

Albert Stoll, Hohenheim

# Autonome Leitlinienplanung für die Schwadföhrung

*Die automatische Föhrung von Landmaschinen entlang virtueller Leitlinien ist heute mit GPS-Navigationssystemen realisierbar. Eine M6glichkeit zur Berechnung virtueller Leitlinien besteht in der Weiterverarbeitung von aufgezeichneten Fahrkursdaten einer vorausgefahrenen Maschine (Beispiel Schwader-Feldhacksler-Arbeitskette). Die Schwierigkeit liegt dabei in der optimalen Erntereihenfolge der Schwaden und der daraus resultierenden Wendevorgänge. Das in Hohenheim entwickelte Planungsprogramm berechnet autonom Arbeits- und Wendeleitlinien für den Ernteeinsatz eines mit GPS-Navigation ausgerüsteten Feldhackslers.*

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  
 Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle F6rderung der Arbeiten, der Firma Claas/Harsewinkel für die Leihgabe des Feldhackslers sowie Frau S. Hagel, Frau E. W6rner und Herrn J. Haberland für ihre Unterst6tzung bei der Versuchsdurchf6hrung.

## Schlüsselw6rter

Automatische Lenkung, autonome Leitlinienplanung, Schwadf6hrung

## Keywords

Automatic steering, autonomous path planning, guidance along swaths

Literaturhinweise sind unter LT 01212 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Die elektronisch geregelte F6hrung landwirtschaftlicher Fahrzeuge gewinnt eine zunehmende Bedeutung. Dies spiegelt sich nicht zuletzt durch die aktuellen Entwicklungstätigkeiten in Industrie und Forschung wider [1, 2, 3]. Die Struktur von Fahrzeugf6hrungen lässt sich gliedern in die Ortungssensorik, den Fahrzeugregler und das Fahrzeug selbst mit seinen Stellgliedern für Lenkung und Geschwindigkeit. Die Ortungssensorik dient zur Bestimmung der Regeldifferenz, die sich durch Vergleich des Sollzustandes (Position, Fahrtrichtung, Geschwindigkeit) mit dem aktuellen Zustand des Fahrzeugs ergibt. Der Sollzustand des Fahrzeugs wird durch die Leitlinie definiert. Wird die Fahrzeugf6hrung auf die Regelung der Lenkung reduziert, sind grundsätzlich zwei Leitlinientypen m6glich: physikalisch vorhandene Leitlinien etwa in Form von Bestandskanten oder Pflanzenreihen sowie virtuelle Leitlinien, die in einem geeigneten Koordinatensystem berechnet werden [4].

Virtuelle Leitlinien bieten den Vorteil, dass sie einerseits losgel6st vom Arbeitsprozess oder der Feldstruktur geplant und andererseits mit zusätzlich Informationen für

die Fahrzeugf6hrung versehen werden können. Sie können entweder manuell oder durch Lernprogramme berechnet werden. Bei der manuellen Berechnung werden die Koordinaten der Stützpunkte und die Geometrie der Leitlinien vorgegeben [5, 6]. Für diese Aufgabe sind auch auf CAD-Software basierende Programme bekannt [3]. Mit Lernprogrammen wird eine manuell gef6hrte Referenzfahrt durchgef6hrt. Darauf basierend können anschließend Leitlinien für die elektronisch geregelte Fahrzeugf6hrung berechnet werden [7, 8].

Ein landwirtschaftliches Fahrzeug orientiert sich im Feld häufig am Fahrkurs einer bereits vorausgefahrenen Maschine. Basierend auf diesem bekannten Fahrkurs werden Leitlinien für das nachfolgende automatisch gef6hrte Fahrzeug berechnet. Dieses Verfahren wurde am Beispiel der Schwader-Feldhacksler-Arbeitskette untersucht [9] und nun zu einer autonomen Leitlinienplanung für die Schwadf6hrung erweitert.

## Aufzeichnung des Schwadverlaufes

Der Verlauf des Schwades wurde während des Schwadvorgangs aufgezeichnet. Hierfür wurde ein Zweifrequenz-DGPS verwendet, welches Ortungsgenauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter bietet. Die GPS-Antenne des Fahrzeugs wurde über dem Schwadablagepunkt angebracht. Mit einer Frequenz von 5 Hz wurde der Verlauf der Schwaden gemessen und auf einem Notebook PC aufgezeichnet. Wendevorgänge mit ausgehobenem Schwader wurden nicht berücksichtigt. Wurden zwei Schwaden mit-

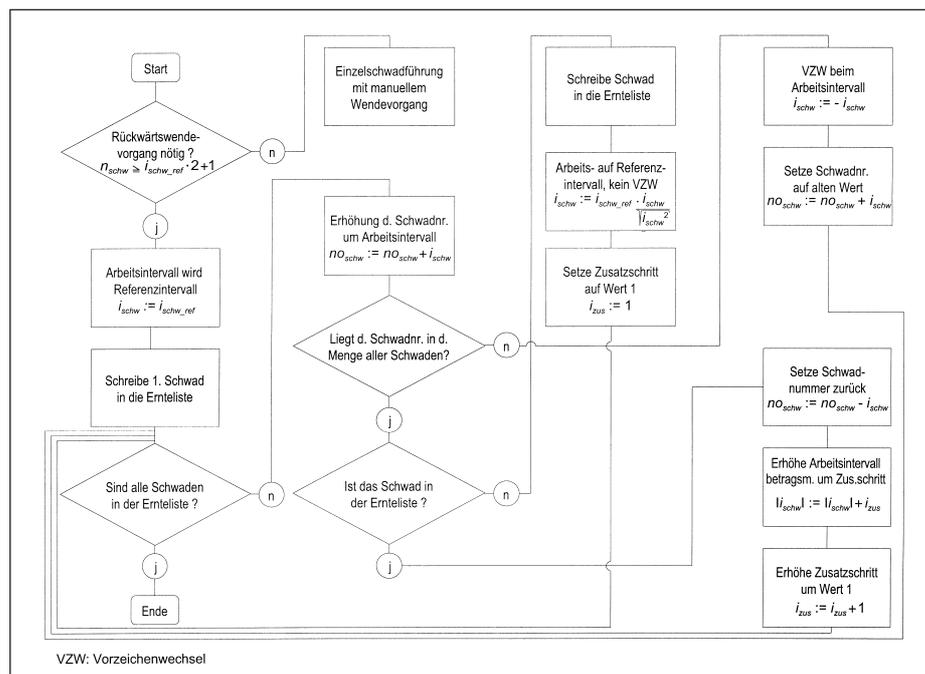


Bild 1: Bestimmung der Erntereihenfolge

Fig. 1: Determination of harvesting order

tels Hin- und Rückfahrt zusammengelegt, wurde nur die Rückfahrt aufgezeichnet.

### Autonome Leitlinienplanung

#### Grundsätzlicher Ablauf

Zu Beginn der Leitlinienplanung werden die Daten der Schwadaufzeichnung in das Planungsprogramm geladen. Dort werden zunächst die Daten zu jedem Schwad von ihrer zeitlichen Reihenfolge, die sich durch die Aufzeichnung während des Schwadens ergeben hat, in eine räumliche Reihenfolge umsortiert und mit einer fortlaufenden Identifizierungsnummer  $no_{schw}$  gekennzeichnet. In welchem zeitlichem Ablauf geschwadet wurde, spielt folglich keine Rolle. Schwaden des Vorgewendes werden noch nicht berücksichtigt.

Anschließend werden alle Abstände  $d_{schw}$  zwischen den Schwadendpunkten berechnet und der minimale Abstand bestimmt. Unter Berücksichtigung des minimalen Wenderradius  $r_{wende}$  des automatisch gelenkten Feldhäckslers kann das Referenzintervall  $i_{schw\_ref}$  berechnet werden.

$$i_{schw\_ref} = \text{round}\left(\frac{2 \cdot r_{wende}}{\min(d_{schw})}\right)$$

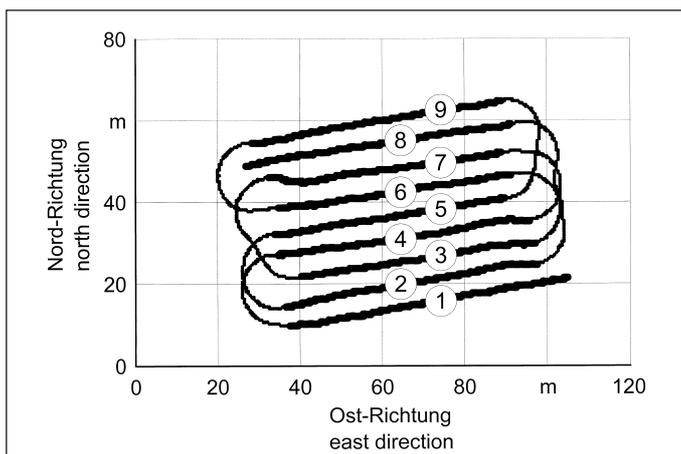
Das Referenzintervall definiert den minimalen Abstand zwischen zwei Schwaden, die nacheinander geerntet werden sollen. Nach der Abstandsberechnung wird die Reihenfolge ermittelt, nach welcher die Schwaden abgeerntet werden. Da die Erntereihenfolge der Schwaden in einer Liste gespeichert wird, deren Anfang und Ende verknüpft ist, kann der Ernteprozess an einem beliebigen Schwad begonnen werden. In Abhängigkeit von diesem Startpunkt werden dann die Arbeits- und Wendeleitlinien selbständig berechnet.

#### Ermittlung der Reihenfolge der Schwadern

Die Bestimmung der Erntereihenfolge der Schwaden ist in Form eines Flussdiagrammes dargestellt (Bild 1). Zu Beginn muss geprüft werden, ob die Anzahl der Schwaden ausreicht, um alle Wendevorgänge nur in Vorwärtsfahrt durchführen zu können. Sollte dies nicht der Fall sein, werden nur Arbeitsleitlinien berechnet und die Wendevorgänge sind manuell durchzuführen. Aus der Liste der räumlich sortierten Schwadverläufe wird das erste Schwad ( $no_{schw} = 1$ ) in die neue Liste der Erntereihenfolge übertragen. Das nächste Schwad  $no_{schw}$  wird mit Hilfe des Arbeitsintervalls  $i_{schw}$ , welchem zu Beginn der Wert des Referenzintervalls  $i_{schw\_ref}$  zugewiesen wird, berechnet. So wird die räumlich sortierte Schwadliste entsprechend des Arbeitsintervalls in die Ernteliste übertragen. Das Vorzeichen des Arbeitsintervalls wird gewechselt, wenn eine berechnete

Bild 2: Fahrkurs des automatisch geführten Feldhäckslers; Erntereihenfolge der Schwaden: 8-2-5-9-6-3-7-4-1

Fig. 2: Driving course of the automatically guided forage harvester; harvesting order: 8-2-5-9-6-3-7-4-1



Schwadnummer außerhalb der tatsächlich vorhandenen Schwadanzahl liegt. Wenn eine Schwadnummer errechnet wurde, die bereits in die Ernteliste übernommen wurde, wird das Arbeitsintervall betragsmäßig um einen Schritt erhöht. Nachdem ein Schwad erfolgreich in die Ernteliste übertragen wurde, wird das Arbeitsintervall betragsmäßig auf das Referenzintervall zurückgesetzt. Wurden alle Schwaden in die Ernteliste übertragen, ist der Sortiervorgang abgeschlossen.

#### Berechnung der Arbeits- und Wendeleitlinien

Nach der Berechnung der Erntereihenfolge kann der Startpunkt der Arbeit definiert werden. Vorzugsweise wird der Feldhäckslers dazu an ein Schwad gefahren. Das Leitlinienplanungssystem sucht aufgrund dieser Position die entsprechende Stelle in der Ernteliste und berechnet von dieser Position aus entsprechend der zuvor ermittelten Erntereihenfolge alle Arbeits- und Wendeleitlinien. Für alle Schwaden werden Arbeitsleitlinien in Form von Linienelementen berechnet. Die Länge der Elemente wird so angepasst, dass eine hohe Fahr- und Schwadaufnahmegenauigkeit gewährleistet ist [9]. Die Arbeitsleitlinien werden dann durch Wendeleitlinien verbunden. Jede Wendeleitlinie setzt sich aus zwei Kreisbögen zusammen, die mit einer geraden Strecke verbunden sind. Die Geometrie der Leitlinie richtet sich nach den End- und Startpunkten sowie der Ausrichtung der aufeinanderfolgenden Arbeitsleitlinien. Die Berechnung erfolgt selbständig und individuell für jeden Wendevorgang. Nachdem für das gesamte Feld alle Leitlinien berechnet wurden, können sie dem Navigationssystem des Feldhäckslers übergeben werden.

#### Praktische Erprobung

Die Funktionsweise der autonomen Leitlinienplanung wurde für verschiedene Felder, auf denen der Schwadverlauf aufgezeichnet wurde, erfolgreich erprobt. Im Rahmen ei-

nes Feldversuchs konnten bereits erste praktische Erfahrungen gesammelt werden. Es wurden während des Schwadens neun Schwaden aufgezeichnet. Basierend auf diesen Daten berechnete das Planungsprogramm zunächst wie in Bild 1 dargestellt die Erntereihenfolge beginnend mit der Identifizierungsnummer  $no_{schw} = 1$ . Anschließend wurden, nachdem der Startpunkt festgelegt worden war ( $no_{schw} = 8$ ), die Arbeits- und Wendeleitlinien autonom berechnet. Diese Leitlinien wurden zu dem Navigationssystem des automatisch gelenkten Feldhäckslers transferiert. Der Erntevorgang konnte ohne jeglichen manuellen Eingriff in die Lenkungsregelung durchgeführt werden. Der Fahrkurs ist in Bild 2 dargestellt. Die Schwaden, gekennzeichnet mit ihren Identifizierungsnummern, wurden in folgender Reihenfolge geerntet: 8-2-5-9-6-3-7-4-1. Der Fahrer konnte sich zu jeder Zeit auf die Bedienung und Überwachung des Vorsatzgerätes und Auswurfkrümmers konzentrieren.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Die autonome Leitlinienplanung ist ein weiterer Schritt in der Automatisierung landwirtschaftlicher Feldarbeiten. Für die Ernte von Halmgut mit einem Feldhäckslers, der mit Zweifrequenz-DGPS-Empfänger, Navigationssystem und Lenkungsregelung ausgerüstet ist, wurde ein Berechnungsverfahren für eine effiziente Schwadföhrung entwickelt. Es werden selbständig Leitlinien für den Arbeitsprozess und für die Wendevorgänge berechnet. Somit wird der Fahrer während des gesamten Erntevorgangs von der Lenkarbeit entlastet. Die Funktionsweise konnte in einem praktischen Versuch erfolgreich nachgewiesen werden. In der folgenden Saison werden weitere Untersuchungen auch auf größeren Parzellen folgen.