

Automatische Lenkung mit DGPS

Automatisierte Funktionsabläufe einer Landmaschine können den Fahrer entlasten. Wird die Lenkeinrichtung mit einem hochgenauen Zweifrequenz-DGPS-Empfänger, einem Navigationssystem und einer hydraulischen Lenkungsregelung ausgerüstet, kann die Landmaschine berechneten Leitlinien selbständig folgen. Der Fahrer kann sich auf andere Aufgaben konzentrieren. Ergebnisse erster Fahrversuche eines automatisch gelenkten Feldhäckslers entlang gerader, versetzter, abgewinkelter und gekrümmter Leitlinien auf befestigter und unbefestigter Fahrbahn werden vorgestellt. Zusätzlich wurde der Einfluss verschiedener Positionen der GPS-Antenne auf das Lenkverhalten untersucht.

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

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten und der Firma Claas für die Leihgabe des Feldhäckslers.

Referierter Beitrag der **LANDTECHNIK**, die Langfassung erscheint in Bd. 5 der **Agrartechnischen Forschung**, H. 2/99

Schlüsselwörter

Automatische Lenkung, Leitlinien, GPS

Keywords

Automatic steering, guidance paths, GPS

Landmaschinen lassen sich besonders auf großen Feldern durch automatisch gesteuerte Funktionsabläufe effizient bedienen. Dadurch werden dem Fahrer eintönige und ermüdende Aufgaben abgenommen. Das Lenken einer landwirtschaftlichen Maschine verlangt vom Fahrzeugführer ein hohes Maß an Konzentration. Exakte Anschlussfahrten sind mit großen Arbeitsbreiten oft nicht mehr möglich. Gegenlicht oder Dunkelheit können die Arbeitsbedingungen zusätzlich verschlechtern. Eine automatische Lenkung bietet eine erhebliche Entlastung des Fahrers. Er kann somit seine Aufmerksamkeit auf die Steuerung und Überwachung anderer wichtiger Funktionen der Landmaschine richten.

Zahlreiche Positionssensoren für automatische Lenkungen wurden bereits an landwirtschaftlichen Fahrzeugen untersucht [1, 2, 3]. Gewöhnliche GPS-Empfänger nutzen nur eine Sendefrequenz der Satelliten und bieten mit entsprechenden Korrekturdaten einer festen Referenzstation (DGPS-Verfahren) Genauigkeiten von weniger als einem Meter. Dagegen nutzen hochgenaue Empfänger zusätzlich die zweite GPS-Sendefrequenz. Mit diesen Zweifrequenz-DGPS-Empfängern sind Positionen im Zentimeterbereich mit bis zu 20 Hz zu messen. Sie bieten sich für Navigationszwecke in der Landwirtschaft an, da die Ortung unabhängig von der Feldarbeit, Tageszeit und der räumlichen Ausdehnung der Arbeitsumgebung ist. Bisher wurden sie in Form von Mehr-Antennen-DGPS [4, 5, 6] und DGPS mit Gyroskop [7] untersucht. Sie stellen eine aufwendige Sensorik dar. Erste Fahrversuche mit DGPS als Einzelsensor wurden mit einem Mähdrehscher durchgeführt [8].

Am Institut für Agrartechnik in Hohenheim wurde ein Feldhäckslers (Claas Jaguar 820) mit einer automatischen Lenkeinrichtung ausgerüstet, die auf einem Zweifrequenz-DGPS-Empfänger basiert. Im Folgenden werden der Aufbau der automatischen Lenkung und erste Ergebnisse praktischer Fahrversuche an verschiedenen Leitlinientypen vorgestellt.

Aufbau der automatischen Lenkung

Die automatische Lenkeinrichtung setzt sich aus der GPS-Einheit, dem Navigationssystem und der hydraulischen Lenkungseinrichtung zusammen (Bild 1).

Es wird sowohl für das Fahrzeug als auch für die fest installierte Referenzstation jeweils ein Zweifrequenz-GPS-Empfänger verwendet. Die Messrate beträgt 5 Hz. Die Ortungsgenauigkeit wird mit 3 cm angegeben. Unter günstigen Bedingungen wurde eine Genauigkeit von 1 cm ermittelt.

Die Hardware des Navigationssystems besteht aus einem Notebook PC und einem Parallelportadapter. Der Anwender legt im Navigationsprogramm Typ und Verlauf der Leitlinien fest. Der Lenkwinkel wird aufgrund des momentanen seitlichen Versatzes der GPS-Antenne und der Fehlorientierung zum aktuellen Leitlinienstück bestimmt. Um das Fahrverhalten bei Kreisfahrten zu verbessern, wird die Mittelstellung der Lenkräder entsprechend dem theoretisch notwendigen Lenkwinkel, der sich für einen Kurvenradius ergibt, selbständig voreingestellt.

Die Stellsignale des Navigationssystems werden an die hydraulische Lenkungsregelung übergeben. Ein Proportionalventil regelt den Ölstrom im Lenkzylinder und somit

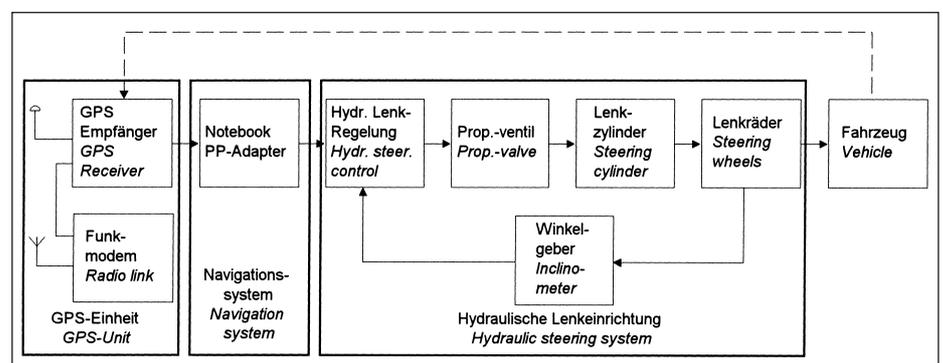


Bild 1: Aufbau der automatischen Lenkung

Fig. 1: Design of the automatic steering system

Tab. 1: Standardabweichung von seitlichem Versatz und Fehlorientierung bei Fahruntersuchungen an einer geraden Leitlinie (Ergebnisse der manuellen Lenkung in Klammern)

Table 1: Standard deviation of lateral offset and heading of driving investigations along a straight path (Results of the manual steering in parentheses)

Fahrbahn	1 m/s		1,25 m/s		1,5 m/s		2 m/s	
	Versatz (cm)	Fehlorientierung (°)						
Asphalt	2,5 (10,8)	1,3 (3,0)	3,0 (8,2)	1,5 (1,6)	2,5 (11,0)	2,4 (1,5)	6,9 (7,9)	3,2 (1,5)
Dauergrünland	2,8 (8,1)	3,4 (2,9)	3,1 (6,9)	3,2 (2,4)	2,9 (9,0)	3,2 (1,9)	6,2 (7,2)	3,0 (1,7)

Tab. 2: Maximaler Versatz sowie Standardabweichung von seitlichem Versatz und Fehlwinkel bei 50 cm Leitliniensprung mit automatischer Lenkung auf Dauergrünland (Fahrten auf Asphalt in Klammern)

Table 2: Maximal lateral offset and standard deviation of lateral offset and heading at 50 cm lateral path step with automatic steering on a meadow (drives on street in parentheses)

	1 m/s	1,25 m/s	1,5 m/s
Maximaler Versatz (cm)	17,7 (10,4)	23,8 (9,9)	7,6 (12,3)
Versatz (cm)	10,0 (7,6)	10,0 (7,8)	10,9 (9,8)
Fehlorientierung (°)	3,4 (2,0)	3,4 (2,2)	3,5 (3,4)

Tab. 3: Maximaler Versatz sowie Standardabweichung von seitlichem Versatz und Fehlwinkel bei 10° Richtungsänderung mit automatischer Lenkung auf Dauergrünland (Fahrten auf Beton in Klammern)

Table 3: Maximal lateral offset and standard deviation of lateral offset and heading at 10° change of path course with automatic steering on a meadow (drives on concrete in parentheses)

	1 m/s	1,25 m/s	1,5 m/s
Maximaler Versatz (cm)	24,1 (23,4)	27,0 (48,4)	51,0 (29,6)
Versatz (cm)	5,9 (7,1)	6,6 (13,4)	11,7 (7,8)
Fehlorientierung (°)	4,4 (3,7)	4,1 (4,6)	4,7 (3,8)

Tab. 4: Maximaler Versatz sowie Standardabweichung von seitlichem Versatz und Fehlwinkel bei 15° Richtungsänderung mit automatischer Lenkung auf Dauergrünland (Fahrten auf Beton in Klammern)

Table 4: Maximal lateral offset and standard deviation of lateral offset and heading at 15° course change with automatic steering on a meadow (drives on concrete in parentheses)

	1 m/s	1,25 m/s	1,5 m/s
Maximaler Versatz (cm)	44,3 (45,2)	50,1 (64,0)	74 (70,8)
Versatz (cm)	10,7 (10,6)	12,6 (16,4)	18,3 (17,7)
Fehlorientierung (°)	4,5 (5,6)	4,5 (4,5)	5,6 (4,4)

die Stellung der Lenkräder. Die Rückführung der Fahrzeugposition zum GPS-Empfänger ist in Bild 1 als Strichlinie eingezeichnet, da unter Umständen diese Verbindung aufgrund mangelhafter GPS-Messung verloren gehen kann. Der maximale Lenkeinschlag ist auf $\pm 10,6^\circ$ begrenzt. Ein Geber am linken Hinterrad misst den tatsächlichen Lenkwinkel und führt die Information an die Reglereinheit der Hydraulik zurück.

Fahruntersuchungen an verschiedenen Leitlinien

Auf Dauergrünland wurde das Verhalten der automatischen Lenkung an geraden, versetzten, abgewinkelten und gekrümmten Leitlinien untersucht. Um den Einfluss unterschiedlicher Fahrbahnen auf das Wankverhalten und somit auf die Ortungsgenauigkeit der in 390 cm Höhe angebrachten GPS-Antenne zu ermitteln, wurden zusätzlich Vergleichsfahrten auf befestigtem Untergrund durchgeführt. Alle Messwerte beziehen sich grundsätzlich auf die Antennenposition. Die GPS-Antenne war in Standardeinstellung 150 cm vor der Vorderachse angebracht.

Gerade Leitlinie

Für den überwiegenden Anteil landwirtschaftlicher Einsätze hat die exakte gerade Fahrt eine große Bedeutung. Leitlinien in Form von Bestandskanten, Pflanzenreihen oder Fahrgassen sind nicht immer verfügbar oder nur schwer für den Fahrer zu erkennen. Aus diesem Grund wurde das Fahrverhalten an einer geraden Strecke untersucht, zunächst manuell und anschließend automatisch gelenkt. Da an dem Feldhäcksler kein vorgelagerter Orientierungspunkt zur Verfügung. Als einzige Orientierung diente der Fahrbahnrand der Straße oder eine benachbarte Feldgrenze in etwa 50 cm seitlichem Abstand. Die Ergebnisse der Fahrversuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Auf beiden Fahrbahnen und für alle Fahrgeschwindigkeiten zeigte die automatische Lenkung für den seitlichen Versatz kleinere Abweichungen von der Leitlinie als die manuell betätigte Lenkung. Die Standardabweichung der Fehlorientierung ist im auto-

matischen Modus grundsätzlich größer. Im Vergleich von unbefestigter zu befestigter Fahrbahn sind geringfügige Unterschiede in der Genauigkeit von Versatz und Fahrzeugorientierung zu erkennen. Im manuell gelenkten Fahrzeug sind auf Dauergrünland geringere Standardabweichungen für Versatz und Fehlwinkel zu messen. Mit automatischer Lenkung sind mit Ausnahme von 2 m/s Fahrgeschwindigkeit die Ergebnisse für die befestigte Fahrbahn besser.

Leitliniensprung

Um die Reaktion der automatischen Lenkung auf eine Störung zu untersuchen, wurde eine Sprungstelle in den Leitlinienverlauf integriert. Nach einer Anfahrstrecke von 30 m läuft die Leitlinie 50 cm seitlich versetzt in gleicher Richtung weiter. Die Standardabweichungen von seitlichem Versatz und Fehlwinkel über die gesamte Strecke sind in Tabelle 2 dargestellt. Zusätzlich ist der maximale seitliche Versatz nach der Sprungstelle angegeben.

Die Ergebnisse zeigen einen maximalen seitlichen Versatz von bis zu 23,8 cm nach der Richtungsänderung bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1,25 m/s auf unbefestigter Fahrbahn. Nach der Sprungstelle konnte in allen Einstellungen mit der für gerade Leitlinien üblichen Navigationsgenauigkeit weitergefahren werden.

Abgewinkelte Leitlinie

Neben geraden Leitlinien sind meistens auch geringe Richtungsänderungen im Fahrkurs von Bedeutung. Die einfachste Form einer Richtungsänderung stellt eine abgewinkelte Leitlinie dar. Das Verhalten des automatisch gelenkten Feldhäckslers wurde an einer Richtungsänderung von 10° und 15° untersucht. Die Knickstelle wurde nach einer Anfahrstrecke von 30 m in den Leitlinienverlauf integriert. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Ergebnisse für Versatz und Fehlorientierung wiedergegeben. Zusätzlich ist der maximale Versatz angegeben, der nach Initialisierung der Richtungsänderung auftrat.

Die Ergebnisse zeigen einen maximalen seitlichen Versatz von bis zu 74 cm nach der Richtungsänderung bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1,5 m/s. Auf befestigter Fahrbahn ist für 1 m/s und 1,25 m/s ein größerer Versatz zu messen als auf unbefestigter Fahrbahn. Nach der Richtungsänderung konnte mit der für gerade Leitlinien üblichen Navigationsgenauigkeit weitergefahren werden.

Kreisbogen

Alternativ zu Richtungsänderungen mit abgewinkelten Leitlinien wurden Leitlinien in Form von Kreisbogen untersucht. Im ersten Versuch wurde der mittlere Lenkwinkel nicht dem Kurvenradius angepasst.

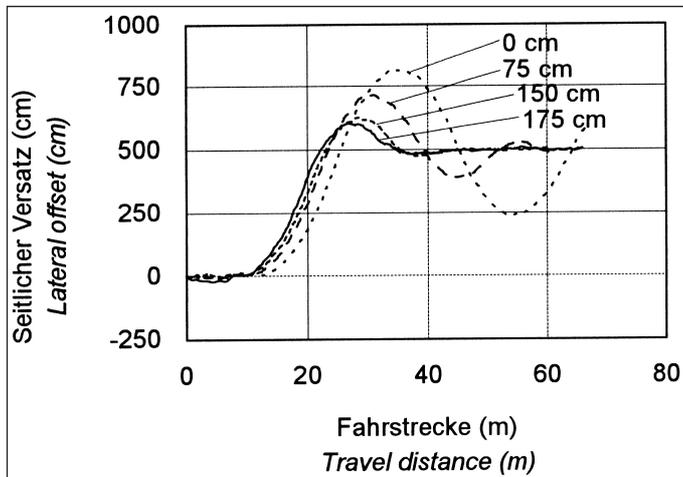


Bild 2: Einfluss der GPS-Antennenposition, 1 m/s, 5 m Leitliniensprung, Fahrbahn: Dauergrünland

Fig. 2: Influence of the GPS-antenna, 1 m/s, 5 m path step, driveway: meadow

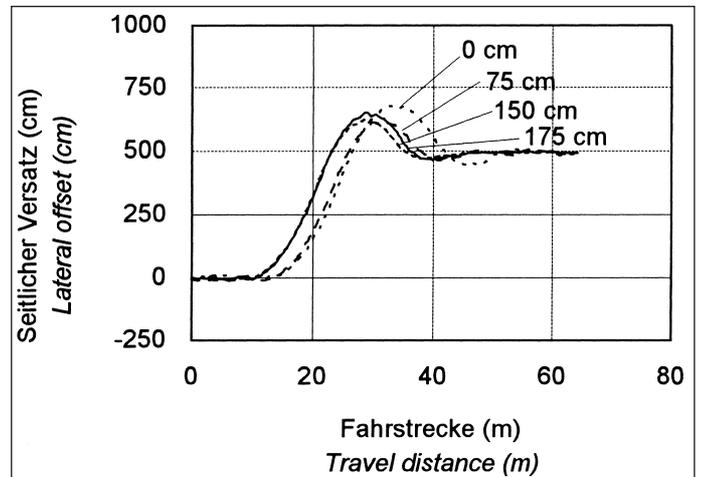


Bild 3: Einfluss der GPS-Antennenposition mit angepassten Parametern, 1 m/s, 5 m Leitliniensprung, Fahrbahn: Dauergrünland

Fig. 3: Influence of the GPS-antenna with adapted parameters, 1 m/s, 5 m path step, driveway: meadow

Nach einer Anfahrstrecke von 10 m wurde die Fahrt in einen Kreisbogen mit einem Radius von 30 m initialisiert. Es stellte sich ein mittlerer seitlicher Versatz von 19,5 cm auf der Kurvenaußenseite mit einer Standardabweichung von 10,1 cm ein. Die Standardabweichung des Fehlwinkels liegt bei 5,7°. Wurde dagegen die Mittelstellung der Lenkräder an den entsprechenden Kurvenradius angepasst, reduzierte sich der mittlere seitliche Versatz auf 1,5 cm. Die Standardabweichung von seitlichem Versatz und Fehlorientierung ist mit 9,7 cm und 6,1° annähernd gleich geblieben.

Einfluss der Antennenposition

Der Positionseinfluss der GPS-Antenne wurde an einem 5 m großen Leitliniensprung mit einer Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s auf Dauergrünland untersucht. Die Antenne wurde mit einer Vorlagerung zur Vorderachse von 0 cm, 75 cm, 150 cm und 175 cm montiert.

Im ersten Versuchsdurchgang wurden die Übertragungskonstanten für Versatz und Fehlorientierung nicht verändert. Der Verlauf des seitlichen Versatzes für die vier Positionen ist in Bild 2 dargestellt. Bei einer Montage der GPS-Antenne über der Vorderachse konnte das Fahrzeug nicht stabilisiert werden.

Im zweiten Durchgang wurden die Übertragungskonstanten bei sonst gleichen Versuchsbedingungen an die veränderten Positionen der GPS-Antenne angepasst (Bild 3). Der Verlauf des seitlichen Versatzes ist für alle vier Einstellungen annähernd gleich. Das Ansprechen ist bei 0 cm und 75 cm träger als bei den weiter vorgelagerten Positionen.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Feldhäcksler mit einem Zweifrequenz-DGPS-Empfänger, einem Navigationssystem und einer hydraulischen Lenkungsregelung ausgestattet. An verschiedenen Leitlinientypen wurde das Verhalten der Lenkungsregelung untersucht. Für gerade Leitlinien wurden 6,9 cm seitlicher Versatz bei 2 m/s auf unbefestigtem Boden gemessen. Durch die hohe Position der GPS-Antenne wird die Ortungsgenauigkeit bei wandkendem Fahrzeug reduziert. Auf einer geraden Strecke konnte mit automatischer Lenkung genauer als mit manueller Lenkung gefahren werden. Richtungsänderungen im Fahrkurs durch um 15° abgewinkelte Leitlinien haben kurzzeitig einen seitlichen Versatz von bis zu 74 cm verursacht. Für Fahrten an Kreisbogen wurde der Lenkwinkel entsprechend des Kurvenradius vorgestellt. Dadurch war es möglich, den seitlichen Versatz zur Kurvenaußenseite zu reduzieren. Am Beispiel eines 5 m großen Leitliniensprungs zeigte die Position der GPS-Antenne bei gleichen Übertragungskonstanten einen erheblichen Einfluss auf das Lenkverhalten. Durch Anpassen der Konstanten konnte der Einfluss reduziert werden.

Hier wurden erste Ergebnisse von Versuchsfahrten vorgestellt, die seit Mitte März 1999 durchgeführt wurden. In weiterführenden Arbeiten muss das bisher einfache Konzept der automatischen Lenkung hinsichtlich Geschwindigkeitseinfluss und Verhalten an Unstetigkeiten im Fahrkurs verbessert werden. In Zukunft sollen die Fahruntersuchungen auch auf ungünstigere Fahrbahnen ausgedehnt werden, die sowohl einen größeren Schlupf als auch stärkeres Wanken verursachen. Es ist zu klären, wie dann eine au-

tomatische Lenkung mit einem Zweifrequenz-DGPS-Empfänger als Einzelsensor für die Ortung realisiert werden kann.

Literatur

- [1] Jahns, G. and R.E. Young: Automatic guidance of farm vehicles. Agricultural Engineering Department Series, 1, R.E. Young (Ed) Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama, 1976
- [2] Tillet, N.D.: Automatic guidance sensors for agricultural field machines. A review. Journal of Agricultural Engineering Research 50 (1991), no. 3, pp. 167 – 187
- [3] Sevilla, F. and P. Baylou: The principles of robotics in agriculture and horticulture. Progress in agricultural physics and engineering. J. Matthews (Ed) CAB International (1991), pp. 119 – 147
- [4] O'Connor, M.L. et al.: Carrier-phase DGPS for closed loop control of farm and construction vehicles. Navigation 43 (1996), no. 2, pp. 167 – 178
- [5] O'Connor, M.L. et al.: Automatic steering of farm vehicles using GPS. 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, Minnesota, 1996
- [6] Elkaim, G.H. et al.: System identification and robust control of farm vehicles using CDGPS. ION Conference, Kansas City, M.O., 1997
- [7] Nagasaka, Y. et al.: Autonomous rice transplanting system with GPS and FOG. AgEng Conference, Oslo, 1998, AgEng-Paper No. 98-A-043
- [8] Cordesses, L. et al.: Combine harvester control using real time kinematic GPS. 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, 1999, pp. 867 – 876