach den Einstellparametern der Analogrechnersimulation ist der Lenkregelkreis zu optimieren und die dynamische Meßgenauigkeit der Einrichtung im Feldeinsatz zu ermitteln. Es ist zu überprüfen, ob eine Erweiterung des Mehrpunkt-Übertragungsverhaltens (5-Punkt-Kennlinie) sich vorteilhaft auf das Reglergebnis auswirken kann.

#### 7. Zusammenfassung

Die Einsatzgebiete akustischer Meßeinrichtungen sind begrenzt. An Leitlinien mit definierten Höhenunterschieden im Verlauf des Bodenprofils (z. B. Pflugfurche) ist eine automatische Lenkung mobiler Aggregate mit derartigen Meßeinrichtungen möglich, wenn der vorhandene Höhenunterschied z. B. durch Vergleich

der Echosignallaufzeiten für die im Aufnahmebereich reflektierte Strahlung erfaßt wird. Unter Vermeidung von ökonomisch und technisch zu aufwendigen Meßverfahren kann die Information über eine vorhandene Fahrkursabweichung und deren Richtung als diskretes Mehrpunktsignal gewonnen werden. Der Meßfühler ist dabei in geringem Abstand über der Furche zu positionieren und über einen Ausleger starr an das mobile Aggregat zu koppeln. Die Übertragungseigenschaften der Meßeinrichtung sind zu optimieren. Dazu ist die Kenntnis der Auswirkungen der auf die Meßwert-erfassung einwirkenden Störungen notwendig. Durch eine Modellbildung für die Meßeinrichtung werden mögliche Einflußgrenzen der Störungen abgesteckt und Meßprinzipien zu ihrer Erfassung vorgeschlagen. Eine den ATF gerecht werdende Regelung der Genauigkeit des Arbeitsbreitenanschlusses über den Lenkregelkreis des mobilen Aggregats ist nur möglich, wenn alle freien Parameter der Meßeinrichtung und des anzupassenden Reglers bezüglich der zu erwartenden Einsatzbedingungen optimiert werden.

#### Literatur

- [1] Kollar, L.: Beitrag zur Entwicklung einer Einrichtung zum selbständigen Einhalten des Arbeitsbreitenanschlusses der Werkzeuge einer Bodenbearbeitungs- und Bestellkombi. TH Magdeburg, Diplomarbeit 1971.
- [2] Kollar, L.: Gründe und Möglichkeiten für die automatische Lenkung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate. agrartechnik 30 (1980) H. 3, S. 95—98.
- [3] Uhlig, T.: Berührungsloser Nachweis natürlicher Leitlinien der Pflanzenproduktion mit Hilfe von Ultraschall. agrartechnik 28 (1978) H. 12, S. 563—565.
- [4] Uhlig, T.: Regelungsanordnung, DE OS 2241682 605 d 1/03, Ausgabeta 24. August 1972.
- [5] Schabonow, W. M.: Einrichtung für die automatische Lenkung der Bewegung eines Traktoragregates. SU PS 231917, A 01 B 69/04, Ausgabeta 28. November 1968.
- [6] Ahrens, F.: Probleme bei der Meßwert-erfassung an Furchen oder Dämmen mit Hilfe von Ultraschall zum Lenken mobiler Aggregate. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. November 1979.
- [7] Ahrens, F.: Optimierung des Übertragungsverhaltens einer Meßeinrichtung zum Erfassen von Bodenbearbeitungsgrenzen mittels Ultraschall. Regelungstechnisches Kolloquium der TU Dresden 1980.
- [8] Krauß, U.; Woschni, E.-G.: Meßinformationssysteme. Berlin: VEB Verlag Technik 1975.
- [9] Stoyan, D.: Die nicht-ganzzahlige Dimension. wissenschaft und fortschritt 28 (1976) H. 12, S. 476—479.