

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

Berührungslos arbeitende Abstandssensoren in der Landtechnik

Von Christian Thomas, Berlin*)

DK 621.317:531.71

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

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

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

Inhalt

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

1. Einleitung

Senkung der Produktionskosten, Steigerung der Produktqualität sowie Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit teurerer Maschinen und Entlastung des Menschen sind wichtige Ziele der fortschreitenden Automatisierung in der Landtechnik. Die Verwirklichung der notwendigen Steuer- und Regelsysteme scheidet jedoch häufig am Fehlen geeigneter Sensoren. Insbesondere besteht ein Bedarf an berührungslos arbeitenden Sensoren, die an geeigneter, d.h. vor allem geschützter Stelle angebracht werden können [1, 2].

In vielen Fällen werden berührungslos arbeitende Abstandssensoren benötigt, für die drei Anwendungsbereiche definiert werden können:

- Abstandsregelung
- Hinderniserkennung
- Kursführung.

Beispiele für den Einsatz der Abstandsregelung sind gegeben bei Übergabeförderern von Kartoffelerntemaschinen, bei denen eine gleichbleibende Fallhöhe der Kartoffeln sichergestellt wird [3, 4], oder für Tiefenregelsysteme zur Bodenbearbeitung, bei denen unmittelbar die Arbeitstiefe erfaßt wird [5].

Die Vorsatzgeräte von Erntemaschinen, wie Schneidwerke und Aufnehmertrommeln sollen das Bodenprofil mit konstantem Abstand überfahren. Bei ungünstigen Ernteverhältnissen ist der Fahrer schnell überfordert in der Aufgabe, Bodenhindernisse frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Werden die bodennahen Arbeitsorgane von einem Regelsystem geführt, das die Abstände zum Bodenprofil mit Sensoren laufend erfaßt und konstant hält, können Beschädigungen vermieden werden.

Zur Lenkhilfe beim Pflügen können mit Hilfe zweier dicht nebeneinander angeordneter Abstandssensoren, die einmal den Abstand zur Furchensohle, zum anderen den Abstand zum ungepflügten Boden ermitteln, Kursabweichungen der Schlepper erkannt und über einen Regler korrigiert werden [6].

Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, mittels mechanischer oder elektromechanischer berührender Abstandssensoren zu arbeiten, wie z.B. von *Townsend u.a.* beschrieben [7]. In der Praxis haben sich diese Systeme jedoch wegen verschiedener Mängel nicht durchsetzen können. In diesem Beitrag sollen daher die Verfahren zur berührungslosen Abstandsmessung dargestellt werden.

Die im weiteren vorgestellten Infrarot- und Ultraschall-Abstandssensoren sowie das Anwendungsbeispiel des lage- und höhengeregelten Feldspritzgestänges sollen Anregungen zu weiteren Entwicklungen geben.

2. Physikalische Prinzipien der Abstandssensoren unter besonderer Berücksichtigung mittlerer Abstandsbereiche

2.1 Übersicht

Viele industrielle Aufgaben bedingen das berührungslose Messen von Abständen, z.B. beim Einsatz von Handhabungsautomaten [8]. Die Meßtechnik hat schnell gelernt, verschiedene physikalische Prinzipien für Abstandsmeßsysteme zu nutzen. Die vielfältigen in der Prüftechnik angebotenen Sensorsysteme messen, angepaßt an die Bedürfnisse der industriellen Fertigung, meist nur im Nahbereich bis ca. 10 cm.

Zur Ortung und Navigation für zivile und militärische Zwecke gibt es wiederum eine große Zahl Fernmeßsysteme im Bereich über 10 m bis zu mehreren hundert Kilometern. Im für die Landtechnik interessanten Mittelbereich über 10 cm bis 10 m werden nur sehr wenige Abstandssensoren angeboten. Um einen Überblick über die heute ausgenutzten physikalischen Grundprinzipien zu gewinnen, zeigt **Tafel 1** eine Zusammenstellung mit Auflistung der Emittierer und Detektoren.

Die vier klassischen und weitverbreiteten Verfahren zur berührungslosen Abstandsmessung in der industriellen Meßtechnik, die

induktiven, kapazitiven, magnetischen und pneumatischen Verfahren (Spalten 4 bis 7 der Tafel), sind im Bereich der Landtechnik nicht oder nur sehr eingeschränkt geeignet und werden im weiteren nicht näher beschrieben.

2.2 Ultraschall-Sensoren

Mit Ultraschall bezeichnet man mechanische Schwingungen, deren Frequenzen oberhalb 20 kHz liegen. Die benutzten Frequenzen reichen zum Teil über 10 MHz hinaus. Im Ausbreitungsmedium Atmosphäre gelten die gleichen Gesetze der Akustik wie für den Bereich des hörbaren Schalles von 16 bis 20000 Hz. Ultraschall findet Anwendung zum Reinigen, Schweißen, Bearbeiten und Umformen sowie zum Messen, Orten und zur Nachrichtenübertragung [9].

Zur Realisierung einer Abstandsmessung im interessierenden Mittelbereich der Abstände kommen zwei Verfahren in Betracht:

- frequenzmoduliertes Dauerstrichverfahren und
- Laufzeitverfahren (Pulsverfahren).

Zum Messen von absoluten Entfernungen ist das frequenzmodulierte Dauerstrichverfahren gut geeignet. Hierbei wird auf der Senderseite die Trägerfrequenz mit einem Sägezahn- oder Dreieckssignal frequenzmoduliert. Die Grundfrequenz des Modulationssignales wird so gewählt, daß das zu erwartende Reflexionssignal (Echo) innerhalb der Periodendauer (Sägezahnsignal) bzw. der halben Periodendauer (Dreieckssignal) im Empfänger eintrifft. Da die Frequenzänderung linear mit der Zeit erfolgt, ist die Differenzfrequenz zwischen Sende- und Empfangssignal ein Maß für die Entfernung zum Reflektor [10]. Das frequenzmodulierte Dauerstrichverfahren ist bei Verwendung der gegen Umwelteinflüsse unempfindlichen, aber schmalbandigen keramischen Schwinger nur schwer zu verwirklichen [11].

Das Laufzeitverfahren ist das klassische und im Vergleich mit dem frequenzmodulierten Dauerstrichverfahren das technisch weniger aufwendige Verfahren. Aufgrund der relativ geringen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft ($v = 343$ m/s bei 20 °C, 1010 hPa) ist dieses Verfahren, Impulse auszusenden und die Laufzeit der vom Objekt reflektierten Wellen zu bestimmen, für den Nah- und Mittelbereich prädestiniert [12, 13].

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist beim Laufzeitverfahren eine wichtige Größe. Sie ist von verschiedenen Umgebungsparametern abhängig, bei Luft also vor allem von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte. In Luft ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit von 0,18 %/K, während die Einflüsse des Luftdrucks und der Luftfeuchte wie auch des normalstarken Windes nicht erheblich sind.

Grundsätzlich ist es möglich, einen akustischen Abstandssensor mit hörbarem Schall zu betreiben, jedoch erfordern Störquellen wie Maschinengeräusche einen gewissen Störfrequenzabstand. Andererseits steigt die Dämpfung von Ultraschall exponentiell mit der Frequenz, so daß in der Praxis Sendefrequenzen im Bereich 40 bis 250 kHz Verwendung finden.

2.3 Mikrowellen-Sensoren

Unter Mikrowellen versteht man elektromagnetische Wellen im Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeter-Wellenlängenbereich. Dies entspricht Frequenzen von etwa 300 MHz bis etwa 300 GHz. Mit steigender Frequenz verkleinern sich die Antennenabmessungen bei konstantem Antennenwirkungsgrad (Antennengewinn), besserer Bündelung und erhöhtem Entfernungsaufhebungsvermögen. Geräte mit Arbeitsfrequenzen oberhalb von 35 GHz eignen sich deshalb besonders für Nahbereichsmessungen.

Bei Mikrowellen- und Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung im Mittelbereich kommen die gleichen Methoden zur Anwendung, auch wenn sie meist anders bezeichnet werden [14]:

- Puls-Radar (Laufzeitverfahren) und
- FM-CW-Radar (Frequency Modulated-Continuous Wave, d.h. frequenzmoduliertes Dauerstrichverfahren).

optisch (opto-elektronisch)	elektromagnet. (Mikrowellen) 10–100 GHz	akustisch 20–250 kHz (Ultraschall)	induktiv	kapazitiv	magnetisch	pneumatisch
Emitter						
LED Halbleiterlaser Gaslaser Festkörperlaser Glühlampe Entladungslampe	Gunn-Diode Impatt-Diode Snap-Diode Varaktor-Diode Pin-Diode	elektromechan. Wandler Piezo-Element magnetostruktives Element Elektrostat. Elektro-dynam. mechanische Schwingungs-erzeuger	Induktivität m. Oszillator Brückenschaltung mit Induktivitäten	Kapazität mit Oszillator Brückenschaltung mit Kapazitäten	Dauermagnet stromdurchflossene Spule stromdurchflossener Leiter	Sendedüse
Detektor						
Foto-Widerstand Foto-Element Foto-Diode Foto-Transistor Foto-Tyristor Sekundär-Elektronenvervielfacher Kon. Fernseh-kamera Matrix-Kamera Zeilen-Kamera	Mikrowellen-empfangs-dioden Mischerdioden mit ZF-Verstärker und Demodulator	wie oben Turbulenz-verstärker	Induktions-spule	kapazitive Meßanordnung	Hall-Generat. Feldplatten	Empfangsdüse Druckkissen u.ä.

Tafel 1. Physikalische Prinzipien zur berührungslosen Abstandsmessung.

2.4 Optische Sensoren

Licht, worunter auch nicht sichtbares Licht verstanden werden soll, unterscheidet sich als hochfrequente elektromagnetische Welle von der Mikrowelle nicht nur darin, daß mit zur Zeit erhältlichen Lichtquellen eine Frequenzmodulation nicht möglich ist, sondern auch darin, daß für den Grad der Reflexion die Oberfläche des Objektes maßgeblich ist und nicht dessen Dichte. Folglich werden zum Teil andere Verfahren für eine optische Abstandsmessung eingesetzt:

- Laufzeitverfahren (Pulsverfahren)
- Phasenmeßverfahren (amplitudenmoduliertes Dauerstrichverfahren)
- Verfahren nach dem Triangulationsprinzip.

Für optische Abstandssensoren nach dem Laufzeit- oder Pulsverfahren gilt das gleiche wie für die entsprechenden Mikrowellen-Sensoren. Sie eignen sich nur für große Distanzen über 10 m bis zu vielen km, wofür als Lichtquelle ein Impulslaser am besten geeignet ist.

Die Laufzeit von Licht kann auch indirekt für Abstandsmessungen verwertet werden. Hierbei wird statt mit einem einzelnen Impuls mit amplitudenmoduliertem Dauerlicht gearbeitet. Wegen der Laufzeit des Lichtes ist das von der Meßfläche reflektierte und von dem Empfänger des Meßsystems erfaßte Licht in seiner Phasenlage gegenüber dem ausgesandten Licht verschoben. Durch Messung der dem Abstand proportionalen Phasenverschiebung sind Auflösungen bis herab zu 1 mm möglich. Als Lichtquellen sind Infrarot- und Laserdioden geeignet. Auch dieses Meßprinzip ist mit relativ hohem elektronischen Aufwand verbunden.

Hohe Genauigkeiten lassen sich mit geometrischen Verfahren nach dem Prinzip der Triangulation (Dreiecksmessung) erreichen [16, 17]. Das von einer Lichtquelle ausgesandte Licht wird mittels einer

Optik auf den Erdboden abgebildet. Befindet sich diese in einem bestimmten Grundabstand, so trifft das diffus reflektierte Licht in der Empfangsebene an einer bestimmten Stelle auf. Ändert sich der Abstand Sensor–Boden, so verschiebt sich auch die Auftreffstelle in der Empfangsebene. Aus der Lage der Auftreffstelle kann somit auf den Abstand zum Erdboden geschlossen werden. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für den Nah- und Mittelbereich und kann auch in verschiedenen anderen Variationen eingesetzt werden.

3. Preisvergleich der Abstandssensoren

Bei der Beurteilung von Abstandssensoren müssen die Preise der Meßsysteme mit berücksichtigt werden. Im für die Landtechnik interessanten Mittelbereich sind Infrarot- und Mikrowellen-Laufzeit-sensoren zu teuer, Bild 1. Die Sensoren nach dem frequenz- und amplitudenmodulierten Dauerstrichverfahren bestimmen den Abstand mittelbar aus der Laufzeit und sind an dieser Stelle mit einbezogen. Dagegen liegen Sensoren nach dem Ultraschalllaufzeitverfahren und infrarotaktive Sensoren nach dem Triangulationsprinzip, das sind optische Sensoren mit eingebauter Lichtquelle, sehr viel günstiger. Der vergleichsweise niedrige Preis der infrarot-aktiven Sensoren steigt in den Bereich der Ultraschall-Sensoren bei einem Meßabstand von ca. 1 m. Bei Abständen über 1 m nimmt die empfangene Lichtleistung schnell ab, so daß der Bauaufwand der infrarot-aktiven Sensoren stark ansteigt.

Die preiswerten kapazitiven und induktiven Sensoren sind nur im Nahbereich vertreten. Zur Ergänzung sind in Bild 1 die Mikrowellen-Doppler-Sensoren und die infrarot-passiven Sensoren dargestellt, wobei Sensoren ohne eingebaute Lichtquelle gemeint sind, die nach dem pyroelektrischen Effekt arbeiten. Diese können jedoch nur Abstandsänderungen bewegter Objekte ermitteln.

Es bleibt festzuhalten, daß im Mittelbereich von 10 cm bis 10 m sowohl von den physikalischen Eigenschaften als auch vom Preis her Ultraschall- und infrarot-aktive Abstandssensoren zu bevorzugen sind.

Zur Abstandsmessung im Mittelbereich bereitet das Laufzeitverfahren für die Mikrowellen im Vergleich zu den Ultraschallwellen größere Schwierigkeiten (Meßbereich bis hinunter zu 10 ps). Das frequenzmodulierte Dauerstrichverfahren eröffnet Mikrowellensensoren die Möglichkeit, auch Entfernungen unter 10 m mit ausreichender Genauigkeit zu messen [15]. Um im Millimeterbereich hinreichende Genauigkeiten zu erzielen, ist zu bedenken, daß die Modulationsfrequenz um 10–100 MHz liegen muß, was einen entsprechend hohen Aufwand der Signalverarbeitung verlangt.

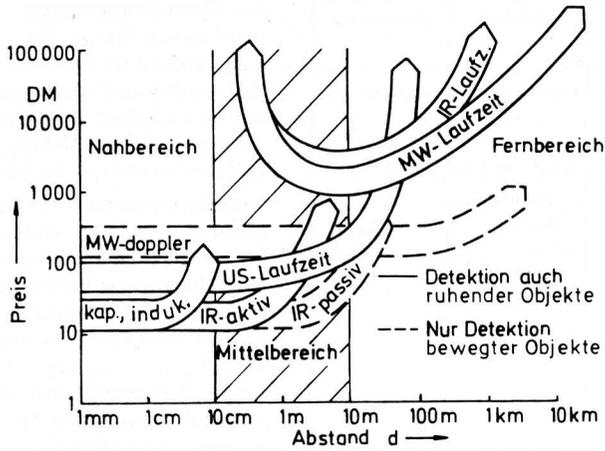


Bild 1. Meßbereiche und Preise der Abstandssensoren.

4. Infrarot-Abstandssensor

4.1 Grundprinzip

Das in Bild 2 dargestellte Sensorsystem arbeitet nach dem Triangulationsprinzip, wobei eine vertikale Einstrahlung zur Meße Ebene gewählt wurde. Hiermit verändert sich die Auftreffstelle an der Meßoberfläche bei Abstandsschwankungen nicht auch in horizontaler Richtung. Wichtiger ist jedoch bei dieser Anordnung eine für fast alle Materialien annähernd gleiche empfangene Lichtleistung, so daß nur ein vergleichsweise kleiner Regelbereich der verarbeitenden Elektronik erforderlich ist.

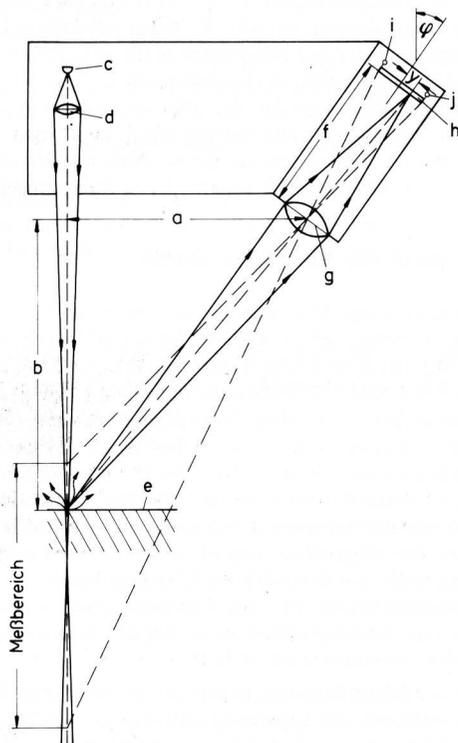


Bild 2. Strahlengang des Infrarot-Abstandssensors.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| a Seitenabstand Sender/Empfänger | f Brennweite Empfangsoptik |
| b Meßabstand | g Empfangsoptik |
| c Infrarotdiode (IRED) oder Laserdiode | h positionsempfindlicher Fotodetektor |
| d Senderoptik | i, j Abgriffe des Fotodetektors |
| e Meßfläche | |

4.2 Analytische Darstellung des Meßprinzips

Zur Bestimmung des Auftreffpunktes des reflektierten Lichtes wird ein positionsempfindlicher Detektor mit einer lichtempfindlichen Ausdehnung von 30 mm verwendet. Außer dem mittleren Anschluß für die Spannungsversorgung hat der Detektor an den Enden der Fotoschicht je einen Anschluß, an denen die Fotoströme I_1 und I_2 abgegriffen werden können. Die Größe der beiden entstehenden Fotoströme ist proportional zur Bestrahlungsstärke und umgekehrt proportional zum Abstand des Lichtfleckes zum jeweiligen Abgriff.

Die Differenz der beiden Fotoströme sowie der einzelne Fotostrom bezogen auf die Summe der Fotoströme $I_1/(I_1 + I_2)$, $I_2/(I_1 + I_2)$ und $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ ist unabhängig von der auftretenden Lichtleistung proportional der Abweichung y vom Zentrum der lichtempfindlichen Schicht. Entsprechend der Beziehung

$$y = f \cdot \tan [\varphi - \arctan (a/b)],$$

ist die Abweichung y abhängig vom Meßabstand b , vom Abstand a zwischen Sender und Empfänger und vom Neigungswinkel φ des Empfängers.

4.3 Analogelektronik

Die Analogelektronik des Infrarot-Sensors, Bild 3 und 4, ist in die Baugruppen Sender, Empfänger und Signalverarbeitung aufgelöst. Die Infrarot- oder Laserdiode a wird amplitudenmoduliert betrieben, um bei der Signalverarbeitung störendes Fremdlicht eliminieren zu können. Ebenso ist es möglich, eine Modulation der Halbleiterstrahler durch Pulsen zu erreichen, wobei dann statt der Dauerstrich- eine Impuls Laserdiode Verwendung findet.

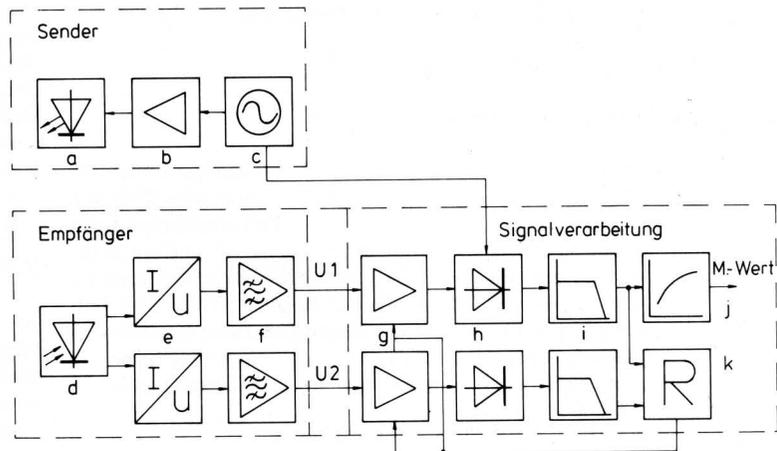


Bild 3. Blockdiagramm der Analogelektronik des Infrarot-Abstandssensors.

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| a Infrarotdiode/Laserdiode | g geregelter Verstärker |
| b Leistungsstufe | h phasenstarrer Gleichrichter |
| c Generator | i Tiefpaß |
| d Detektor | j Funktionsgeber |
| e Strom/Spannungswandler | k Regler |
| f selektiver Vorverstärker | |

Das von der Meßfläche reflektierte und auf dem Detektor d abgebildete Streulicht erzeugt dort die Fotoströme I_1 und I_2 . Diese werden zunächst über je einen Strom/Spannungswandler e und je einen selektiven Vorverstärker f mit Bandpaßfilter geführt. Damit die Signalspannungen unabhängig von der auf dem Detektor auftreffenden Strahlungsleistung werden, wird die zweite Verstärkerstufe g innerhalb eines Bereichsverhältnisses von 1 : 100 so geregelt, daß die Summe der zwei Signalspannungen U_1 und U_2 konstant ist.

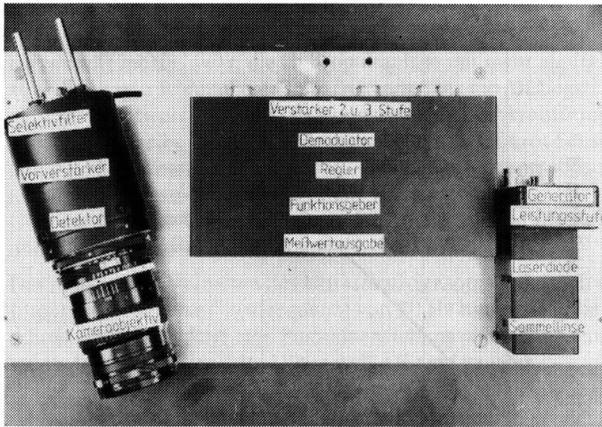


Bild 4. Ansicht des Infrarot-Abstandssensors.

Hiermit wird in einem weiten Bereich die Proportionalität zwischen den Ausgangsspannungen der beiden zweiten Verstärkerstufen und der Abweichung y unabhängig vom Reflexionsgrad der Meßfläche hergestellt. Ein Überschreiten des Regelbereiches unter extremen Reflexionsverhältnissen wird zur Anzeige gebracht. Die Signalspannungen werden in je einem Gleichrichter h demoduliert und über jeweils einen Tiefpaß i dem Regler k zugeführt. Zur Messwertausgabe genügt es, lediglich die Meßspannung eines Kanals über einen Funktionsgeber j heranzuziehen.

4.4 Grenzen des Systems

Da das System auf weniger gut reflektierende Meßflächen abgestimmt ist, sind Messungen sogar an extrem schlecht reflektierenden Oberflächen noch möglich, während spiegelnde Flächen bei Reflexion in Empfängerrichtung zu einem Übersteuern der Elektronik, bei Reflexion in andere Richtungen zu keinem Meßsignal führen. Verfälscht wird das Ergebnis, wenn die Strahlung in das Objekt eindringt, d.h. bei transparenten Materialien.

Meßfehler können sich auch dann ergeben, wenn die Meßfläche inhomogen in ihrem Reflexionsverhalten ist, d.h. teilweise gut und teilweise schlecht reflektierend ist. Fällt das auftreffende Strahlenbündel auf eine Übergangsstelle, so stimmen die Schwerpunkte des bestrahlenden Lichtbündels und des Lichtfleckes auf dem Empfänger nicht überein, was zu einem Meßfehler führt. Bei Bewegung des Sensors parallel zur Meßfläche, z.B. bei Befestigung des Sensors am Fahrzeug, gleichen sich jedoch diese Meßfehler im Mittel wieder aus.

Der Meßfehler des Infrarot-Sensors ist umso kleiner, je geringer die Abmessungen der bestrahlten Fläche sind und je geringer der Meßabstand ist, wobei ein Mindestabstand durch die minimal möglichen geometrischen Abmessungen des Systems nicht unterschritten werden kann.

Entsprechend dem in der Landtechnik sinnvollen relativ großen Meßabstand mit einem Bereich von 0,5–1,5 m, müssen an der theoretisch möglichen, hohen Meßgenauigkeit Abstriche gemacht werden. Das ist bedingt durch Zunahme der bestrahlten Fläche vor und hinter dem Fokuspunkt (Bild 2), dessen günstigste Lage experimentell ermittelt wurde, aber insbesondere durch die mit dem Meßabstand quadratisch abnehmende Intensität der diffus reflektierten Strahlung auf dem Detektor.

5. Ultraschall-Abstandssensor

Der eingesetzte Ultraschall-Abstandssensor arbeitet nach der Methode der Laufzeitmessung und basiert auf dem in Bild 5 schematisch dargestellten Polaroid-System. Aufgrund von Untersuchungen, die zeigen, daß Ultraschallfrequenzen im Bereich von 50 bis

60 kHz in natürlicher Umgebung besonders gut reflektiert werden [18], sendet der Wandler des Systems in Transmitter-Schaltung ein Frequenzbündel aus, bestehend aus vier Frequenzen (60; 57; 53 und 50 kHz) mit verschiedenen Impulzzahlen.

Der Meßbereich des Originalsystems ist mit 0,3–10 m angegeben. Die Ultraschallintensität (Schalleistung bezogen auf die durchstrahlte Fläche) in Empfangsebene nimmt durch die räumliche Ausbreitung bei einem Meßabstand von 10 m nach der Radargleichung [19] um 120 dB ab, bezogen auf 0,3 m Grundabstand, und auch das Dämpfungsmaß zur Beschreibung der Schallabsorption wächst linear mit der Ultraschallfrequenz an. Um diese Einflüsse zu kompensieren, werden Verstärkung und Bandbreite des Empfängers über eine spezielle Logik variiert.

Von den zahlreichen verfügbaren Luftschallwandlern sind für meßtechnische Anwendungen die elektrischen reversiblen Typen am besten geeignet. Solche Luftschallwandler erzeugen den Schalldruck als Kolbenschwinger, d.h. sie erzeugen eine periodische Änderung der Schallschnelle (Geschwindigkeit der schwingenden Materieteilchen), die zum erzeugten Schalldruck um 90° phasenverschoben ist. Die Luftschallwandler, die heute Verwendung finden, arbeiten nach zwei verschiedenen Prinzipien: als piezokeramische Schwinger mit extrem schmaler Bandbreite oder als elektrostatische (kapazitive) Schwinger mit großer Bandbreite ohne ausgeprägte Resonanzfrequenz. Das Verhältnis der Schallimpedanzen von Wandler und Luft erschwert die Übertragung der elektromechanischen in die akustische Energie, so daß reversibel nur Wirkungsgrade von 20–50 % erzielt werden. Die elektrostatischen (kapazitiven) Wandler bestehen durch ihren einfachen Aufbau und die Stabilität ihrer elektrischen Kennwerte. Im praktischen Einsatz ist aber die Empfindlichkeit der Membran gegen Verschmutzung durch Staub oder Kondensate zu beachten.

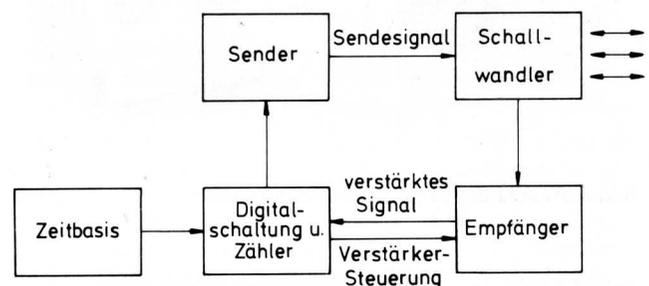


Bild 5. Vereinfachtes Blockschaltbild des Polaroid-Systems.

Das Originalsystem ist mit einer Impulsfolgefrequenz von 5 Hz und dem großen Tastbereich für dynamische Vorgänge nur bedingt geeignet. Da Meßdynamik und Meßbereich über die Ultraschalllaufzeit verknüpft sind, kann prinzipiell die Impulsfolgefrequenz auf Kosten des Meßbereichs erhöht werden. Im überarbeiteten System, das in Bild 6 gezeigt ist, wurde die Impulsfolgefrequenz auf 20 Hz angehoben, was für viele Regelvorgänge ausreichend ist. Weitere Maßnahmen der Anpassung des Systems an den Mobileinsatz waren eine Änderung der Stromversorgung, Digital/Analog-Wandlung des Ausgangssignals und Aufbau im Europakarten-Format.

6. Laborversuche mit den Abstandssensoren

6.1 Statisches Verhalten

Für den Einsatz in der Landtechnik ist der wichtige Punkt zu klären, ob die beiden vorgestellten Sensoren in der Lage sind, den Abstand zum Erdboden zuverlässig zu ermitteln.

Der Erdboden kann in seinen Reflexionseigenschaften für Licht und Schall sehr verschieden sein. Bodenrauigkeiten, die, in Korngrößendurchmesser ausgedrückt, 1/4 der Wellenlänge des Ultraschalls unterschreiten, bzw. mehr als das dreifache der Wellenlänge betragen, können die diffuse Reflexion des Schalls erheblich beein-

trächtigen. Ebenso vermindert ein sehr feuchter Boden durch seine dunkle Färbung den Reflexionsgrad für Licht. Es wurde deshalb in einer Reihe von Versuchen das Reflexionsverhalten des Ultraschall- und Infrarot-Sensors bei verschiedenen Bodenverhältnissen untersucht.

Zur Erzielung reproduzierbarer Werte wurden die Versuche im Labor an einer Einstempel-Hydropulsanlage mit 20 cm Hub durchgeführt. Der Regelverstärker der Anlage wurde über einen Konstanter angesteuert. Ein parallel zum Zylinder installierter Wegaufnehmer diente als Rückführung für den Regelverstärker und Istwertaufnehmer der Messung. Die Sensoren waren über der Plattform der Hydropulsanlage an einem höhenverstellbaren Galgen befestigt und strahlten senkrecht auf die Plattform, auf der ein Kasten mit dem präparierten Boden plazierte war.

Aus der Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen werden beispielhaft die Versuchsergebnisse für drei Bodentypen diskutiert:

- krümelig, feucht
- feinkrümelig, trocken
- Grasbestand, kurz und feucht.

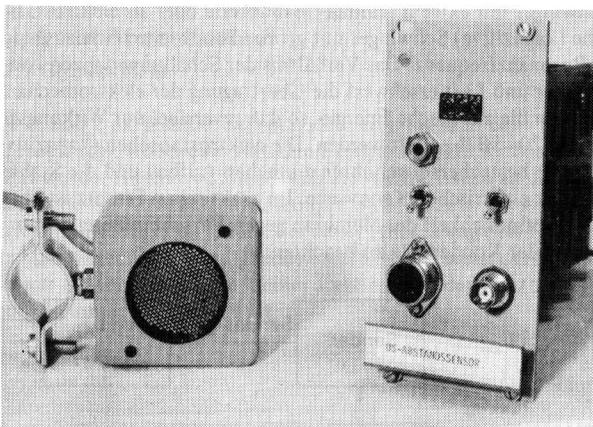


Bild 6. Ansicht des Ultraschall-Abstandssensors.

In Bild 7 bis 9 werden die Kennlinien der Sensoren für die drei Bodentypen gezeigt. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, daß der Infrarot-Sensor ein weitgehend lineares Verhalten aufweist, mit nur geringer Abweichung des Meßwertes vom Istwert. Der Ultraschall-Sensor läßt in gewissem Umfang Nichtlinearitäten erkennen, wobei diese durch die endliche Auflösung des digitalen Systems zum Teil erklärbar sind (prinzipielle Ungenauigkeit digitaler Systeme von $\pm 1/2$ Bit). Insgesamt ist festzustellen, daß im Vergleich zum Infrarot-Sensor der relative Fehler des Ultraschall-Sensors größer ist.

Die wichtige Frage der Eignung der beiden Sensoren für die Erfassung des Pflanzendaches von Beständen wurde in weiteren Versuchen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, daß durch den relativ großen Öffnungswinkel der rotationssymmetrischen Schallkeule der Ultraschall-Sensor dazu besser geeignet ist als der Infrarot-Sensor.

Eine ausschließliche Erfassung des Pflanzendaches erfordert eine weitergehende Signalauswertung der Ultraschall-Echosignale, da diese sowohl von den Pflanzenspitzen als auch – je nach Bestandsdichte – vom Erdboden ausgehen können. Elektronisch kann diese Signalauswertung durch Bildung eines variablen Laufzeitfensters realisiert werden, innerhalb dessen alle Echosignale als vom Pflanzdach ausgehend betrachtet werden können. Unter Einbeziehung eines Mikrocomputers ist es mithin möglich, ein Abstandmeßsystem zu schaffen, das das Pflanzdach erkennen kann. Für Regelvorgänge muß jedoch beachtet werden, daß die Tastfrequenz (Impulsfolgefrequenz) des Meßsystems den oberen Grenzwert der Tastfrequenz darstellt, die das Pflanzdach erfäßt.

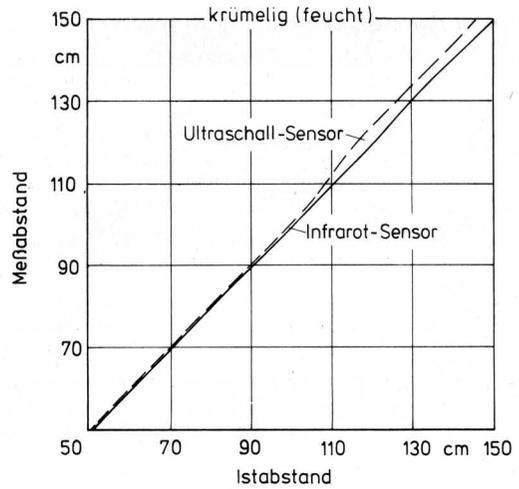


Bild 7. Statisches Verhalten des Infrarot- und des Ultraschall-Abstandssensors bei einem krümeligen, feuchten Boden.

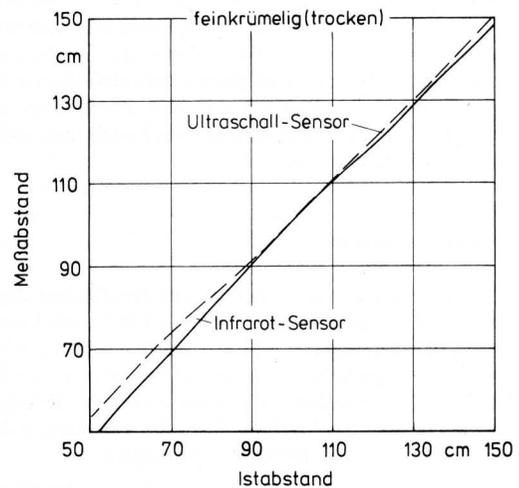


Bild 8. Statisches Verhalten des Infrarot- und des Ultraschall-Abstandssensors bei einem feinkrümeligen, trockenem Boden.

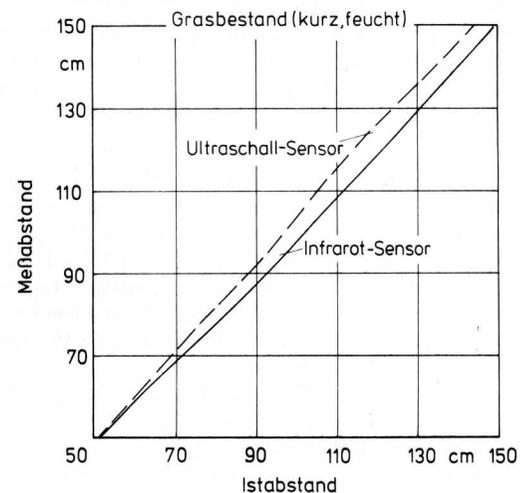


Bild 9. Statisches Verhalten des Infrarot- und des Ultraschall-Abstandssensors bei einem kurzen, feuchten Grasbestand.

6.2 Dynamisches Verhalten

Da es nicht möglich war, die Hydropulsanlage mit mehr als 10 Hz zu erregen, wurde die obere Grenzfrequenz über die Anstiegszeit der Sprungantwort ermittelt. Hierzu wurde eine halbkreisförmige rotierende Scheibe in den Strahlengang zwischen Infrarot-Sensor und einem weißen Schirm gebracht, wobei eine Abstandsabhängigkeit der Anstiegszeit nicht festgestellt werden konnte. Über die einfache Verknüpfung mit der Anstiegszeit wurde für die obere Grenzfrequenz ein Wert von 22 Hz ermittelt.

Das dynamische Verhalten des Ultraschall-Sensors wird durch die Impulsfolgefrequenz (Tastfrequenz) von 20 Hz hinreichend beschrieben. **Tafel 2** zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Kennwerte des Infrarot- und des Ultraschall-Abstandssensors.

Sensor	Infrarot-Sensor	Ultraschall-Sensor
Kennwert		
Versorgungsspannung	± 15 V	± 15 V
Stromaufnahme	200 mA	≤ 2,5 A
Meßbereich	0,5–1,5 m	0,3–1,6 m
Ausgangssignal	analog	analog
min. Ausgangsspannung	2,5 V	0,3 V
max. Ausgangsspannung	7,5 V	1,6 V
Empfindlichkeit	5 V/m	1 V/m
Meßtoleranz auf landwirtschaftlichen Böden	± 2 %	max. + 6 %
Eckfrequenz/Tastfrequenz	22 Hz	20 Hz
Divergenzwinkel des Taststrahles	Laserdiode: 0,11° Infrarot-Diode: 1,4°	11°

Tafel 2. Wichtige Kennwerte des Infrarot- und des Ultraschall-Abstandssensors.

7. Anwendungsbeispiel

Die zwei vorgestellten Abstandssensoren finden Anwendung an einem lagegeregelten Feldspritzgestänge, das am Institut für Landtechnik entwickelt wurde, **Bild 10**. Das Feldspritzgestänge beinhaltet zwei elektrohydraulische Regelkreise, die einen gewünschten Abstand der beiden Auslegerenden zum Erdboden sicherstellen sollen. Der Istabstand des Gestänges zum Boden wird von den Sensoren laufend erfaßt und dem Regelsystem zugeführt. Das Regelsystem steuert über die beiden Proportionalventile als elektrohydraulische Wandler die zwei Schwenk- und den Hubzylinder. Die Schwenkzylinder verdrehen das Gestänge so, daß die beiden Auslegerenden den gleichen Abstand vom Boden haben. Der Hubzylinder sorgt dagegen für eine konstante zuvor gewählte Grundhöhe-einstellung des Gestänges.

8. Zusammenfassung

Von den beschriebenen physikalischen Prinzipien zur berührungslosen Abstandsmessung in einem mittleren Entfernungsbereich bis ca. 1,5 m sind für den landtechnischen Bereich unter Berücksichtigung der Preise der Meßsysteme das Verfahren der Ultraschall-Laufzeitmessung und das der optischen Triangulation geeignet.

Bei der optischen Triangulation wird der von der Meßfläche diffus reflektierte infrarote Strahl einer Diode (IRED) oder eines Halbleiterlasers über eine Optik auf einen speziellen flächenhaften Fotoempfänger abgebildet, wobei die lineare Abweichung des Lichtflecks auf dem Fotoempfänger die Abstandsinformation enthält.

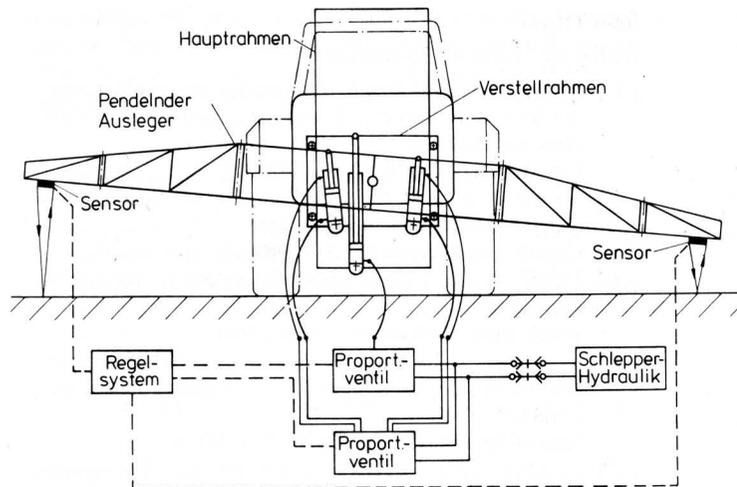


Bild 10. Automatisches, lage- und höhengeregeltes Feldspritzgestänge.

Beim Ultraschall-Laufzeitverfahren werden hochfrequente Schallimpulse ausgesendet und die Laufzeit der vom Objekt reflektierten Schallwellen bestimmt. Mit der in gewissen Grenzen konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in der Atmosphäre ist die Laufzeit ein Maß für den Meßabstand.

Der am Institut für Landtechnik in Analogtechnik entwickelte Infrarot-Abstandssensor nach der Methode der Triangulation arbeitet alternativ mit einer preisgünstigen IRED oder einem Halbleiterlaser.

Mit letzterem kann nur der Vorteil der nahezu punktförmig abstrahlenden Fläche des Lasers gegenüber der IRED für das Meßsystem genutzt werden. Zur Vermeidung von Störeinflüssen durch Fremdlicht und zur Anpassung an wechselnde Objektremissions- bzw. Transmissionsgrade der Empfängeroptik infolge Verschmutzung wird die Lichtquelle moduliert und die Verstärkung im Bereich 1 : 100 geregelt.

Ein zweiter am Institut für Landtechnik in Digitaltechnik aufgebauter Abstandssensor ist ein Polaroid-System, das die Laufzeit von Ultraschall zur Messung ausnutzt. Bei diesem wurde die Impulsfolgefrequenz auf 20 Hz angehoben.

Im Labor wurde untersucht, ob der Infrarot- und der Ultraschall-Abstandssensor bei Einstrahlung gegen zum Teil schlecht reflektierenden Ackerboden zuverlässig arbeiten und eine ausreichende Meßgenauigkeit aufweisen. Für den Infrarot-Abstandssensor wurde eine Meßtoleranz von ± 2 % festgestellt. Die Meßtoleranz des Ultraschall-Abstandssensors wurde mit - 0 %, + 6 % ermittelt.

Es wurde die Eignung der Sensoren für die Erfassung von Bestandsgrenzen untersucht. Hierzu ist durch den relativ großen Öffnungswinkel der rotationssymmetrischen Schallkeule der Ultraschall-Sensor besser geeignet als der Infrarot-Sensor. Die Erfassung der Bestandsoberfläche erfordert eine weitergehende Signalauswertung der Schallechos unter Einbeziehung eines Mikrocomputers.

Während die dynamischen Eigenschaften des Ultraschall-Abstandssensors durch die Impulsfolgefrequenz von 20 Hz charakterisiert ist, wurde die obere Grenzfrequenz des Infrarot-Abstandssensors im Versuch aus der Sprungantwort zu 22 Hz bestimmt.

Stellvertretend für die Probleme der Abstandsregelung, Hinderniserkennung und Kursführung zeigt die Entwicklung eines lage- und höhengeregelten Spritzgestänges, daß zur Verwirklichung neuer Verfahren berührungslos arbeitende Sensoren beitragen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Fichtel, H. u. S.M. Ismail:* Untersuchungen zur Messung der Arbeitsgeschwindigkeit von Landmaschinen mit Hilfe eines Radargerätes. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 4, S. 136/40.
- [2] *Mertins, K.-H. u. H. Göhlich:* Fahrgeschwindigkeitsmessung an landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 1, S. 14/20.
- [3] *Halderson, J.L.:* An automatic boom control for potato harvesters. ASAE Paper 80-1040, St. Joseph 1980.
- [4] *Knöchel, G.:* Aufbau und Arbeitsweise eines Musters der Automatisierungsbaugruppe "Automatische Fallhöhenanpassung". Agrartechnik Bd. 32 (1982) Nr. 8, S. 346/48.
- [5] *Gunderson, D.G., T.G. Kirk u. J.N. Wilson:* A comparison of ultrasonic, ski, and ski-wheel systems for tillage depth measurement. ASAE Paper 81-1602, St. Joseph 1981.
- [6] *Ambler, B. u. G.O. Harries:* Optical ranging for tractor guidance. ASAE Paper 80-1558, St. Joseph 1980.
- [7] *Townsend, J.S., K.S. Upadhyaya, G.S. Saqib u. D.D. Small:* Retrofitting hydraulic drives and controls to potato harvester. ASAE Paper 77-1536, St. Joseph 1977.
- [8] *Lewi, P.:* Industrieroboter lernen räumlich sehen. Elektronik Bd. 32 (1983) Nr. 12, S. 93/98.
- [9] ● *Lehfeldt, W.:* Ultraschall. Würzburg: Vogel 1973.
- [10] *Gross, T.A.O.:* Controlling with ultrasonics. Machine Design (1978) Nr. 9, S. 90/96.
- [11] *Kleinschmidt, P. u. V. Mágori:* Ultrasonic remote sensors for noncontact object detection. Siemens Forsch.- u. Entwicklungsbericht Bd. 10 (1981) Nr. 2, S. 110/18.
- [12] *Gast, Th. u. D. Ehlers:* Längenmessung mit Luftschall. messen + prüfen/automatik Bd. 19 (1983) Nr. 11, S. 676/81.
- [13] *Biehl, K.-E.:* Ultraschall-Entfernungssensor. Elektronik Bd. 32 (1983) Nr. 26, S. 113/15.
- [14] *Meinel, H. u. A. Plattner:* Eigenschaften und Anwendungen von Millimeterwellen-Radargeräten im Frequenzbereich bis 90 Ghz. Ortung und Navigation Bd. (1979) Nr. 3, S. 358/73.
- [15] *Meinel, H.:* Entfernungsmessung mit frequenzmodulierten Millimeterwellen-Dauerstrich-Radargeräten. Technische Mitteilungen AEG-Telefunken Bd. 67 (1977) Nr. 2, S. 111/12.
- [16] *Schulz, W.:* Sensoren bei der Weg- und Dickenmessung. Elektro Anzeiger Bd. 35 (1982) Nr. 9, S. 13/15.
- [17] *Bücken, H.:* Berührungsloses Messen mechanischer Größen. messen + prüfen/automatik Bd. 17 (1981) Nr. 5, S. 290/92.
- [18] Ultrasonic ranging system. Unterlagen der Firma Polaroid Corp., Norwood (USA) 1980.
- [19] ● *Käs, G. u.a.:* Radartechnik. Grafenau/Würt.: expert-verlag 1981.

Neuere Getriebeentwicklungen bei Ackerschleppern

Von Karl Theodor Renius, München*)

DK 631.372-585

Das Getriebe wurde zur bedeutendsten Baugruppe des Ackerschleppers [1 bis 4]. Der Aufsatz erarbeitet zunächst die wesentlichen Anforderungen für den Einsatz in Europa. Eine darauf zurückgreifende Besprechung von acht ausgeführten neueren Getriebekonzepten knüpft an frühere Arbeiten des Verfassers an [5 bis 11]. Der Trend zum gut synchronisierten Schaltgetriebe setzt sich in Europa weiter fort. Dagegen konzentriert man sich z.B. in den USA unter anderen Randbedingungen mehr auf das Schalten unter Last. Für die weitere Getriebeentwicklung werden folgende Leitlinien herausgearbeitet: Weiter verbesserte Handhabung, scharfe Kontrolle von Herstellkosten — Gewicht — Teilezahl (Baukasten), noch bessere Stufung, verminderter Reparaturaufwand, Kontrolle der Energieverluste und des Geräuschpegels.

Erweiterte Fassung des Vortrages auf der Internationalen Tagung Landtechnik am 10.11.1983 in Braunschweig.

*) Prof. Dr.-Ing. K.Th. Renius ist Vorstand des Lehrstuhls für Landmaschinen der Technischen Universität München.

1. Einleitung

Trotz vieler Versuche mit stufenlosen Getrieben hat sich beim Standardschlepper weltweit das Stufengetriebe behauptet; weniger als 1 % der Weltproduktion wird mit hydrostatischen Antrieben ausgerüstet. Frühere Aussagen zu den Gründen hierfür gelten noch weitgehend [6, 7], so daß deren erneute Behandlung sich derzeit nicht lohnt.

Die technische Entwicklung neuer Getriebe gestaltet sich nicht nur durch die inzwischen sehr hohe Zahl geforderter Funktionen schwierig, sondern wird auch durch die besonderen Randbedingungen immer komplexer: Die Investitionen für die Entwicklung und Produktion einer neuen Schleppergetriebefamilie liegen inzwischen bei etwa 100 bis 200 Mio. DM und erfordern daher mit Abstand den höchsten Planungs- und Entwicklungsaufwand aller in der Landtechnik überhaupt verwendeten Maschinenkomponenten (Motoren ausgeschlossen, da nicht für Landtechnik allein entwickelt). Weitblick bei der Konzeptfestlegung ist auch deswegen notwendig, weil die Hauptinvestitionen für etwa 15 Jahre vorhalten sollen.

2. Wichtigste Anforderungen an europäische Stufengetriebe

Aus Platzgründen und zur besseren Übersicht seien die Anforderungen straff zusammengefaßt, **Tafel 1**. Dieses "Grundlastenheft" läßt sich bei Bedarf weiter verfeinern. Es beinhaltet einen ganzen Strauß von Zielkonflikten, die schon bei den im folgenden besprochenen Konzepten anklängen und die im letzten Abschnitt noch besonders angesprochen werden.