

Messverfahren zur Bestimmung der Fahrgenauigkeit GPS geführter Maschinen

Um die Fahrgenauigkeit automatisch gelenkter und mit GPS-Navigation ausgerüsteter Landmaschinen beurteilen zu können, wird eine geeignete Referenzmessmethode benötigt. Das induktive Messverfahren ist für fahrerlose Transportsysteme als Ortungsverfahren eingeführt und ein Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und flexibler Einsatzmöglichkeit. Mit der induktiven Messeinrichtung war die Querabweichung einer mit GPS-Navigation geführten Maschine mit einer Genauigkeit von etwa 5 mm zu bestimmen. Gier- und Wankbewegungen beeinflussen die Messgenauigkeit minimal.

Dipl.-Ing. Albert Stoll ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion mit Grundlagen der Landtechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.D. Kutzbach), Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart; e-mail: stoll@uni-hohenheim.de

Tobias Breuninger ist Student der Fachrichtung Maschinenbau an der Universität Stuttgart. Er hat im Fach Landmaschinen eine Studienarbeit zum Thema Referenzmessmethoden angefertigt. Die Arbeit wurde im Jahr 2003 mit einem Stipendium der Claas Stiftung ausgezeichnet.

Schlüsselwörter

Fahrgenauigkeit, GPS-Navigation, induktive Referenzmessung

Keywords

Driving accuracy, GPS-guidance, inductive reference measuring method

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 04319 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Am Hohenheimer Institut für Agrartechnik wurde ein Gesamtkonzept für eine automatisch geführte Erntemaschine entwickelt und untersucht [1]. Das Global Positioning System (GPS) nimmt als Ortungssystem eine zentrale Rolle ein. Real Time Kinematik GPS (RTK GPS) Empfänger verarbeiten die Satellitensignale und senden präzise Positions- und Bewegungsdaten an die Steuerungs- und Regelungssoftware der Maschine. Diese berechnet aus den GPS-Daten und dem hinterlegten Sollfahrkurs der Maschine entsprechende Stellbefehle und leitet diese an die Lenkung und den Fahrantrieb. Mit diesem Aufbau kann die Maschine ohne manuellen Eingriff im Feld automatisch bewegt werden. Um das automatische Führungssystem objektiv beurteilen und weiter entwickeln zu können, ist die Bestimmung der tatsächlichen Fahrgenauigkeit, das heißt die Querabweichung zu einer vorgegebenen virtuellen geraden oder gekrümmten Leitlinie, von besonderem Interesse.

Die Messeinrichtung sollte vollständig entkoppelt von dem automatischen Führungssystem sein. Die Genauigkeit sollte deutlich besser sein, als die der RTK GPS-Empfänger, welche für die automatische Führung verwendet werden. Es wurden als lateraler Messfehler maximal 30 mm bei einem Messbereich von ± 250 mm zur Leitlinie als Mindestforderung festgelegt. Darin sollten die Eigenbewegungen um die drei Hauptachsen der Maschine, bedingt durch Fahrten auf unebenem Gelände, bereits berücksichtigt sein.

Stand der Technik

In [2] werden zwei Verfahren beschrieben, mit denen die Fahrgenauigkeit eines automatisch gelenkten Traktors auf befestigter Fahrbahn bestimmt wurde. Im ersten Verfahren wurde ein selbst nachführendes Tachymeter eingesetzt, welches mit Hilfe eines Laserstrahls den Abstand und den dazugehörigen Winkel zum vermessenden Objekt bestimmt. Für dieses Verfahren wird der Laserstrahl an einem Prisma reflektiert. Bei der beschriebenen Untersuchung wurde das Prisma auf dem Traktordach montiert. Bei dieser Messmethode bestanden Probleme in der Abhängigkeit der Messfehler von der

Distanz zwischen Tachymeter und Prisma. Zusätzlich ist die hohe Anbringung des Prismas bei wankendem Fahrzeug ungünstig für die Messpräzision. Alternativ wurde ein Laser-Distanzmessgerät eingesetzt, das unter der Hinterachse montiert wurde. Es wurde die Distanz zu Reflektoren gemessen, die entlang der Fahrstrecke angebracht waren. Die Messungen gaben die Querabweichung zum Sollfahrkurs an. Bei diesem Verfahren ist die Anzahl der Messungen von der Anzahl der Reflektoren abhängig. Diese Ergebnisse waren ausschlaggebend, um nach weiteren Messmethoden für das eigene Vorhaben zu suchen.

Es wurden mechanische, optische, akustische und induktive Ortungsverfahren, wie sie für fahrerlose Transportsysteme (FTS) bekannt sind, hinsichtlich ihrer Eignung für Untersuchungen mit Landmaschinen analysiert und bewertet [3]. Das induktive Messverfahren wurde als geeignete Variante ausgewählt, da es kostengünstig, präzise und sehr flexibel einsetzbar ist.

Grundlagen induktiver Messverfahren

Bei dem induktiven Messverfahren wird eine einadrige Leitung entlang der Sollspur verlegt und über einen Frequenzgenerator mit Wechselstrom (10 kHz) versorgt. Die Messantenne ist am Fahrzeug montiert und besteht aus zwei rechtwinklig angeordneten Spulen. Das Magnetfeld induziert in der horizontalen Spule die Summenspannung U_s

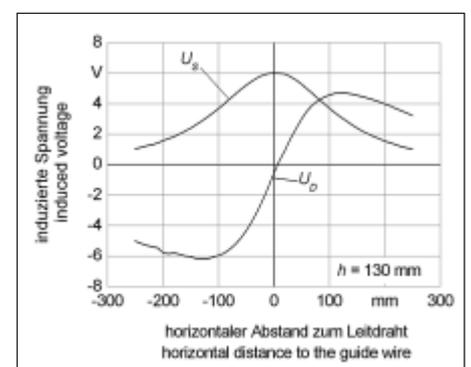


Bild 1: Verlauf der induzierten Spannungen in horizontaler und vertikaler Spule

Fig. 1: Induced voltages in horizontal and vertical coil

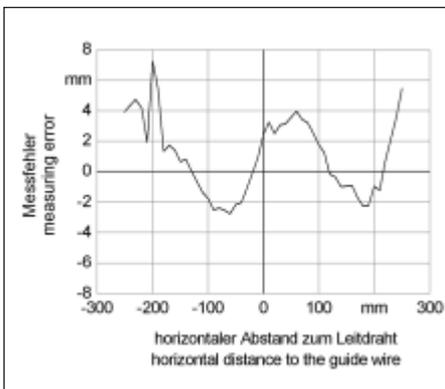


Bild 2: Verlauf des Messfehlers bei der Berechnung des Querversatzes

Fig. 2: Measuring error for the lateral deviation

und in der vertikalen Spule die Differenzspannung U_D . Wird die Lesehöhe h der Spulen als konstant angenommen, kann aus den induzierten Spannungen die Abstandsinformation x nach Gl. (1) oder Gl. (2) gewonnen werden. Mit Gl. (2) lässt sich zusätzlich bestimmen, auf welcher Seite des Leitdrahtes sich das Spulenpaar befindet. Werden beide Spannungen für die Auswertung heran gezogen, kann der Einfluss der Lesehöhe h kompensiert werden, Gl. (3).

$$U_S = \frac{K_S \cdot I \cdot h}{x^2 + h^2} \quad (1)$$

$$U_D = \frac{K_D \cdot I \cdot x}{x^2 + h^2} \quad (2)$$

$$x = \frac{U_D \cdot K_D \cdot I}{U_D^2 + \frac{K_D^2}{K_S^2} \cdot U_S^2} \quad (3)$$

Der Leiterstrom I wird vom Frequenzgenerator geregelt und kann als konstant betrachtet werden. Die Konstanten K_S und K_D sind spulenspezifische Kenngrößen. Der Gier einfluss auf die Messgenauigkeit ist vernachlässigbar klein. Der Einfluss durch das Wanken hängt unmittelbar mit der Lesehöhe zusammen. Zwischen Bodenfreiheit und Wankeinfluss musste ein geeigneter Kompromiss gefunden werden.

Messfehler des induktiven Messverfahrens

Es wurde eine Lesehöhe von 130 mm gewählt. Bei einem angenommenen Wankwinkel von 2° ergibt sich dann ein Fehler in der ho-

izontalen Abstandsbestimmung von weniger als 5 mm. Bild 1 zeigt die induzierten Spannungen U_S und U_D . Ein positiver Abstand bedeutet, dass sich das Spulenpaar in Fahrtrichtung rechts des Leitdrahtes befindet. Aus dieser Messung wurde die Kalibrierfunktion nach Gl. (3) zur Berechnung des Querversatzes in Bezug zum Leitdraht abgeleitet. Bild 2 zeigt den Fehler der Kalibrierfunktion für einen Messbereich von ± 250 mm. Die oben aufgestellte Forderung nach einem Messfehler von weniger als 30 mm kann für diesen Bereich erfüllt werden. Mit weiter zunehmender Entfernung des Spulenpaares nimmt der Messfehler aufgrund der geringen Steigung der Spannungskennlinien von U_S und U_D zu. Ist ein größerer Messbereich gefordert, kann die Lesehöhe vergrößert werden. Die Folge ist aber ein größerer Messfehler. Alternativ könnten zwei weitere Spulenpaare außermittig links und rechts des bestehenden Spulenpaares montiert werden.

Aufbau der induktiven Messeinrichtung

Das Spulenpaar wurde unter der nicht gelenkten Vorderachse der Maschine angebracht (Bild 3). Um den Mindestabstand zu störenden Metallteilen zu gewährleisten, ist das Spulenpaar in einem Kunststoffgehäuse eingebaut. Mit vielfältigen Einstellmöglichkeiten kann die Messantenne exakt unter der Maschine montiert werden. Für Transportfahrten wird die gesamte Vorrichtung mit wenigen Handgriffen entfernt.

Der Leitdraht ist ein hochflexibler, einadrigter Litzenleiter mit 6 mm^2 Leitungsquerschnitt mit einem für Freilandanwendungen geeigneten PVC-Mantel. Für Untersuchungen auf Asphalt wird er mit handelsüblichem Klebeband auf die Fahrbahn geklebt. Auf Grünland wird der Leitdraht mit U-förmigen Metallklammern am Boden fixiert. In Voruntersuchungen konnte kein Einfluss der Metallklammern auf die Messungen festgestellt werden. Es wird empfohlen, einen Abstand von 10 m zwischen Leitspur und Rückleitung zum Generator einzuhalten, um

Störeinflüsse auszuschließen. Nach Fixierung des Leitdrahtes werden die charakteristischen Stützpunkte wie Start und Endpunkt der Messstrecke sowie Knick- und Kreisbogenmittelpunkte mit einem RTK GPS eingemessen. Jeder Punkt wird über mindestens 50 GPS-Datensätze gemittelt.

Als zweites Messsystem zur Bestimmung der Querabweichung wird ein weiterer RTK GPS-Empfänger mit einer Antenne über dem Mittelpunkt der Vorderachse auf dem Dach der Versuchsmaschine verwendet. Die induzierten Spannungen und die GPS-Daten des Zusatz-Empfängers werden in einem Notebook erfasst. Die messtechnische Ausrüstung ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Fahrgenauigkeit automatisch geführter Landmaschinen wurde das induktive Messverfahren als geeignete Lösung ausgewählt. In einem Spulenpaar werden Spannungen durch einen wechselstromführenden Leitdraht induziert. Das Spulenpaar wird unter der Maschine montiert und befindet sich sehr nahe über dem Boden. Einflüsse durch die Wankbewegung der Maschine können somit klein gehalten werden. Aufgrund der rechtwinkligen Spulen-Anordnung können Höhenschwankungen der Maschine kompensiert werden. Der

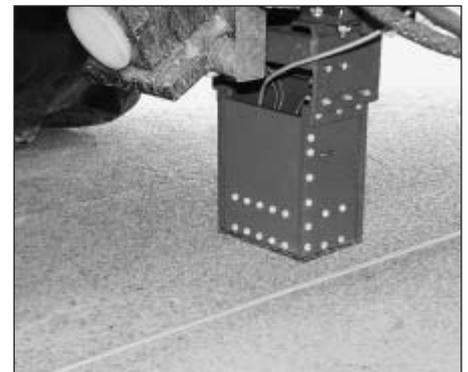


Bild 3: Leitdraht und Kunststoffgehäuse für Spulenpaar

Fig. 3: Guide wire and plastics housing for coils

Gerät	Bezeichnung	Kenndaten
Messantenne	Fa. Götting HG 19330	Betriebsspannung $U_B = 24 \text{ V}$ Ausgangsspannungen $U_S = -10$ bis $+10 \text{ V}$ $U_D = -10$ bis $+10 \text{ V}$
Frequenzgenerator	Fa. Götting HG 57400	Betriebsspannung $U_B = 24 \text{ V}$ Ausgangsfrequenz $f = 10 \text{ kHz}$
Leitdraht	Fa. Kabelwächter Kaweflex 5115	PVC PUR Steuerschleppleitung Querschnitt $1 \times 6 \text{ mm}^2$ Länge 220 m
GPS zur Leitdrahtvermessung	Fa. Trimble RTK-GPS 4700	Messfrequenz 5 Hz Korrekturdaten der eigenen Referenzstation
GPS zur Fahrkursaufzeichnung	Fa. Trimble RTK-GPS 7400MSI	Messfrequenz 5 Hz Korrekturdaten der eigenen Referenzstation

Tab. 1: Messtechnische Ausrüstung

Table 1: Measuring equipment

Leitdraht repräsentiert den geforderten Fahrkurs der Maschine. Seine Position wird mit statischen GPS-Messungen erfasst und anschließend in das Navigationssystem der Maschine eingespeist. Mit dem sehr flexiblen Leitdraht können mit wenig Aufwand vielfältige Fahrkurse sowohl auf befestigten als auch auf unbefestigten Fahrbahnen dargestellt werden. Die Anzahl der Referenzmessungen ist nur durch die Messfrequenz der Datenerfassung begrenzt.