

---

# **VDI/MEG KOLLOQUIUM AGRARTECHNIK**

---

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
LANDTECHNIK WEIHENSTEPHAN  
FORSCHUNGSVERBUND AGRARÖKOSYSTEME MÜNCHEN

HEFT 14

## **ORTUNG UND NAVIGATION LANDWIRTSCHAFTLICHER FAHRZEUGE**

Tagung Weihenstephan, 5./6. März 1992

VDI-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (VDI-AGR)  
GRAF-RECKE-STR. 84 · D-4000 DÜSSELDORF 1

(C)VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik  
Herausgegeben von der VDI Gesellschaft Agrartechnik  
Graf-Recke-Str. 84 · D-4000 Düsseldorf 1  
Redaktion: Privatdozent Dr. Dr. habil. H. Auernhammer  
TA M. Mittermeier  
Institut für Landtechnik  
Vöttingerstr. 36 · 8050 Freising

Alle Beiträge sind unveränderte Originale der Autoren  
Erste Auflage 250 Stück (4.3.92)  
Zweite Auflage 200 Stück (11.5.92)

## Vorwort

Die Technik der Außenwirtschaft hat in den vergangenen 40 Jahren auf mechanischer Basis eine exakte Bearbeitung des Bodens und der Pflanzen im Sinne uniformer Behandlungsmaßnahmen angestrebt und erreicht. Der gleichmäßige Bestand war das Ziel ebenso wie der gleichmäßig hohe Ertrag unabhängig von den unterschiedlichen Gegebenheiten des Bodens und der Wasserführung. Überdüngung auf der einen und Unterdüngung auf der anderen Seite waren ebenso die Folge, wie uniformer Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Pestiziden. Nicht zuletzt dadurch geriet die Landwirtschaft zunehmend in die Diskussion um eine mögliche Umweltbelastung.

Mit dem neuen Bauteil "Elektronik" erscheint nunmehr eine Veränderung dieser Situation möglich. Erstmals wird dadurch mechanische Technik intelligent. Sie kann auf die natürlichen Variabilitäten der Böden und der Pflanzen eingehen und sie kann sie in allen Arbeitsgängen immer wieder berücksichtigen. Voraussetzung dazu ist jedoch eine einfache, preiswerte, exakte und zugleich zuverlässige Ortung und Navigation im Feld ohne zusätzliche Einrichtungen auf dem einzelnen Schlag.

Für Wissenschaft, Industrie, Beratung und Praxis erwächst daraus eine neue Herausforderung. Schlagworte wie "linearisierter Schlag", "Laserortung", "Global Positioning System (GPS)", "differentielles GPS", "Koppelnavigation" und "Autopilot in der Landwirtschaft" verdeutlichen neue Möglichkeiten und künftige Lösungsansätze. Sie erfordern schon im Vorfeld der Realisierung eine sachliche wissenschaftliche Diskussion und Bearbeitung.

Dieses Kolloquium als gemeinsame Veranstaltung von VDI-Gesellschaft Agrartechnik (VDI-AGR), Max-Eyth Gesellschaft für Agrartechnik (MEG), Forschungsverbund Agrar-ökosysteme München (FAM) und Landtechnik Weihenstephan bietet dazu eine erste Plattform. Neben einer Bestandsaufnahme sollen erkennbare Lösungswege aufgezeigt und der dazu erforderliche Forschungsbedarf diskutiert werden.

Weihenstephan, den 18.2.1992

Prof. Dr. H. Schön  
(Institutsdirektor)

PD Dr. H. Auernhammer  
(Projektleiter)



## Inhaltsverzeichnis

<b>Rechnergestützter Pflanzenbau am Beispiel der umweltorientierten Düngung</b>	1
H. Auernhammer, TUM Weihenstephan	
<b>Nutzung der Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge zur Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes - wirtschaftliche Grundsätze und praktische Anwendung</b>	17
H. Kögel und G. Jahns, FAL Völkenrode	
<b>Bornimmer Arbeiten, die Ansätze zur Entwicklung teilstückgerechter Feldwirtschaft bieten</b>	35
R. Winter und K. Baganz, AT Bornim	
<b>Technische Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld</b>	49
T. Muhr und H. Auernhammer, TUM Weihenstephan	
<b>Lösungsansätze zur Positionsbestimmung mobiler Landmaschinen mittels eines Trägheitsnavigationssystems</b>	57
G. Bernhardt und W. Damm, TU Dresden	
<b>Grundlagen und Anwendung von GPS und DGPS - Stand und Entwicklung, Arbeiten der DGON -</b>	71
W. Lechner, Avionik Zentrum Braunschweig	
<b>Absehbare Entwicklungen bei GPS und rechtliche Voraussetzungen</b>	77
B. Hoßfeld, Systemtechnik Nord GmbH Hamburg	
<b>Differentielles GPS, der Schlüssel zur hochgenauen Positionsbestimmung</b>	83
J. Straub, SEL-ALCATEL Stuttgart	
<b>Möglichkeiten der Kooperation Raumfahrt / Landwirtschaft</b>	85
P. Hartl, Uni Stuttgart	

<b>Technische Komponenten für die Erstellung von Ertragskarten während der Getreideernte mit dem Mähdröschler</b> P. Reitz und H.D. Kutzbach, Uni Hohenheim	91
<b>Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991</b> M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier, P. v. Perger und H. Auernhammer, TUM Weihenstephan	107
<b>Theoretische und technische Ansätze für die Spurführung mobiler Aggregate</b> L. Kollar, HUMBOLDT Berlin	123
<b>Automatische Steuerung von landwirtschaftlichen Geräten</b> R.P. van Zuydam, IMAG-DLO Wageningen	145
<b>Anschlussfahren von Feldmaschinen mit Differential - GPS</b> P. Jürschik und H. Beuche, AT Bornim	159
<b>Entwicklung eines Pflanzenunterscheidungssystems auf bildanalytischer Basis zur Bonitierung und zukünftig zur direkten Steuerung bei der Unkrautbekämpfung</b> H. Georg und F.-J. Bockisch, Uni Gießen	175
<b>Ortung und Navigation in der Landwirtschaft der USA - Stand und Ausblick</b> J.K. Schueller, S. Borgelt und K. Wild, ASAE	183
<b>Lokale Unterschiede von Wachstum und Ertrag bei Winterweizen anhand von Boden- und Bodennährstoffkarten</b> H. Delcourt, J. de Baerdemacker und J. Deckers, Uni Leuven, Belgien	191
<b>Schlagkartei und Ortung - Voraussetzungen und Lösungen</b> J. Begemann, K&W Lemgo	205

## Rechnergestützter Pflanzenbau am Beispiel der umweltorientierten Düngung

Hermann Auernhammer,  
TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik

### 1. Einleitung

Die Pflanzenproduktion hat seit Justus von Liebig einen nie vorstellbaren Fortschritt erfahren. Bedingt durch verbesserte und termingerechtere Bodenbearbeitung, leistungsfähigeres Saatgut, verfeinertem prophylaktischen und kurativen Pflanzenschutz und durch schlagkräftige Ernteverfahren konnte bei begrenzten Produktionsflächen und zunehmender Bevölkerung die Ernährung immer sicherer gemacht werden. Aus den Produktionsschlächten der Landwirte der Vergangenheit entstanden die Subventionskriege zur Produktionseinschränkung der Gegenwart mit all ihren negativen Auswirkungen auf die gesamte Gesellschaft und auf das Image der Landwirtschaft schlechthin. Zugleich erfuhr diese Problematik im gestiegenen Umweltbewußtsein eine zusätzliche Dimension als neue, noch nicht vollständig erkannte und für viele sogar noch unvorstellbare Herausforderung.

### 2. Problemanalyse

Die Pflanzenproduktion muß deshalb künftig an die neuen Gegebenheiten angepaßt werden. Zu den schon immer bestehenden Bemühungen um minimale Produktionskosten kommt nun die Forderung nach "umweltneutraler Produktion" hinsichtlich der eingesetzten Stoffe bei minimiertem Energie-Input hinzu und sie führt damit zu einem Maximum an benötigten Informationen.

Aus der Sicht der Kosten nehmen Technik und Düngung die höchsten Anteile ein (Tab. 1). Kostenreduzierungen müssen deshalb an diesen beiden Kostenstellen ansetzen und eine stärkere Maschinenauslastung oder billigere Maschinen beim Aufwand ermöglichen.

Bei der Düngung, aber auch bei Pflanzenschutz und Saatgut müssen dagegen Reduzierungen angestrebt werden, um auch dort Kosten zu senken und um gleichzeitig die Stoffeinträge in die Umwelt zu minimieren.

Aus der Sicht der Umweltbelastung treffen Bemühungen um Kostenreduzierungen und Umweltschonung zusammen. Technik muß so angepaßt werden, daß damit Schäden durch Bodendruck und durch Schlupf vermieden werden. Applikationsstoffe sind so einzusetzen, daß sie nur in der benötigten Menge an der richtigen Stelle ausgebracht und ohne Nebenwirkungen vollständig in den pflanzlichen Stoffkreislauf integriert werden.

Tabelle 1: Relative Anteile an den variablen Kosten bei ausgewählten Produkten der Pflanzenproduktion (nach BAUER 1986).

Fruchtart	Winterweizen	Wintergerste	Raps	Körnermais	Zuckerrüben
Ertrag(dt/ha)	57	56	28	67	550
Masrkteistung(DM)	2 853	2 548	3 136	3 752	8 030
Variable Kosten	1 260	1 251	1 478	2 061	2 928
Deckungsbeitrag	1 637	1 297	1 658	1 691	5 102
<b>Kostenanteile (%)</b>					
Trocknung	5	5	14	32	-
Versicherung	6	6	12	4	5 *
überbetr. Maschineneinsatz	23	22	19	19	22
variable Maschinenkosten	13	13	11	8	17
Pflanzenschutzmittel	10	12	10	5	13
Düngemittel	32	28	31	25	36
Saatgut	11	14	3	7	7
<b>Anteil Maschinenkosten</b>					
Anteil Maschinenkosten	36	35	30	27	39
<b>Anteil Verteilgut</b>					
Anteil Verteilgut	53	54	44	37	56

\* Löhne für Saison-AK

Analytisch zeigen sich in der statistischen Nährstoffbilanz die heutigen Probleme sehr deutlich (Abb. 1).

Ständig steigende Erträge sind vor allem den überhohen mineralischen N-Düngungsgaben zuzuschreiben. Wird dazu auch der organische Stickstoff in die Betrachtung einbezogen, dann kann am Beispiel der Statistik für Bayern eine geradezu dramatische Entwicklung abgelesen werden (Abb. 2).

N-Düngung heute ist danach Zweifach-Düngung. In Konsequenz daraus sind die Einträge in die Fließgewässer aus der Landwirtschaft nach WERNER (1989) zu sehen. Nach dieser Untersuchung kann bei Phosphat von einem Eintrag aus der Landwirtschaft (alte Bundesländer) von etwa 38 % ausgegangen werden, er ist zu etwa 97 % auf Erosion zurückzuführen. Noch höher ist der Anteil beim Nitratreintrag mit etwa 46 %, der vor allem der Überdüngung zuzuschreiben ist.

Über die daraus entstehenden Kosten gibt SCHINDLER (1990) für Niedersachsen Hinweise, wobei er eine optimale Extensivierung der Düngung zugrunde legt (Tab. 2).

Und warum, so stellt sich aus all diesen Zusammenhängen die Frage, tut die Landwirtschaft nicht das Erforderliche, um nicht nur das ihr immer stärker anhaftende Negativ-Image als Umweltbelastet Nr. 1 zu verringern und zugleich die möglichen Kostensenkungen auszuschöpfen ?

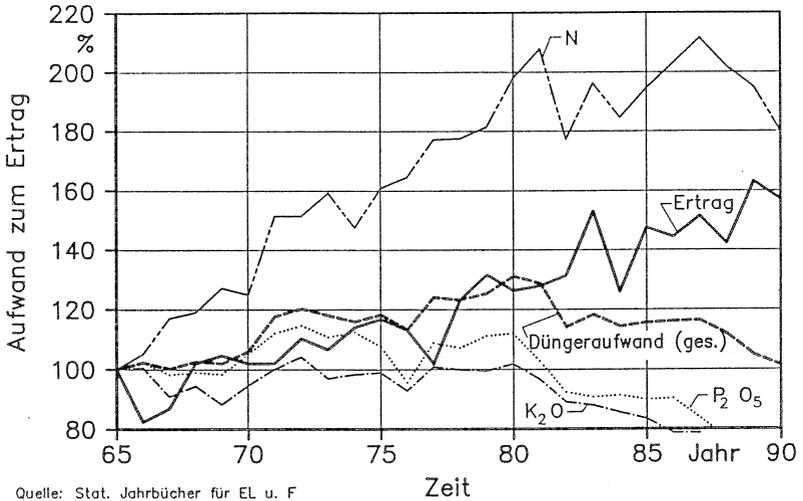


Abbildung 1: Relativer Düngeraufwand und relativer Ertrag in Getreideeinheiten der BR-Deutschland (1965 - 1987).

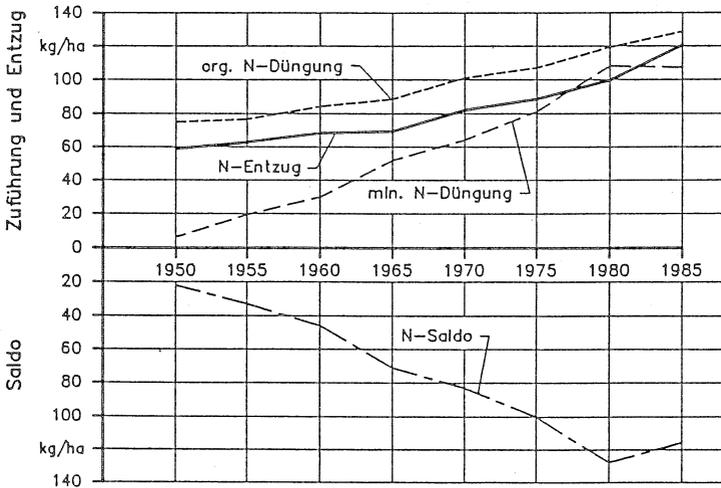


Abbildung 2: Entwicklung der Stickstoffbilanz landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern (nach MAIDL 1990).

Zum einen kommt rein psychologisch ein Informationsdefizit zum Tragen. Unsicherheit in der Erwartung eines benötigten oder angestrebten Erfolges zwingt zum überzogenen Handeln, um letztlich auf der sicheren Seite des Lebens (sprich wirtschaftlichen Erfolges) zu stehen.

Zum anderen ermöglicht die technische Mechanik nur eine begrenzte Genauigkeit aufgrund damit nicht realisierbarer schneller und exakter Regelkreise.

Tabelle 2: Überdüngungskosten in Niedersachsen bei optimaler Düngerextensivierung.

Betriebsgröße Betriebssystem Kammergebiet	Überdüngungskosten in DM/ha			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Summe
Betriebe insgesamt	98	70	41	209
Betriebsgröße 10 ha LF	19	65	59	145
Betriebsgröße 10 - 30 ha LF	56	88	50	195
Betriebsgröße 30 - 50 ha LF	186	70	51	311
Betriebsgröße 50 ha LF	78	60	36	175
Marktfuchtbetriebe insgesamt	16	43	33	93
Futterbaubetriebe insgesamt	156	80	48	286
Veredelungsbetriebe insgesamt	155	63	45	299
Gemischtbetriebe insgesamt	26	71	24	125
Kammer Hannover	48	54	36	138
Kammer Weser-Ems	228	82	53	367

Quelle : Schindler, Universität Göttingen; empirische Untersuchungen 1990

Vor allem aber fehlt das zuverlässige technische Hilfsmittel, um beliebige ortsbezogene Handlungsmaßnahmen einzuleiten und durchzuführen. Nur so aber könnte die Variabilität der Bodenfruchtbarkeit aus Bodenart, Wasserführung und Nährstoffvorrat bzw. Nährstoffversorgung kleinräumig in die Produktion einbezogen werden. "Wissen wo (Ortung)" und "beliebig wieder auffinden (Navigation)" stellen somit die Schlüssel für eine verbesserte, umweltschonende und zugleich kostenminimierende Pflanzenproduktion dar.

### 3. Düngung nach Entzug als rechnergesteuerter Regelkreis

Aufbauend auf diese Problematik muß demnach ein verbesserter Regelkreis aufgebaut werden. Er ist nach den derzeitigen Erkenntnissen des Pflanzenbaues am Entzug

zu orientieren. Folglich muß er an der Ernte als erster Bilanzierungsgröße im Vergleich zur ausgebrachten Düngermenge ansetzen und er muß die Ortung und Navigation in das Gesamtsystem einbeziehen. Darüber hinaus muß er auch die Informationsströme berücksichtigen, weshalb die Informationsverarbeitung zur Zentrale in einem derartigen System wird. Bei Betrachtung der dafür benötigten Technik führt dies vereinfacht zu einem in sich geschlossenen System (Abb. 3).

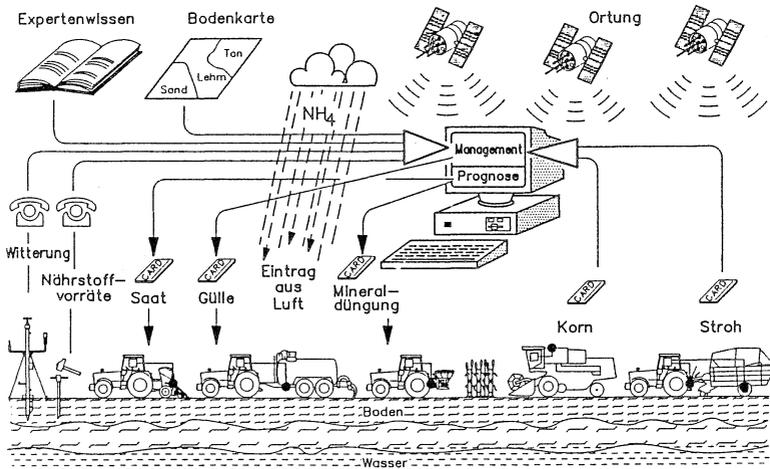


Abbildung 3: Technik im rechnergesteuerten System einer "umwelt- und ertragsorientierten Düngung".

Es betrachtet die lokalen System-Outputgrößen (rechts vom Ertrag), führt diese nach Menge, Ort und Zeit zur Informationszentrale. Jene erhält weitere Informationen über Boden (fix) und Witterung (dynamisch) und leitet mit dem entsprechenden Expertenwissen Prognosen ab. Sie müssen an den lokalen Gegebenheiten des Bodens überprüft werden (tatsächliche Nährstoffverfügbarkeit gegenüber einer Simulation) und führen dann zur Vorgabe der optimierten Applikationsmengen an den jeweiligen Applikationsorten zu den besten Applikationszeitpunkten.

Jede Technik innerhalb dieses Systems muß im Hinblick auf das Gesamtsystem Mindestanforderungen erfüllen:

### 3.1 Ortung

Die Ortung kann ausschließlich zur Überwachung oder aber zur ortsbezogenen Steuerung herangezogen werden.

Bei den Erntemaßnahmen stellt die Ortung ausschließlich eine Überwachungsgröße dar. Ortungs- und Ertragsdaten können deshalb als Rohdaten auf der Ernteeinheit gesammelt und im Betriebsrechner verarbeitet werden. Innerhalb dieses Vorganges können auch Nachbearbeitungen (postprocessing) der Daten stattfinden und es können Verdichtungen vorgenommen werden.

Ortung als Teil der Navigation erfordert dagegen die Echtzeitverarbeitung, also einen höheren Aufwand und evtl. eine höhere Genauigkeit. Verbunden mit den daraus abgeleiteten Navigationshinweisen muß zudem die Informationsdarstellung in die Technik einbezogen werden, um dem Fahrer eine entsprechende Reaktionsmöglichkeit zu eröffnen.

### 3.2 Ertragsermittlung

Der Ertrag stellt den Nährstoffentzug dar. Nach eigenen Untersuchungen sind auf Einzelflächen sehr große örtliche Ertragsschwankungen gegeben (Abb. 4).

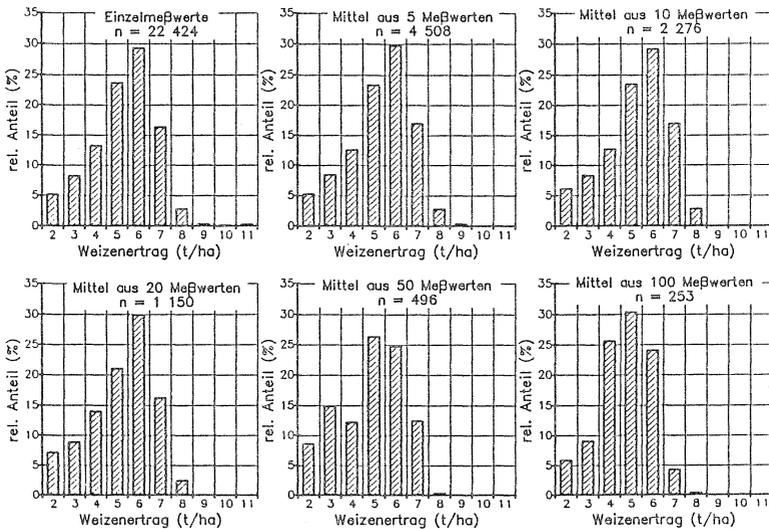


Abbildung 4: Ertragsschwankungen für Winterweizen bei unterschiedlicher Meßwertverdichtung (Scheyern 1990; Sorte ORESTIS; Flachfeld; 17,1 ha; FLOWMETER in DATAVISION).

Meßtechniken im Mähdrescher müssen diese Ertragsschwankungen sicher erfassen können. Auch die örtliche Zuordnung muß trotz Meßverzug (Zeit zwischen Schnitt bei Getreide und Meßwertaufzeichnung am Korntankelevator) bei unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten weitgehend präzise erfolgen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß

Differenzierungen immer im Bezug zu Arbeitsbreiten (Schneidwerksbreite) bei der Ernte selbst und bei den darauf folgenden Verteilmaßnahmen stehen. Letztere sind an Standards für Fahrgassensysteme gebunden und bewegen sich zwischen 12 und 36 m, wobei die Teilbreiten der Verteilgeräte die untere Grenze setzen. Begleitgrößen wie Kornfeuchte, Inhaltsstoffe und das Hektolitergewicht sind weitere Überwachungsgrößen und können bei der Datenverarbeitung hinzugefügt werden.

### 3.3 Witterung

Der örtliche Witterungsverlauf bestimmt die lokalen, bzw. regionalen Gegebenheiten. Witterungsdaten sind deshalb unverzichtbar. Auch sie stellen Überwachungsgrößen dar und werden deshalb erst bei Bedarf im Entscheidungsverfahren benötigt. Sowohl Bayern, als mittlerweile auch Schleswig-Holstein haben vorbildliche zentrale Überwachungssysteme aufgebaut und stellen deren Daten für einzelbetriebliche Entscheidungen zur Verfügung (Abb. 5).

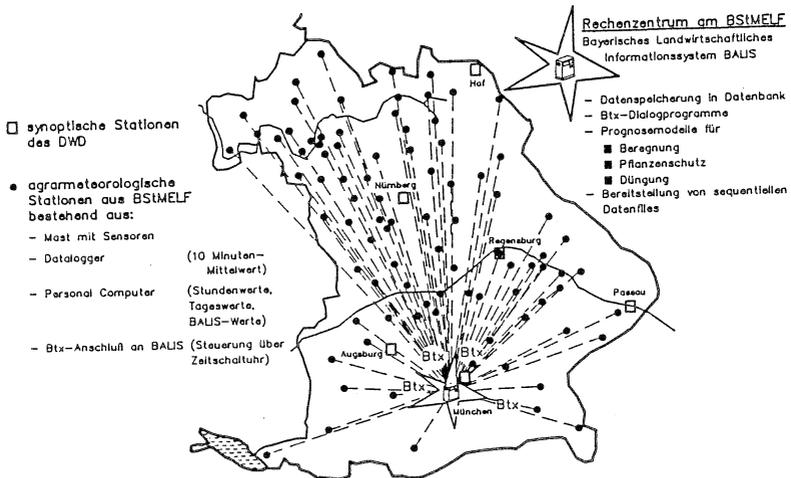


Abbildung 5: Netz kleiner elektronischer Wetterstationen in Bayern und deren Anbindung an den zentralen Rechner in München.

### 3.4 Bodenprobe

Die Bodenbeprobung als überwachende Zustandsvariable erfolgte in der Vergangenheit ausschließlich nach dem Zufallsprinzip hinsichtlich der örtlichen Wahl und einer guten Vermischung für eine gleichmäßige, allgemein gültige Beschreibung eines Schläges. Wird dagegen ein System nach Teilflächen mit gleichen Erträgen, bzw. gleichem Entzug angestrebt, dann muß auch die Bodenbeprobung auf dieses neue

System ausgerichtet werden. Eine gezielte navigatorische Probenziehung an definierten Punkten wäre deshalb als künftiges Verfahren anzusehen. Mit der Position versehene Proben würden zudem neue logistische Möglichkeiten bei der Probenverarbeitung und -zuordnung eröffnen.

### 3.5 Saatmengenanpassung

Eine teilschlagbezogene Pflanzenproduktion wirft die Frage nach einer teilflächenbezogenen Saatgutverteilung auf. Sie betrifft zum einen die angestrebte Pflanzenzahl pro qm und führt dabei zu einer Variation der Saatmengen je m Arbeitsweg. Sowohl für Drillmaschinen wie auch für Einzelkorndrillen existieren geeignete technische Lösungen und könnten sofort in einen rechnergesteuerten Regelkreis einbezogen werden. Sie betrifft zum anderen aber auch die Saattiefe nach Bodenart und nach Wasserführung.

### 3.6 Organische Düngung

Bezogen auf die oben aufgezeigte Situation einer derzeit doppelten Düngung je erzielter Ertragseinheit ergeben sich die Forderungen nach einer vollständigen Einbeziehung der organischen Düngung in die Gesamtnährstoffzufuhr. Nach pflanzenbaulichen Erkenntnissen ist dies nur durch Düngung während der Vegetation möglich. Für Getreide und Mais führt dies zur Einbringung maximal möglicher, aber vollständig pflanzenverwertbarer Gesamt mengen durch die Trennung von Transport und Verteilung (Abb. 6).

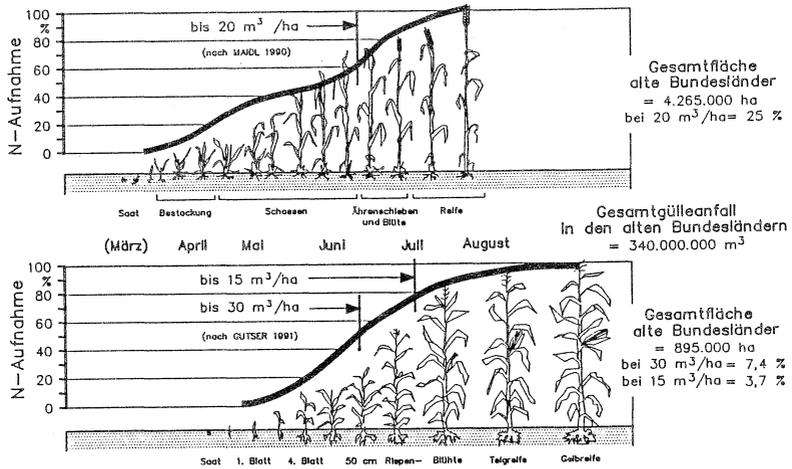


Abbildung 6: Mögliche Güllemengen für Getreide und Mais nach MAIDL (1990) und GUTSER (1991).

Auch dabei darf die Überwachung der exakt verteilten Ausbringmenge nicht übersehen werden. Danach wäre dann die Verteilung auf die örtlichen Gegebenheiten auszurichten.

### 3.7 Mineralische Düngung

Die mineralische Düngung wurde in den zurückliegenden 40 Jahren zur nahezu alleinigen Düngungsform. Durch Verbesserungen bei der Düngetechnik, besser an die Technik angepaßte Mineraldünger und technisch ausgerichtete Düngeverfahren in Form der Fahrgassensysteme wurde eine hohe Zuverlässigkeit erreicht. Trotzdem sind bei der mineralischen Düngung in der Praxis nach wie vor große Abweichungen vom angestrebten Soll zu beobachten (Abb. 7).

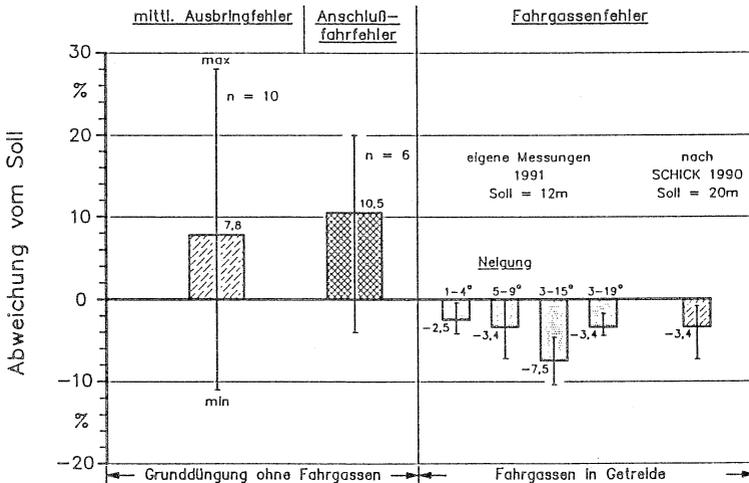


Abbildung 7: Relative Abweichungen vom Ausbringensoll bei der mineralischen Düngung durch Mengen- und Abstandsprobleme und relative Fahrgassenabstände bei unterschiedlicher Feldneigung.

Elektronische Prozeßtechnik muß deshalb die mechanisch begrenzte Leistungsfähigkeit der Verteiltechnik verbessern und eine teilschlagbezogene Applikationstechnik ermöglichen.

Zur Überwachung der Ausbringmengen können fahrzeuginterne Wiegeeinrichtungen eine Lösung bringen. Nur mit ihnen ist es möglich, vor dem Ausbringvorgang kalibrierte Systeme im Feld einer ständigen Überprüfung zuzuführen. Dabei kann in Stufen von statischen Wägungen (im Stand) zur dynamischen Gewichtsüberwachung übergegangen werden. Viele eigene Untersuchungen deuten darauf hin, daß dafür eine integrierte Wiegetechnik im Schlepperheckkraftheber die günstigsten Voraussetzungen eröffnen würde, weil an diese neben der Anbaugeräteüberwachung auch die Fahr-

zeugüberwachung gekoppelt und wichtige Hinweise für die erforderliche Frontballastierung bis hin zur dynamischen Ballastierung abgeleitet werden könnten.

Neben der mangelhaften Kalibrierungsanpassung an die tatsächlichen Verhältnisse im Feld darf jedoch der Applikationsfehler durch fehlerhaftes Anschlußfahren nicht übersehen werden. Vielmehr ist er in seiner Größe sogar weit bedeutender, zumal für etwa 70 - 80 % aller Düngerausbringmaßnahmen Fahrgassen nicht vorhanden sind und zudem die Arbeitsbreiten mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Technik immer größer werden. Aber auch Fahrgassensysteme erfüllen die an sie gestellten Forderungen nur zum Teil, weil sie in der Regel zu eng angelegt werden und weil mit zunehmender Schlagneigung bei Schichtlinienarbeit diese Fehler immer größer werden. Deshalb müssen für ein verbessertes Düngerverfahren exakt arbeitende Navigationssysteme gefordert werden, deren Anforderungen je nach Arbeitsziel unterschiedlich sind (Abb. 8).

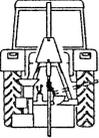
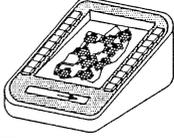
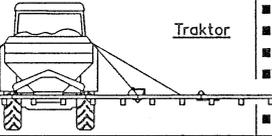
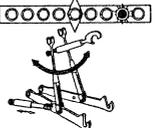
Art	Anwendung	Beispiele	Navigationshilfen	erforderliche Genauigkeit
Grabnavigation	 <b>Fahrzeug</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bodenproben ziehen</li> <li>■ Auffinden von Spurschächten</li> </ul>		± 1 m
Feinnavigation	 <b>Traktor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mineraldüngung</li> <li>■ Flüssigmistausbringung</li> <li>■ Festmistausbringung</li> <li>■ Unkrautbekämpfung</li> <li>■ Bodenbearbeitung</li> </ul>		± 10 cm
Feinstnavigation	 <b>Gerät</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ drillen</li> <li>■ hacken</li> <li>■ pflügen</li> </ul>		± 1 cm

Abbildung 8: Genauigkeitsanforderungen an Navigationssysteme in der Landwirtschaft.

#### 4. Technische Lösungen für eine rechnergesteuerte Pflanzenproduktion

Technische Lösungen einer rechnergesteuerten Pflanzenproduktion erfordern einen stufenförmigen Einstieg und Ausbau dieser neuen Techniken, um einerseits kostengünstige Lösungen erarbeiten zu können und um andererseits den damit arbeitenden Menschen ohne Überforderung an diese Systeme heranzuführen. Aufbauend auf die generellen Anforderungen (Abb. 9) der Überwachung, der Steuerung und der Regelung könnte ein derartiges System für die Düngung in folgenden Schritten realisiert werden:

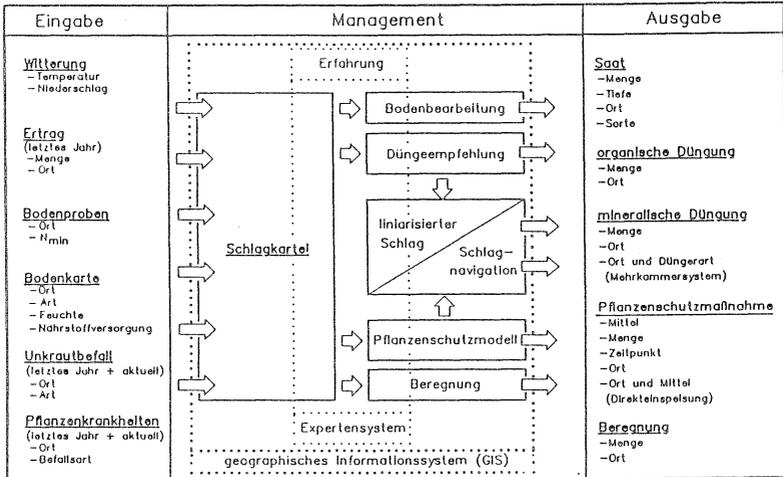


Abbildung 9: Eingabeparameter, Informationsverarbeitung und Steueranweisungen im "rechnergestützten Pflanzenbau".

#### 4.1 Ertragsüberwachung im Mähdescher und Düngung im linearisierten Schlag

Ausgehend von den Regeln der Düngung nach Entzug muß ein rechnergesteuertes System der Pflanzenproduktion zuerst an der Ertragsüberwachung ansetzen und daran einfach umsetzbare Düngungstechniken anschließen. Die erforderlichen Schritte lassen sich mit schon verfügbaren Techniken relativ einfach in die Praxis umsetzen. Sie sind:

- **Ertragsermittlung** im Mähdescher über Volumen- oder Massestrommeßsysteme. Die Meßfehler dürfen 5 % nicht überschreiten, damit Ertragsklassen von 10 dt/ha bei Maximalerträgen von 100 dt/ha problemlos abgeleitet werden können. Die Erfassungsfrequenz sollte möglichst eng erfolgen. Allerdings ist eine Unterschreitung der Schnittbreite wenig sinnvoll, solange Meßeinrichtungen zur Erfassung der realen Schnittbreite nicht verfügbar sind. Die Datenspeicherung sollte nur dann erfolgen, wenn sich das jeweiligen Ertragsniveau ändert, um das erzeugte Datenvolumen möglichst klein zu halten und gängige Speichersysteme wie die Chipkarte problemlos einsetzen zu können.
- Mit der Ertragsermittlung muß die **Ortung** verbunden sein. Für den überbetrieblichen Einsatz kommt aus Gründen der Handhabbarkeit und der erzielbaren Sicherheit der-

zeit nur GPS in Frage. Da während des Dreschens keine navigatorischen Maßnahmen erforderlich sind, reicht die Aufzeichnung gemittelter Positionsrohdaten synchron zu den Ertragsdaten. Mittelwerte aus Druschweglängen entsprechend der jeweiligen Schnittbreite würden genügen. Sie müßten jedoch auch dann auf den Datenträger abgelegt werden, wenn sich die Druschrichtung in einer vorgegebenen Geraden aus der Schnittbreite hinausbewegt.

- Die **Datenauswertung** und -umsetzung für die Düngung erfolgt in dieser Stufe von einer zentralen Stelle (Beratung, Maschinenring, Lohnunternehmer, priv. Dienstleistungszentrale). Sie muß Zugriff auf eine Referenzstation für GPS haben, um damit im "postprocessing" die bestmögliche Zuordnung der Ertragsdaten zu den realen Gegebenheiten des Betriebes zu erreichen. Die Auswertung führt zu einer Ertragskarte mit Flächen gleichen Ertrages (Äquifertile) und einem Datenfile mit dessen Koordinaten und Ertragswerten.
- Die Umsetzung der Ertragskarte erfolgt beim Landwirt in Verbindung mit dessen Schlagkartei. Diese muß die Ertragsdatei lesen und daraus die Steuerdatei für ein linearisierte Schlagmodell ableiten können. Die Bestimmung der erforderlichen Düngermengen je Ertragszone erfolgt danach aus der Kombination von Düngeempfehlung und Erfahrung des Praktikers.

Ein derartiges System würde derzeit folgenden Kapitalbedarf und folgende Kosten erfordern (Tab. 3).

Tabelle 3: Kapitalbedarf, Kosten und Rentabilitätsschwellen für ein System "Ertragsermittlung im Mähdrescher und Düngung im linearisierten Schlag".

<b>Kapitalbedarf</b>				
Ertragsermittlung im Mähdrescher (x nach AGRITECHNIKA '91)	17 000 DM			
Ortung im Mähdrescher (nach Preisliste 12/91)	6 000 DM			
Software "Ertragskartierung" (vorsichtige Schätzung)	6 000 DM			
Software "linearisierter Schlag" (vorsichtige Schätzung)	1 000 DM			
	<b>30 000 DM</b>			
<b>Einsatzumfang</b>	100 ha	200 ha	300 ha	400 ha
<b>Kosten je ha</b>	85,80 DM	43,00 DM	28,60 DM	21,50 DM
<b>Mehrkosten/ Gewinn bei Einsparung</b>				
5% (30 DM/ha)	- 55,80 DM	- 13,00 DM	+ 1,40 DM	+ 8,50 DM
10% (60 DM/ha)	- 25,80 DM	+ 27,00 DM	+ 31,40 DM	+ 38,50 DM
15% (90 DM/ha)	+ 4,20 DM	+ 47,00 DM	+ 61,00 DM	+ 68,50 DM

Afa 16,6%; Zins 8%; Reparatur 8%; Gesamtkosten 28,6% von Afa; intensiver Getreideanbau mit 80 dt/ha Ertrag; 190 kg N/ha; 125 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; 110 kg K<sub>2</sub>O/ha)

#### 4.2. Ertragsüberwachung im Mähdrescher und Düngung mit Navigationssystem

Aufbauend auf dieses Basissystem muß in der zweiten Stufe die Erweiterung auf nichtlinearisierbare Schläge folgen. Deshalb ist das o.g. System um die Navigation bei der Düngerausbringung zu erweitern. Aus Gründen einer einfachen Handhabung kann dies vermutlich nur über DGPS erfolgen. Allerdings reicht dieses System alleine nicht aus, weshalb über einen Weg- und einen Richtungssensor eine Koppelortung aufgebaut werden muß. Um DGPS nutzen zu können wird nunmehr eine Funkstrecke zwischen Referenzstation und Düngerstreuerfahrzeug erforderlich. Mehrkosten für dieses System entstehen aus der Nutzung von DGPS auf dem Fahrzeug, der dafür erforderlichen Koppelortung und aus Übertragungsgebühren. Aufgrund dieser entstehenden Kosten dürfte sich ein derartiges System nur bei überbetrieblicher Nutzung realisieren lassen.

#### 4.3. Automatisiertes System

Schließlich kann in einer dritten Stufe das aufgezeigte System weitgehend automatisiert werden. Es würde dann folgende Konzeption aufweisen:

- Ertragsmessung im Mähdrescher mit integrierter online-Ortung über DGPS. Für den Fahrer wird während der Arbeit eine farbige Karte über Monitor bereitgestellt, die fertige Ertragskarte steht auf Datenträger zur Verfügung.
- Aus der Überwachungsertragskarte wird automatisiert (überbetrieblich oder einzelbetrieblich) mit geeigneter Software eine Düngerkarte erstellt. Boden- und Witterungswerte fließen automatisch mit ein, Expertensysteme stehen zur Verfügung und ermöglichen eine betriebsspezifische Optimierung.
- Die Düngerkarte auf Datenträger fließt in des Streufahrzeug ein. Sie steuert in Verbindung mit einem Navigationssystem auf dem Feld die Düngerausbringung. Eingriffe durch den Fahrer sind in Grenzen erlaubt.

#### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Prozeßsteuerung in der pflanzlichen Produktion veredelt Mechanik durch installierte Intelligenz und ermöglicht dadurch den Aufbau verbundener landtechnischer Systeme. Damit eröffnet sich die Chance für mehr Umweltentlastung im Pflanzenbau. Weiterentwickelte Systeme stellen sogar die Herausforderung für einen gänzlich "umweltneutralen Pflanzenbau" dar.

Für das Beispiel der Düngung muß ein rechnergestütztes System auf die Bilanzierung der Nährstoffe nach Entzug ausgerichtet werden. Es setzt deshalb an der Ernte an, ermittelt dafür nach lokalen Gegebenheiten den Ertrag und führt diesen dem zentralen Management (Betriebsrechner) zu. In Verbindung mit Informationen über die Bodenarten, den Witterungsverlauf und den im Boden vorrätigen Nährstoffen können mit geeigneten Expertensystemen Prognosen für Applikationsmengen und Applikationszeitpunkte für die Saat, die organische und die mineralische Düngung abgeleitet werden.

Durch einen stufenartigen Ausbau solcher Systeme könnten kurzfristig kostengünstige Lösungen erstellt und in die Praxis eingeführt werden. Sie würden ideale Daten- und Informationsquellen für den weiteren Ausbau in der Praxis und für zusätzlich erforderliche Forschungsansätze bereitstellen.

All dies ist aber nur möglich, wenn für den breiten Einsatz in der Praxis ein zuverlässiges, anwenderfreundliches und zugleich kostengünstiges Ortungssystem bereitgestellt wird. Das "Global Positioning System (GPS)" dürfte dazu die besten Voraussetzungen mit sich bringen. Für die Überwachung kann damit im "postprocessing" eine zuverlässige und genaue Datenverarbeitung realisiert werden. Für die Navigation müßten dagegen Koppelsysteme die exakte Steuerung unter Echtzeit gewährleisten. Sie würden damit exakteste Applikationen ermöglichen und so am richtigen Ort die bedarfsgerechten Mengen zuteilen.

Daneben darf aber nicht übersehen werden, daß rechnergesteuerte Pflanzenproduktion die problemlose und damit standardisierte Datenkommunikation voraussetzt. Nur damit können maschineninterne Regelkreise aufgebaut und zu inner- und überbetrieblichen Informationskreisläufen verknüpft werden. Die grundlegenden Arbeiten der deutschen "Normungsgruppe für Schnittstellen" bei der "Landmaschinen- und Ackererschleppervereinigung (LAV)" haben dafür die erforderlichen Grundlagen geschaffen. Nur wenn diese schnell in die Praxis umgesetzt werden helfen sie Kosten sparen und können darüberhinaus als Vorbild für eine internationale Normung herangezogen werden.

## 6. Literatur

*Auernhammer, H.:*  
Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung.  
Landtechnik 45 (1990), H. 7/8, S. 272 - 278

*Auernhammer, H.:*  
Elektronik in Traktoren und Maschinen.  
München: BLV-Verlag (zweite Auflage) 1991

*Auernhammer, H.:*  
The German Standard for Electronical Tractor Implement Data Communication.  
AGROTIQUE 89, proceedings of the second international conference, Bordeaux  
(Frankreich) 1989, S. 395 - 402

*Auernhammer, H., M. Demmel, J. Rottmeier und T. Muhr:*  
Future Developments for Fertilizing in Germany.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 911040

*Auernhammer, H. und J. Rottmeier:*  
Weight Determination in Transport Vehicles - Exemplary Shown on a Selfloading Trailer.  
Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90)" Berlin: VDI-AGR/MEG 1990, S. 100 - 101

*Auernhammer, H., H. Stanzel und M. Demmel (Hrsg.):*  
Wiegemöglichkeiten im Schlepperheckkraftheber und in Transportfahrzeugen.  
Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan 1990, H. 2

*Auernhammer, H. und T. Muhr:*  
GPS in a Basic Rule for Environmental Protection in Agriculture.  
Proceedings of the 1991 Symposium "Automated Agriculture for 21st Century" Chicago 1991, Hrsg. ASAE, St. Joseph, USA, S. 394 -402

*Boxberger, J., A. Gronauer und L. Popp (Hrsg.):*  
Umweltschonende Verwertung von Fest- und Flüssigmist auf landwirtschaftlichen Nutzflächen.  
Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan 1990, H. 1

*Buschmeier, R.:*  
CAF with the Satellite Navigation System GPS.  
Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90)" Berlin: VDI-AGR/MEG 1990, S. 88 - 89

*Demmel, M., J. Rottmeier, T. Muhr und H. Auernhammer:*  
Weight Detection in the Three-point-linkage of Tractors.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 911088

*Petersen, C.:*  
Precision GPS Navigation for Improving Agricultural Productivity.  
GPS World 1991, Nr. 1, S. 38 - 43

*Schnug, E., S. Haneklaus und J. Lamp:*  
Economic and Ecological Optimisation of Farm Chemical Application by "Computer Aided Farming" (CAF).  
Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90)" Berlin: VDI-AGR/MEG 1990, S. 161 - 162

*Schueler, J.K. et al.:*  
Determination of Spatially Variability Yield Maps.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 87-1533

*Searcy, S.W. and J.W. Tevis:*  
Generation and Digitization of Management Zone Maps.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 917047

*Stafford, J.V. and B. Ambler:*  
Dynamic Location for Spatially Selective Field Operations.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 91-3528

*Werner, W.:*  
Brunnenvergifter Landwirtschaft ?  
DLG-Mitteilungen 104 (1989), H. 19, S. 979



**NUTZUNG DER ORTUNG UND NAVIGATION  
LANDWIRTSCHAFTLICHER FAHRZEUGE ZUR REDUZIERUNG  
DES BETRIEBSMITTELEINSATZES  
- WIRTSCHAFTLICHE GRUNDSÄTZE UND PRAKTISCHE  
ANWENDUNG**

**G. Jahns<sup>1</sup> und H. Kögl<sup>2</sup>**

## **1 Einleitung**

Da weder die Umweltrisiken des derzeitigen Niveaus des Betriebsmitteleinsatzes (DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN, 1985) noch die hohen gesamtwirtschaftlichen Kosten der Überschußproduktion der Landwirtschaft ernsthaft angezweifelt werden, besteht ein erhebliches Interesse daran, durch Intensitätssenkung beide Konflikte zu mindern. Dies könnte durch administrative Maßnahmen - Reglementierung, Verteuerung von Betriebsmitteln, Produktpreissenkung - oder die Entwicklung vorleistungssparender technischer Fortschritte geschehen. Ob zu diesen Fortschritten auch die Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge gehören, soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Den Ausgangspunkt bildet die Überlegung, durch eine teilschlagspezifische Bearbeitung den unterschiedlichen Bodenansprüchen besser gerecht zu werden (PALMER, 1989). Von besonderem Interesse sind aus ökologischer Sicht die Verringerung des Aufwandes an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln (AUERNHAMMER, 1990). Arbeitsvorbereitung, Arbeitsdurchführung und Erfolgskontrolle würden dann bezogen auf Teilflächen und Flächenelemente eines Schlages erfolgen. Dies setzt die Positionsbestimmung auf dem Felde während aller Phasen des Produktionsprozesses sowie eine elektronische Überwachung und Kontrolle der Prozesse voraus.

Ob auf diesem Wege die Intensität gesenkt werden kann, hängt ganz wesentlich davon ab, ob die Verminderung für den Landwirt wirtschaftlich ist. Aus umweltpolitischer Sicht ergibt sich dagegen u.U. eine andere Bewertung des technischen

---

<sup>1</sup> Dr. Ing. G. Jahns, Institut für Biosystemtechnik der Bundesanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig-Völkenrode

<sup>2</sup> Dr. H. Kögl, Institut für Betriebswirtschaft der Bundesanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig-Völkenrode

Fortschritts, da auch die Vermeidung negativer Intensitätseffekte mit einzubeziehen ist. Eine Bewertung setzt auf jeden Fall voraus, daß ein Referenzsystem gewählt wird. Dies ist im Ackerbau im allgemeinen und für einzelne Fruchtarten im besonderen nicht leicht, da in der Praxis eine große Streubreite an pflanzenbaulichen Verfahren und Intensitäten zu beobachten ist. Dem Vergleich "Neue Technik gegenüber alter Technik" wird an dieser Stelle ein ökonomisch rational handelnder Landwirt zugrunde gelegt. Das heißt, daß Fehlentscheidungen, die bereits im Rahmen der herkömmlichen Technik vermeidbar sind, nicht als Erträge der neuen Technik betrachtet werden.

## **2 Technische Grundlagen der Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge**

Als **Ortung** wird in der Luft- und Seefahrt die Bestimmung des eigenen Standortes oder die Festlegung eines Objektes durch geeignete Verfahren verstanden. Die Ortung umfaßt die Gewinnung des Meßwertes sowie die Meßwertverarbeitung zur Ermittlung der Koordinaten des Ortes. Dies kann durch Eigen-, Fremd- oder Mischortung erfolgen.

Als **Navigation** werden nach DIN 13312 Maßnahmen zur Fahrzeugführung verstanden, d.h. Beobachtungen, Messungen und Auswertungsmethoden, mit deren Hilfe ermittelt wird:

- a) wo sich das Fahrzeug im Augenblick befindet,
- b) wohin das Fahrzeug gelangen würde, wenn keine seine Bewegung beeinflussenden Maßnahmen ergriffen würden und
- c) was zu tun ist, um das gewünschte Ziel sicher zu erreichen ggf. auf einem vorgegebenem Weg.

Im nachfolgenden werden alle Maßnahmen zum Erkennen der Position eines Fahrzeuges auf Feldern und Schlägen der Ortung und alle Maßnahmen zum Führen von Fahrzeugen oder Arbeitsgeräten der Navigation zugerechnet. Technische Details der Satelliten-Navigationssysteme werden in diesem Beitrag nur kurz gestreift, da sie ausführlich in dem Beitrag von BEUCHE und JÜRSCHIK (1992) behandelt werden.

## **2.1 Rahmenbedingungen für die Verwendung von Satelliten-Navigationssystemen in der Landwirtschaft**

Das "nackte Signal" eines Satelliten-Navigationssystems ist für den Landwirt noch wertlos. Zur Erreichung der eingangs genannten ökologischen und ökonomischen Ziele müssen zusätzlich noch eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein. Sie lassen sich grob unterscheiden in Maßnahmen und technische Mittel

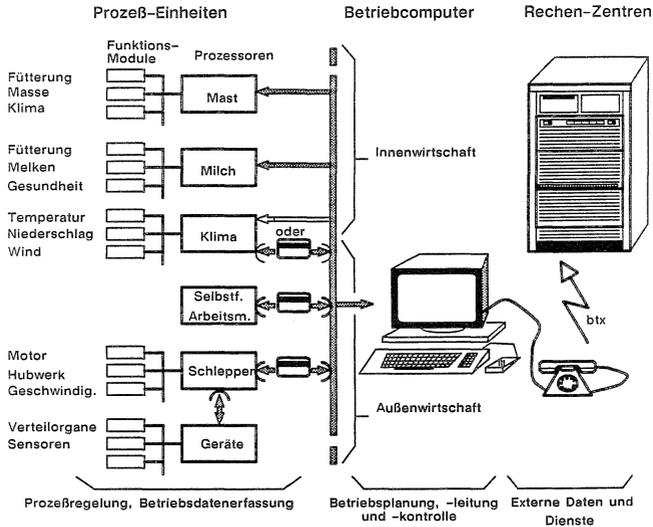
- zur Informationsgewinnung,
- zur Informationsverarbeitung,
- zur Umsetzung der Information im landwirtschaftlichen Produktionsprozeß.

Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung der einzelnen Produktionsprozesse richten sich nach Fruchtart und Bodeneigenschaften. Daher spielt die Frage der Zuordnung der Information zur Fläche und damit die im nachfolgenden behandelten Möglichkeiten der Ortung und Navigation eine Schlüsselrolle. Die Möglichkeiten, die Satelliten-Navigationssysteme in diesem Zusammenhang bieten, sind jedoch stets vor dem Hintergrund der gegebenen bzw. zu erwartenden technischen Rahmenbedingungen in der Landwirtschaft zu sehen. Dabei wird in diesem Abschnitt auf die technischen Rahmenbedingungen kurz eingegangen.

Im Rahmen der Informationsgewinnung sind die Erfassung der Prozeßdaten über Boden, Pflanze und Erntegut sowie die Witterung und das wirtschaftliche Umfeld des Betriebes zu nennen. Die Gewinnung von Prozeßdaten über Boden und Pflanze beinhaltet beispielsweise die Ermittlung des Ernährungszustandes der Pflanze, des Nährstoffvorrates im Boden oder von Schadschwellen für den Pflanzenschutz. Sie erfolgt derzeit durch absätzigte Analysemethoden und durch das Urteil des Landwirtes oder eines Beraters. Eine Erfassung z.B. des Nährstoffvorrates des Bodens durch fest installierte Meßstellen oder während des Verfahrens liegt noch in weiter Ferne. Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes gibt es jedoch in dieser Richtung erste meßtechnische Ansätze, die z.T. schon in der Erprobungsphase sind. Hierzu gehören die Messung der Blattemperatur, der Bodenfeuchte usw.

Die Verarbeitung dieser und weiterer Informationen erfolgt mit Hilfe entsprechender Programme, die den Betriebsleiter bei seinen Entscheidungen unterstützen sollen. Als Resultate ergeben sich dann konkrete Arbeitseinweisungen, die eine an die jeweilige Fruchtart und Bodeneigenschaft angepasste Bearbeitung

erlauben. Es ist un schwer zu erkennen, daß die oben skizzierte Fülle von Informationen nicht vom Landwirt manuell gehandhabt werden kann. Da diese Informationen aber nur dann von Wert sind, wenn sie aktuell und vollständig sind, ist die gezielte rechnergestützte landwirtschaftliche Produktion nur mit einem integrierten Informationssystem zu bewältigen (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Schema eines integrierten Informationssystems einer rechnergestützten landwirtschaftlichen Produktion

Vorschläge hierfür gibt es bereits seit längerem (JAHNS, 1983, 1984; ZILAHISZABO, 1990) und erste Ansätze einer Realisierung zeichnen sich ab (DIN 9684). In diesem EDV-gestützten Managementsystemen spielt der Bordcomputer als zentrales Gerät zur Informationsverarbeitung auf mobilen Einrichtungen in Fahrzeugen und Geräten sowie die elektronische Steuerung und Regelung der stationären Einrichtung eine wichtige Rolle. Für den Informationsaustausch zwischen den unterschiedlichen Bereichen und elektronischen Komponenten im landwirtschaftlichen Betrieb (Mensch-Maschine-Schnittstelle) wird derzeit eine Norm erarbeitet. Mit dem Gelbdruck dieser Norm (DIN 9684, Teil 1 bis 5) wird in der ersten Hälfte 1992 gerechnet.

Am weitesten fortgeschritten, auch wenn noch viele Aufgaben offen sind, ist die technische Entwicklung bei der Umsetzung der Informationen. So kann die Arbeitsanweisung zur Ausbringung einer bestimmten Menge an Pflanzenbehandlungsmitteln bereits heute mit den auf dem Markt befindlichen Systemen auf dem Computer erarbeitet, mit einer Chipkarte auf den Bordcomputer des Traktors übertragen und dort zur elektrischen Steuerung der Spritzen eingesetzt werden.

## **2.2 Mögliche Anwendungsbereiche und ihre Systemansprüche**

### **2.2.1 Positionsbestimmung - Ortung (Meter-Bereich)**

Für eine teilschlagspezifische Bearbeitung ist es erforderlich, Art und Umfang aller auf dem Feld auszuführenden Tätigkeiten, bezogen auf die Flächenelemente des Schlages festzulegen. Dies geschieht im Rahmen der Arbeitsvorbereitung auf der Grundlage von Analysewerten der flächenbezogen erfassten Erntemengen und Erntequalitäten aus den Vorjahren und weiteren zusätzlichen Informationen. Diese teilschlagspezifischen Arbeitsanweisungen werden auf das Fahrzeug übertragen, im Bordcomputer gespeichert und in Abhängigkeit von der Position des Fahrzeuges dem Fahrer zur Anzeige gebracht oder selbsttätig ausgeführt. Gleichzeitig werden während des Arbeitsablaufes Positionsdaten und Prozeßparameter erfaßt und gespeichert. Diese Daten sind nicht nur für die unmittelbare Prozeßführung erforderlich, sie sind auch die Voraussetzung für die nachfolgenden Arbeitsschritte, die Abrechnungen und Arbeitsnachweise sowie die betriebswirtschaftliche Optimierung des Betriebes. Geht man von Tätigkeiten wie der Bodenbearbeitung, den üblichen Düngeverfahren und der Mehrzahl der Erntearbeiten aus, so erscheint für die Positionsbestimmung eine Genauigkeit im Bereich mehrerer Meter ausreichend. Setzt man das Vorhandensein der zusätzlich erforderlichen Komponenten voraus (siehe Abbildung 1), so kann für diesen Anwendungsbereich bei einer entsprechenden Preisentwicklung der Satelliten-Navigationssysteme (siehe Abschnitt 2.3) ein wirtschaftliches Interesse angenommen werden.

### 2.2.2 Fahrzeugführung-Navigation (Zentimeter-Bereich)

Für Bestellarbeiten, insbesondere für die Aussaat im Zusammenhang mit dem Anlegen der Fahrspuren, reicht eine Genauigkeit im Meter-Bereich nicht aus. Hierfür sind Kursgenauigkeiten von wenigen Zentimetern erforderlich, will man keine Verschlechterung gegenüber der heutigen Praxis in Kauf nehmen. Dies gilt auch für die Pflegearbeiten und einige neuere Düngeverfahren. Wenn man eine automatische Lenkung von Fahrzeug und Gerät anstrebt, wären für Pflegearbeiten aber selbst bei einer Genauigkeit des Kurssignals im Zentimeter-Bereich zusätzliche Sensoren zur Bestimmung der Pflanzenstandorte sowie zur Erfassung von Pflanzen- und Bodenmerkmalen erforderlich.

Eine Auflösung im Zentimeterbereich allein genügt aber nicht, vielmehr muß gewährleistet sein, daß das Signal auch in ausreichend kurzen Zeitabständen verfügbar ist. Aus einer Fahrgeschwindigkeit landwirtschaftlicher Fahrzeuge auf dem Felde von etwa 1 bis 3 Meter pro Sekunde resultieren folgende Zeitabstände:

Auflösung	Zeitabstände			
1 cm	10 ms	bis	3 ms	Solange der zeitliche Abstand zwischen zwei Ortsbestimmungen ca. 1 Sek. und
1 dm	100 ms	bis	30 ms	
1 m	1000 ms	bis	300 ms	

mehr beträgt, sind also zusätzliche Maßnahmen erforderlich, die sicherstellen, daß auch zwischen zwei Messungen eine exakte Führung des Fahrzeugs erfolgt.

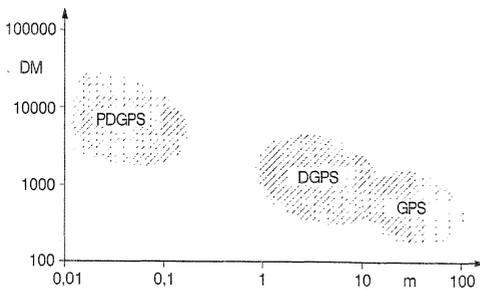
Zusammenfassend kann man feststellen, daß für diese Anwendungsbereiche ein wirtschaftlicher Vorteil derzeit noch nicht erkennbar ist, da zusätzlich erforderliche technische Einrichtungen noch nicht zu angemessenen Preisen verfügbar sind. Die Frage der Wirtschaftlichkeit wird man für diese Anwendungen je nach Verfügbarkeit der erforderlichen zusätzlichen Systeme, insbesondere der Sensoren, für die einzelnen Arbeitsverfahren zu einem späteren Zeitpunkt erneut überprüfen müssen.

### 2.3 Prognose der Systemkosten und zukünftigen Entwicklung

Bei der Frage nach einer möglichen Nutzung der Satelliten-Navigationssysteme für die Landwirtschaft sind die Genauigkeit der Systeme und der Preis aus-

schlaggebende Kriterien. Der Gesichtspunkt Baugröße ist vernachlässigbar, denn schon heute sind GPS-Systeme, die vor wenigen Jahren mehrere Kilogramm wogen, auf einer einzigen Platine untergebracht. Landwirtschaftliche Aspekte haben bei der Entwicklung dieser Systeme bisher keinen Einfluß gehabt, es ist auch nicht zu erwarten, daß sie ihn haben werden. Dafür ist dieses Marktsegment zu unbedeutend und die Entwicklungskosten der Systeme zu hoch. Für die Betrachtung der möglichen Preisentwicklung erscheint es zweckmäßig, zwischen Massenprodukten und Präzisionsprodukten zu unterscheiden.

Es kann vermutet werden, daß Navigationssysteme als Massenartikel für Kraftfahrzeuge und den Freizeitbereich - Wasser- und Flugsport, Expedition und Wandern - in den kommenden Jahren Verwendung finden werden. Für diesen Verwendungsbereich dürfte die Genauigkeit des einfachen GPS ohne Fehlerkompensation ausreichen. Dieser Marktsektor kann in Anbetracht der Bedeutung der Freizeit in den westlichen Industrieländern als groß und auch zahlungskräftig bezeichnet werden. Eine Entwicklung zum billigen miniaturisierten Massenartikel etwa mit den Abmessungen einer größeren Armbanduhr und zum Preis von einigen wenigen Hundert DM erscheint daher nicht ausgeschlossen (siehe s. Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Mögliche Preisentwicklung

zu erwartenden geringeren Stückzahlen und des höheren Aufwandes wegen werden die Preise für derartige Systeme höher liegen als für die erstgenannten. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß das DGPS, auch ohne daß hierfür eine technische Notwendigkeit besteht, im Kfz-Sektor und auch im Freizeitbereich eingesetzt wird. Sollte dies eintreffen, würde dies auch bei diesen Systemen vermutlich zu höheren Stückzahlen und damit zu niedrigen Preisen führen können.

Deutlich geringer dürfte die Zahl der Anwendungen sein, für die das einfache GPS nicht ausreicht. Für diese Anwendungen wären der Aufbau und Unterhalt von Referenzstationen sowie ein höherer hard- und softwaremäßiger Aufwand erforderlich. Aufgrund der

Präzisions-DGPS mit einer Auflösung im Zentimeter-Bereich wird auch in Zukunft nur wenigen Anwendungen vorbehalten bleiben. Der Aufwand ist hier noch größer und die Stückzahlen sind noch kleiner als bei den vorgenannten, so daß mit einem entsprechend hohen Preis zu rechnen ist. Dies gilt besonders dann, wenn zur Erzielung kurzer Meßintervalle eine Hardwarelösung anstelle einer Softwarelösung gewählt werden muß.

### **3 Ansätze zur Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes durch Teilschlagbewirtschaftung**

#### **3.1 Wirtschaftliche Grundsätze des Einsatzes variabler Betriebsmittel**

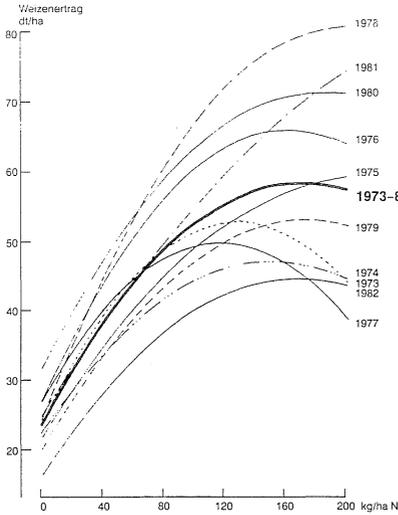
Die meisten landwirtschaftlichen Produktionsprozesse sind dadurch gekennzeichnet, daß sie dem "Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs" unterliegen und die Produktionsfaktoren in gewissen Bereichen untereinander austauschbar sind. Aus ökonomischer Sicht ergeben sich deshalb zwei Probleme, und zwar

1. die Ermittlung des gewinnmaximalen Einsatzes eines variablen Faktors bei Konstanz aller anderen Faktoren (partielle Anpassung);
2. die Ermittlung derjenigen Kombination von Produktionsfaktoren, die eine gegebene Produktionsmenge mit minimalen Kosten erzeugt (totale Anpassung).

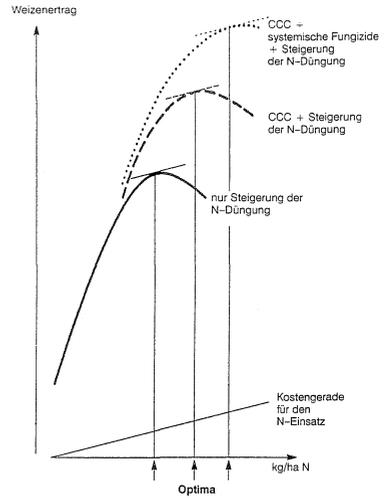
Eine eindeutige Lösung setzt voraus, daß die Beziehung zwischen Faktoreinsatz und Produktionsmenge, d.h. die Produktionsfunktion und die Preise des Produktes und der Faktoren bekannt sind. Der maximale Gewinn wird dann erreicht, wenn für jeden Faktor ( $x_i$ ) das mit dem Produktpreis ( $p$ ) multiplizierte Grenzprodukt ( $dy/dx_i$ ) seinem Preis ( $q_i$ ) gleich ist.

$$dy / dx_i * p = q_i$$

Für das hier gewählte Beispiel, das ist der Einsatz von Stickstoffdünger zu Weizen, ist vor allem die partielle Anpassung von Bedeutung. Da der Stickstoff aber nur einer von mehreren ertragsbestimmenden Faktoren ist, ist es in der Realität außerordentlich schwierig, standortspezifische Produktionsfunktionen zu schätzen. Das Ausmaß allein jahresbedingter Unterschiede ist auf der Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Produktionsfunktionen für Winterweizen auf einem mittleren Standort in verschiedenen Jahren und im zehnjährigen Durchschnitt (KLING, 1986)



**Abbildung 4:** Auswirkungen des biologischen technischen Fortschritts auf die optimalen speziellen Intensitäten (KLING, 1986)

Im Hinblick auf die Beziehung zu anderen Produktionsfaktoren sind bei der Stickstoffdüngung an dieser Stelle aber nicht Substitutionalität (z.B. Düngeraufwand und Fläche) von Interesse sondern Komplementarität, und zwar speziell zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Generell kann man sagen, daß mit zunehmender Intensität der Stickstoffdüngung auch der Einsatz von Wachstoffsstoffen und Fungiziden steigt (siehe Abbildung 4).

Die Steuerung des Dünger- und Pflanzenschutzmitteleinsatzes entsprechend dem o.g. Wirtschaftlichkeitskriterium stellt deshalb für den Landwirt ein äußerst komplexes Entscheidungsproblem dar. Dieses Problem wird noch größer, wenn auch innerhalb eines Ackerschlaages die ertragsbestimmenden Faktoren unterschiedlich sind, insbesondere wenn dazu relativ wenig Information vorliegt.

Aus einer Untersuchung über den Betriebsmitteleinsatz in der Praxis (KÖGL, 1991) geht hervor, daß Landwirte mit heterogenen Bodenverhältnissen gleichzeitig auch eine größere Anzahl von Teilstücken bewirtschaften. Verglichen mit Betrieben, die angeben, nur über eine Bodenqualität zu verfügen, erreichen die zuerstgenannten eine höhere Wirtschaftlichkeit. Dies könnte unter Umständen ein Hinweis auf die wirtschaftlichen Vorteile einer Schlagaufteilung sein. Auswertungen von Betriebszweigabrechnungen zeigen aber auch, daß selbst Betriebe, die sich hinsichtlich der natürlichen Standortqualität, der Fruchtfolge und der Betriebsgröße kaum unterscheiden, sehr unterschiedliche Ertrags-Aufwands-Relationen haben. Dabei tritt das Phänomen auf, daß Betriebe mit überdurchschnittlich hohem Dünger- und Pflanzenschutzaufwand zwar auch etwas höhere Naturalerträge als der Durchschnitt erreichen, jedoch der Erlös nach Abzug des monetären Aufwands unter dem Durchschnitt aller Betriebe liegt, mit anderen Worten das wirtschaftliche Optimum bereits überschritten ist. Als Ursachen dafür werden überwiegend mangelnde Betriebsleiterfähigkeiten der Landwirte vermutet. Von derartigen produktionstechnischen Fehlern wird in der vorliegenden Untersuchung allerdings abgesehen.

Zur Bewertung der ökonomischen und ökologischen Konsequenzen einer teil-schlagspezifischen Stickstoffdüngung wird von folgender Situation ausgegangen: Um trotz der Vielzahl der Einflußfaktoren zu einer quantifizierbaren Aussage zu gelangen, wird nur ein einziger Produktionsfaktor variiert und unterstellt, daß auf einem einzigen Ackerschlag zwei Bodenarten vorliegen, die sich lediglich hinsichtlich der Ertragsreaktion von Weizen auf die Stickstoffdüngung unterscheiden. Der Verlauf der Produktionsfunktionen soll dem Landwirt bekannt sein. Unterstellt ist dabei der in der Literatur am häufigsten genannte Funktionstyp

$$Y = a + b N + c N^2$$

mit  $Y$  = Weizenertrag in dt/ha,  $N$  = Stickstoffaufwand in kg/ha.

Für die Produktionsfunktion des schlechten Bodens gilt

$$Y_1 = 25,6 + 0,335017 N - 0,00087396 N^2$$

und für den guten Boden (PFINGSTNER, 1987).

$$Y_2 = 40,42 + 0,235471 N - 0,000874 N^2$$

Der Weizenpreis ( $P_W$ ) wird mit 36 DM/dt und der Stickstoffpreis ( $P_N$ ) mit 1,20 DM/kg angenommen. Der Stickstoffaufwand im Maximum dieser Ertragsfunktion berechnet sich, indem man die erste Ableitung der Ertragsfunktion gleich Null setzt und nach  $N$  auflöst:

$$N_{Y\max} = -b/2c.$$

Ein maximaler Getreideertrag kann jedoch vernünftigerweise nicht Zielgröße wirtschaftlichen Handels sein. Zielgröße kann nur ein maximaler Erlös sein, d.h. die Maximierung der Differenz, die sich aus dem Verkaufserlös (Naturalertrag bewertet mit Verkaufspreisen) minus dem monetär bewerteten Aufwand ergibt. Im vorliegenden Fall ist also zwischen dem ertragsmaximalen Stickstoffaufwand und dem gewinnoptimalen Stickstoffaufwand zu unterscheiden. Daraus folgt:

$$E = Y * P_W - N * P_N$$

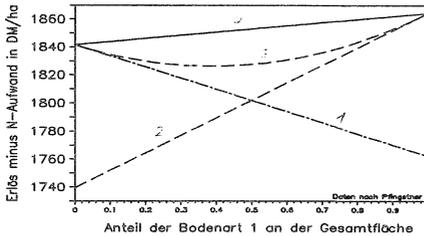
$$N_{Y\text{opt}} = (P_N/P_W - b)/2c.$$

Es wurden vier Szenarien unterstellt, bei denen der Landwirt unterschiedliche Informationen über Bodenarten und Produktionsfunktionen hat.

1. Der Landwirt düngt den gesamten Schlag gleichmäßig entsprechend dem Erlösoptimum der Bodenart 1, im vorliegenden Beispiel also mit 172 kg N/ha.
2. Der Landwirt düngt den gesamten Schlag gleichmäßig entsprechend dem Erlösoptimum der Bodenart 2, im vorliegenden Beispiel mit 112 kg/ha.
3. Für den Fall, daß der Landwirt zusätzlich noch die Anteile der Bodenarten nicht jedoch ihre Lage kennt, ergibt sich die folgende Strategie : Der Landwirt düngt den gesamten Schlag gleichmäßig entsprechend dem Erlösoptimum der Bodenart 1 und dem der Bodenart 2, gewichtet mit ihren Flächenanteilen.
4. Der Landwirt düngt teilschlagspezifisch, da er aufgrund der Ortung weiß, ob er sich auf Bodenart 1 oder Bodenart 2 befindet und zwar jeweils mit der gewinnmaximalen Düngermenge.

Das Ergebnis dieser vier Szenarien ist in der Abbildung 5 in Abhängigkeit vom Flächenanteil der Bodenart 1 an der Gesamtfläche dargestellt.

Szenario 3 stellt die bestmögliche Handlungsweise eines Landwirtes dar, der seine Bodenarten und ihre Anteile innerhalb eines Schlages kennt, dem es aber aufgrund der zur Verfügung stehenden Technik nicht möglich ist, eine gewinnmaximale Menge an N auszubringen. Das Ausmaß der Verluste in den Szenarien 1 und 2 im Vergleich zu 3 hängt von den tatsächlichen Flächenanteilen der Bodenarten und dem Verlauf der Produktionsfunktionen ab. Alle anderen Düngungsstrategien, z.B. Orientierung am maximalen Ertragsniveau einer Bodenart, würden noch zu größeren Abweichungen führen.



**Abbildung 5:** Vergleich unterschiedlicher Düngestrategien

Nähere Untersuchungen zeigen, daß der Nutzen der neuen Technik, also die Differenz zwischen Szenario 3 und 4, um so größer ist, je mehr sich die Erlösoptima hinsichtlich ihres N-Aufwandes voneinander unterscheiden. Die Höhe der Erlösoptima selber hinsichtlich ihres Ertrages haben keinen Einfluß.

Auf der Übersicht 1 sind die den vier Szenarien entsprechenden unterschiedlichen Mengen an N kg/ha dargestellt.

Flächenanteile der Bodenarten %		Stickstoffeinsatz kg/ha		
Boden 1	Boden 2	Szenarien	Szenario 1 N <sub>opt1</sub> =172 kg/ha Überdüngung kg/ha	Szenario 2 N <sub>opt2</sub> =112 kg/ha Unterdüngung kg/ha
		3/4		
100	0	172	0	-60
90	10	165	6	-54
80	20	160	12	-48
70	30	154	18	-42
60	40	148	24	-36
50	50	142	30	-30
40	60	136	36	-24
30	70	130	42	-18
20	80	124	48	-12
10	90	118	54	-6
0	100	112	60	0

**Übersicht 1:** Stickstoffeinsatz bei unterschiedlichen Düngungsstrategien

Hier zeigt sich interessanterweise, daß die mit der neuen Technologie mögliche N-Einsparung zwischen dem Szenario 3 und 4 auf den gesamten Schlag bezogen Null ist. Der ökonomische Vorteil entsteht durch die optimale Verteilung auf der Fläche, da nun jedes Flächenelement genau die Stickstoffmenge enthält, die es

zur Erreichung des Gewinnmaximums braucht. Dies wiederum ist auch ein ökologischer Vorteil, da Überdüngung auf dem Boden mit dem geringeren Nährstoffhaltevermögen vermieden wird.

### 3.3 Nutzung der teilschlagspezifischen Düngung zur Einhaltung von ökologisch begründeten Düngungsobergrenzen

Sieht man davon ab, daß das Niveau der Stickstoffdüngung und der Aufwand an Pflanzenschutzmitteln miteinander positiv korreliert sind, so besteht das Umweltisiko eines hohen Stickstoffeinsatzes vor allem in der Gefahr der Auswaschung von Nitrat in das Grundwasser. Die Gefahr der Auswaschung ist ceteris paribus um so größer, je sandiger der Boden ist.

Unterstellt man, daß auf einem einzigen Schlag sowohl Flächenelemente mit sandigem Boden als auch mit lehmigem Boden vorkommen und die bisher schon benutzten Produktionsfunktionen gelten, so würde man, sofern keine teilschlagspezifische Düngung möglich ist, bei Auswaschungsgefahr die Obergrenze der Düngung an dem Nährstoffbindungsvermögen des sandigen Bodens orientieren. Dies bedeutet aber, daß auf den Flächenelementen mit lehmigem Boden auf Erlös ( $dy$  in Abbildung 6) verzichtet wird, obgleich dort eine höhere Düngung noch nicht zur Auswaschung führen würde. Mittels der satellitengestützten Ortung wäre es aber nun möglich, für jede Bodenart eine unterschiedliche Düngungsobergrenze festzulegen.

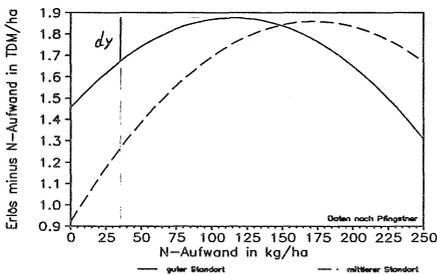


Abbildung 6: Strategie für ökologisch begrenzten N-Aufwand

Die wirtschaftliche Bedeutung der teilschlagspezifischen Düngung hängt in diesem Fall von den jeweils festgesetzten bodenspezifischen Obergrenzen und den Flächenanteilen der Bodenarten ab. Ein weiterer Vorteil der teilschlagspezifischen Bewirtschaftung läge in diesem Fall auch noch darin, daß ein Protokoll

angelegt werden könnte, daß die Einhaltung der teilschlagspezifischen Obergrenzen festhält.

### **3.4 Einsparungen beim Aufwand an Pflanzenschutzmitteln**

Für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln gelten zwar die gleichen Wirtschaftlichkeitprinzipien wie beim Düngereinsatz, jedoch sind die pflanzenbaulichen und technischen Probleme anders gelagert. Zwei wichtige Unterschiede bestehen darin, daß

1. die Ursachen der Ertragsbeeinflussung unterschiedlicher Art sein können (Unkräuter, Pilze, Viren, Insekten und sonstige Lebewesen) und
2. diese Schadquellen von Jahr zu Jahr an unterschiedlichen Stellen eines Schlages mit unterschiedlicher Stärke und unterschiedlicher Häufigkeit auftreten können.

Das bedeutet, daß Ortung und Navigation allein nicht ausreichen, um zu einer Reduzierung des Aufwandes an Pflanzenschutzmitteln zu kommen, sondern zusätzliche Techniken wie etwa Sensoren zur Erkennung der Art der Schadquellen notwendig werden. Da weiterhin über den funktionalen Zusammenhang zwischen Pflanzenschutzaufwand und Ertrag noch weniger exakte Kenntnisse vorliegen als im Fall der Stickstoffdüngung, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, konkrete Berechnungen anzustellen. Da aber andererseits eine Verringerung des Aufwandes an chemischen Pflanzenschutzmitteln ebenfalls grundsätzlich möglich ist, wenn es gelingt, nur noch diejenigen Flächenelemente eines Schlages zu behandeln, die tatsächlich nach dem Schadschwellenprinzip auch behandlungsbedürftig sind, werden zu späterer Zeit Ergebnisse vorgestellt werden. Ein weiterer Aspekt ergibt sich, wenn man eine automatische Fahrzeugführung unterstellt. Der Fahrer würde dann von der Aufgabe des Lenkens entlastet und könnte sich besser auf die Beobachtung von Boden, Pflanze und Befall, seine originären Aufgaben, konzentrieren.

## **4 Schlußfolgerungen**

### **4.1 Landtechnische Aspekte**

Landwirtschaftliche Aspekte haben bei der heutigen Entwicklung der Satelliten-Navigationssysteme keinen Einfluß gehabt und werden ihn voraussichtlich auch

in der Zukunft nicht haben. Die Genauigkeit der bestehenden Systeme ist bereits für eine Ortung ausreichend. Ein Nutzen für den Landwirt ergibt sich jedoch erst dann, wenn das Ortungssignal im Rahmen einer rechnergestützten Landwirtschaft genutzt wird. Diese Rahmenbedingungen sind z.Z. noch nicht gegeben. Für eine automatische Fahrzeugführung reicht die Genauigkeit des Systems aber noch nicht aus, so sind z.B. zusätzliche technische Maßnahmen erforderlich, um die Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs auszugleichen.

## 4.2 Ökonomische Aspekte

Grundsätzlich ist jede Verbesserung des Verhältnisses zwischen Faktoreinsatz und Produktionsmenge zu begrüßen. Ob Produktivitätssteigerungen zugleich auch wirtschaftlich sind, hängt im Falle der Düngungsoptimierung von folgenden Bedingungen ab:

1. Die Vorteilhaftigkeit der neuen Technik ist um so größer, je heterogener die natürlichen Standortverhältnisse sind (Verlauf der Produktionsfunktionen).
2. Da die Heterogenität der Ackerschläge vermutlich auch mit der Schlaggröße zunehmen wird, ist die neue Technik auch agrarstrukturabhängig.
3. Wie der Vergleich der Szenarien 1 bis 4 gezeigt hat, würden im Prinzip diejenigen Landwirte am meisten profitieren, die vorher am weitesten vom Gewinnoptimum entfernt waren.
4. Der Nutzen der neuen Technik ist auch von den Preisrelationen zwischen Agrarprodukten und landwirtschaftlichen Betriebsmitteln abhängig. Hier auf konnte an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Bei den verwendeten Produktionsfunktionen hätten steigende Stickstoffpreise eine Annäherung der Intensitätsoptima zur Folge. Dadurch würde auch das wirtschaftliche Interesse an einer teilschlagspezifischen Düngung abnehmen.
5. Der Nutzen der Technik ist auch fruchtartspezifisch, da eine überhöhte Stickstoffdüngung auch zur Qualitätsminderung und damit zu Preisabschlägen führen kann (Zuckerrüben und Braugerste).

### 4.3 Ökologische Aspekte

Aus ökologischer Sicht stellt jede Verminderung des Einsatzes von Agrochemikalien einen Erfolg dar. Sofern die Verminderung auf technischen Fortschritten beruht, die überdies auch noch positive Einkommenswirkungen haben, dürfte auch die Akzeptanz durch die Landwirte größer sein als bei staatlicher Reglementierung. Aber auch wenn es zu keiner Verringerung der insgesamt auf einen Schlag ausgebrachten Düngemittel kommt, bewirkt eine bedarfsgerechtere Ausbringung zugleich Verringerung von Umweltrisiken.

Im vorliegenden Fall kann somit von einem Einklang zwischen ökonomischen und ökologischen Zielen gesprochen werden. Eine schnelle Übernahme der neuen Technik in die Praxis ist allerdings aus anderen Gründen nicht zu erwarten, denn die mittelfristig erwartbaren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dürften eher dämpfend auf die Investitionsbereitschaft der Landwirte wirken.

#### LITERATUR

- AUERNHAMMER, H.: Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung.- Landtechnik 45 (1990), H. 7/8, S. 272-278.
- BEUCHE, H. und JÜRSCHIK, P.: Anschlußverfahren von Feldmaschinen mit kinematischem Differential-GPS.- VDI-MEG Kolloquium-Agrartechnik, Freising-Weihenstephan, 05. und 06.03.1992.
- DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN: Umweltprobleme der Landwirtschaft.- Stuttgart und Mainz 1985.
- JAHNS, G. und SPECKMANN, H.: Aufgaben eines Bordcomputers im Rahmen der Fahrplatz- und Arbeitsgestaltung.- Internationale VDI-Tagung Landtechnik, Braunschweig 1983.
- JAHNS, G. und SPECKMANN, H.: Agricultural Electronics on Farm Machinery Needs Standardized Data Transfer - A Concept. ASAE Paper 841633, ASAE Winter Meeting, New Orleans, 1984.
- KLING, A.: Möglichkeiten und Grenzen der Stickstoffdüngung aus ökonomischer Sicht, aufgezeigt an verschiedenen Ackerfrüchten. Der Stickstoff (14) 1986, Frankfurt/Main.
- KÖGL, H.: Technischer Fortschritt und Betriebsleiterfähigkeit als Ansatzpunkte der Intensitätssenkung im Zuckerrübenanbau.- Zuckerindustrie 116 (1991), H. 6, S. 538-547.

- PALMER, R.J.: Precise Navigation, Guidance and Control Services within in the Agricultural Community.- *The Journal of Navigation* 42 (1989), H. 1, S. 1-10.
- PFINGSTNER, H.: Auswirkungen eines verringerten Einsatzes von Stickstoff auf den Ertrag, das Düngungsniveau und das Einkommen.- *Die Bodenkultur* 38 (1987), H. 1, S. 67-75.
- ZILAH-SZABO, M.: Computer integrated farming (cif) - Integration computer-unterstützter Systeme im landwirtschaftlichen Betrieb.- In: BUCHHOLZ, H.E. et al. (Hrsg.): *Technischer Fortschritt in der Landwirtschaft - Tendenzen, Auswirkung, Beeinflussung*.- Münster-Hiltrup 1990, S. 223-230.



## **BORNIMER ARBEITEN, DIE ANSÄTZE ZUR ENTWICKLUNG TEILSTÜCKGERECHTER FELDWIRTSCHAFT BIETEN**

Dr. sc. techn. R. Winter, Prof. Dr. habil. K. Baganz

Teilstückgerechte Feldbewirtschaftung war kein erklärtes Forschungsziel in der ehemaligen DDR. Aber es sind Arbeiten durchgeführt worden, die für dieses Ziel verwertbar sind. Da sie bisher in der Bundesrepublik kaum bekannt sind, sollen einige davon vorgestellt werden. Zuvor sei der Hinweis gestattet, daß die agrarstrukturelle Entwicklung in den neuen Bundesländern zu recht günstigen Voraussetzungen für das Nutzbarwerden teilstückgerechter Feldbewirtschaftungsformen geführt hat.

### 1. Agrarstrukturelle Voraussetzungen für teilstückgerechte Feldbewirtschaftung

In der früheren DDR wurde die Landwirtschaft als eine spezifische Form der Industrie verstanden und demgemäß organisiert. Dazu gehört das Ziel, die natürlichen Gegebenheiten im Sinne der Eignung zur großflächigen, "industriemäßigen" Bewirtschaftung umzugestalten. Aus Aufwandsgründen blieben allerdings großzügige Landschaftsveränderungen durch die Landwirtschaft Visionen von Futuristen (Bilder 1 und 2).

Immerhin wurden die Ackerschläge so weit vergrößert, wie das möglich war, ohne Verkehrswege und Wasserläufe oder andere Flurgegebenheiten verlegen zu müssen (WINTER 1980). Solche Umstände bestimmten in der ersten Hälfte der 80er Jahre weitgehend die Schlaggrößenverteilung (Bild 3). Später wurden wieder Schlagunterteilungen vorgenommen, um dadurch die Feldfahrstrecken beim Transport der Erntegüter und damit die Bodenbelastung zu reduzieren. In der Zwischenzeit ist die organisatorische Umwandlung der ostdeutschen Landwirtschaft entsprechend der bundesdeutschen Rahmenbedingungen ein gutes Stück fortgeschritten. Danach dominieren Großbetriebe auch jetzt noch (Bild 4). Dazu trägt sicher auch bei, daß unser "Ostelbien" schon vor 1945 eine stark von Großbetrieben geprägte Agrarstruktur hatte. Großbetriebe werden auch weiterhin im Rahmen des rechtlich Zulässigen große Schläge bevorzugen. Auf großen Schlägen ist die Variation der standortbezogenen

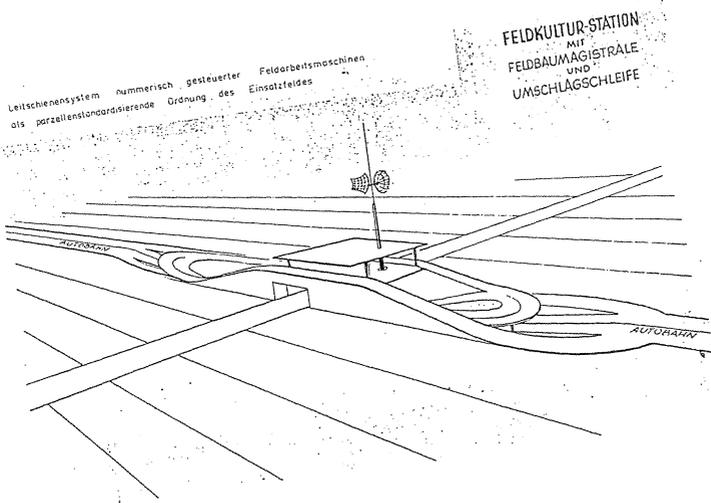


Bild 1

**Großstall-KYBERNET**  
ZUR AUTOMATISCHEN BEWIRTSCHAFT VON CA. 100.000 MILCHKÜHEN (VARIANTE 1)

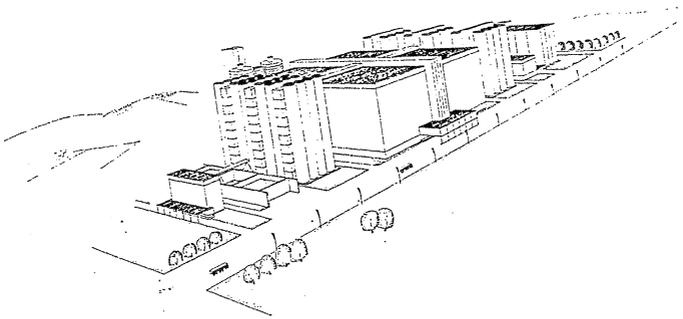


Bild 2

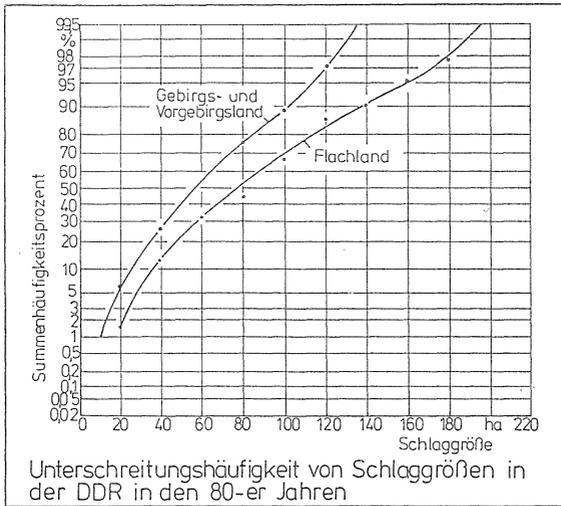


Bild 3

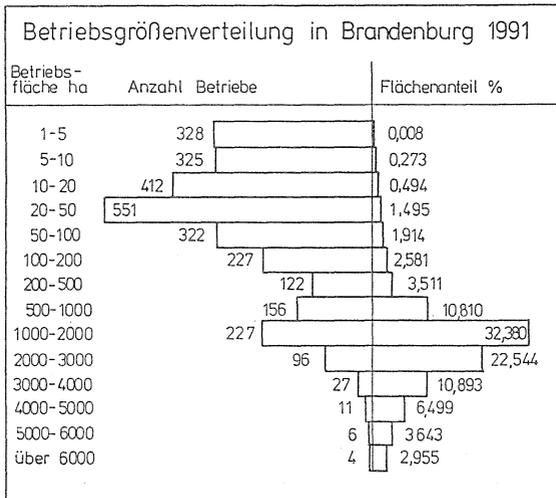


Bild 4

Bodeneigenschaften naturgemäß größer als in kleiner parzellierten Landschaft, wo bereits bei der Schlagunterteilung Standortbesonderheiten berücksichtigt sind. Deshalb gewinnen Möglichkeiten zur teilstückspezifischen Feldbehandlung, wie sie in Verbindung mit Ortungssystemen möglich werden, gerade für die neuen Bundesländer besonderes Interesse.

## 2. Regelspurprinzip

Zu den möglichen Ortungsprinzipien gehört eines, das in der Systematik den Fachbegriff "Schlaglinearisierung" erhalten hat. Dabei werden Ortskoordinaten in einer Richtung durch die Lage von regelmäßig im Feld angeordneten Fahrspuren und in der anderen Richtung durch die Fahrstrecke vom jeweiligen Vorgewende aus definiert. Sicher ist dieses Prinzip wenig geeignet, wenn dabei keine Vorkehrungen gegen Fehlzählung der Spuren getroffen werden und daraus Wirrwarr in der Orts- und Datenzuordnung entstehen kann. Vorbehaltlich der Ausschaltbarkeit solcher Irrtümer - und das könnte durchaus ein nachrichtentechnisches Entwicklungsziel sein - verdient aber aus landwirtschaftlichen Gesichtspunkten m. E. gerade dieses Prinzip besonderes Interesse. Der Regelspuranbau ist für Getreide längst gewissermaßen Standard. Aber es gibt auch kaum eine andere Ackerkultur, die nicht Befürworter mit wohlbegründeten Argumenten für ihren Spuranbau hat. Dabei werden die Vorteilsbegründungen fast ausschließlich aus der Spurnutzung während der Vegetationsperiode der jeweils angebauten Kultur abgeleitet:

- exaktes Anschlußfahren, Vermeidung von null- und doppeltbehandelten Streifen bei Düngung und Pflanzenschutz
- Möglichkeit zur Stickstoff-Spätdüngung und zur Gülleausbringung zur Kopfdüngung von Silomais, Raps und Zuckerrüben
- höhere Arbeitsgeschwindigkeit durch gute Kursorientierung
- reduzierten Energiebedarf wegen des Fahrens in vorverfestigten Spuren und bei der Bodenbearbeitung der nicht befahrenen Feldbereiche
- Vermeidung von Dammflankenpressungen bei Kartoffeln, dadurch geringerer Klutengehalt im Erntegut

Dabei bleibt ein für die ostdeutschen Länder wichtiger Gesichtspunkt noch außer Betracht:

Die dort vorherrschenden dilluvialen, mischkörnigen Sandböden sind im hohen Maße verdichtungsempfindlich. Nach Messungen von PETELKAU /1985/ weisen mehr als 30 % der Ackerböden in der früheren DDR mehr oder weniger ausgeprägte Unterbodenverdichtungen auf. Dazu zitiert er Mitteilungen, wonach verdichtungsbedingte Ertragsausfälle in den USA jährlich Verluste von mehreren Milliarden Dollar und in der früheren UdSSR von 2,5 Mdn. Rubel ausmachen. Unterbodenverdichtungen werden, wie immer wieder bestätigt wird, nicht von den Bodendrücken der Fahrwerke hervorgerufen, sondern von deren Radlasten. Deshalb ist großvolumige Niederdruckbereifung kein wirksames Mittel zu ihrer Abwendung. Dagegen könnte die nicht saisonweise, sondern längerfristig stabile Anlage von Spursystemen und damit die Trennung des Ackers in Fahr- und Wuchsbereiche ein Weg sein, um

- in belastungsfreien Wuchsbereichen ideale Wachstumsbedingungen zu schaffen,
- durch selektive Bodenbearbeitung nur der nicht verfestigten Wuchsbereiche und durch ausschließliches Fahren auf festen Spurbahnen Energie einzusparen und
- witterungsbedingte Befahrbarkeitseinschränkungen zu vermindern.

Regelkonzepte sind mit einem Maßzwang in den Spur- und Arbeitsbreitenmaßen der systemzugehörigen Maschinen verbunden, was technische Kompromisse notwendig macht. Offenbar daran sind die in Deutschland von GEGO /1972/ und WINTER /1980/ zur Standardisierung vorgeschlagenen Spurkonzepte gescheitert. Das sollte aber nicht Anlaß sein, den Gedanken ganz fallen zu lassen, sondern dem Landwirt mehrere solcher Systeme zur Auswahl nach betrieblichen oder regionalen Gesichtspunkten anzubieten. Vielleicht sind in Verbindung mit Spursystemen sogar Vereinfachungen der Maschinenortung möglich.

### 3. Teilstückbezogene Ertragsmessungen

Teilstückbezogene Ertragsmessung erfolgt üblicherweise über fahrabschnittweise Integration von Ertrags-Massestrom-Meßwerten. Bei der Hackfrüchternte werden zusammen mit dem Erntegut auch Erde, Kluten und ggf. Steine aufgenommen. Der Anfall von Erde und Kluten ist nach SCHLESINGER /1988/ abhängig vom Erntezeitpunkt und den dabei herrschenden Witterungsbedingungen, weist aber auch örtlich große Verschiedenheiten auf (Bild 5).

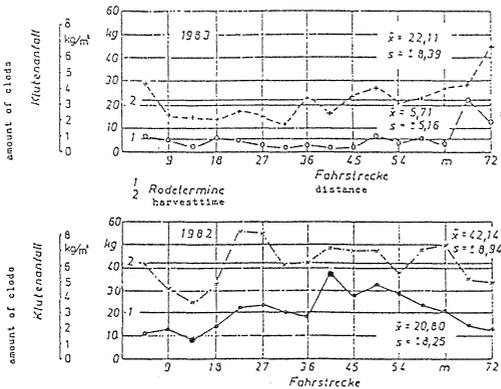


Bild 5: Fahrstreckenabhängigkeit des Klutenfalls bei zwei Ernteterminen

Das macht die getrennte Erfassung von Erntegut und mineralischen Beimengungen notwendig. Ein potentielles Meßprinzip dafür nutzt die materialdifferenziert verschiedene Schwächung zweier unterschiedlich energiereicher Photonenstrahlen (Bild 6).

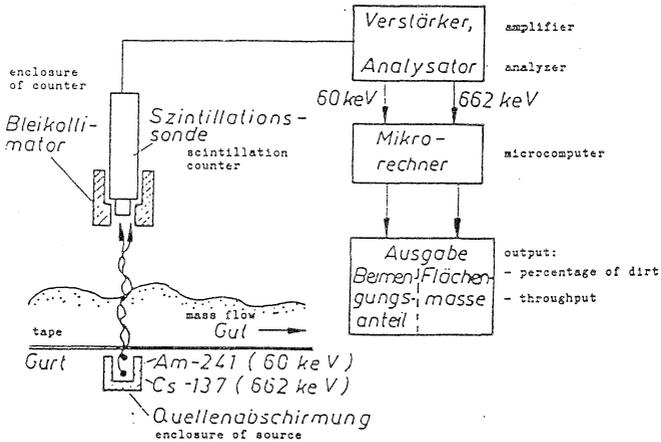


Bild 6: Meßanordnung zur Messung des Beimengungsgehalts von Kartoffeln

Das Meßprinzip wurde zur Aschegehaltsbestimmung in Braunkohlenförderströmen /FRENZEL u.a. 1980/ entwickelt und zur Messung des Beimengungsanteils in Kartoffelströmen angepaßt und untersucht /GLÄSER u.a. 1987/. Die Massebelegung des Förderorgans bewirkt eine Schwächung der Photonenflußdichte auf deren Weg von Quelle zu Zählrohr (Bild 7, Gleichung 1). Bei bekannten Masseschwächungskoeffizienten kann daraus die Massebelegung abgeleitet werden (Bild 7, Gleichung 2). Masseschwächungskoeffizienten sind abhängig von der Art des durchstrahlten Materials und von der Photonenenergie (Tafel 1).

Tafel 1: Massenschwächungskoeffizienten in  $\text{cm}^2 / \text{g}$

Material	Photoenergie	
	60 keV	662 keV
Wasser	0,1971	0,0857
Kartoffeln	0,1920	0,0839
Sandboden	0,2314	0,0757
Lehmboden	0,2584	0,0746
Tonboden	0,2727	0,0774
Kalkboden	0,2985	0,0788

Dadurch ergeben sich bei zwei Strahlenergiestufen mischungsabhängige Massenschwächungskoeffizienten (Bild 7, Gleichung 3), was die Auflösung der Bestimmungsgleichungen nach dem Beimengungsanteil ermöglicht. Ausgehend von Laboruntersuchungen haben GLÄSER u.a. /1987/ für die Bestimmung des Beimengungsanteils einen Gesamtfehler unter 3 Masse % abgeschätzt. Im praktischen Einsatz und im Vergleich zu gravimetrischen Meßmethoden wurden allerdings so gute Ergebnisse bisher noch nicht erzielt (Bild 8).

Grundgleichungen für die Masse- und Beimengungsmessung mittels $\gamma$ -Strahlen		
Ein - Gamma - Transmission	$y = y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot d\right) \quad (1)$ $d = \frac{\ln(y_0/y)}{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$	$y$ : Photonenflußdichte $\frac{\mu}{\rho}$ : Massenschwächungskoeffizient $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ $d$ : Massebelegung $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
Zwei - Gamma - Transmission	$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{eh}} = C_K \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{eh},K} + C_B \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{eh},B}$ $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{en}} = C_K \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{en},K} + C_B \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{en},B} \quad (3)$ $C_K = \frac{m_K}{m_K + m_B} \quad C_B = \frac{m_B}{m_K + m_B}$	$m$ : Masse Indizes eh : höherenergetische Strahlen en : niederenergetische Strahlen K : Kartoffeln B : mineralische Beimengungen

Bild 7

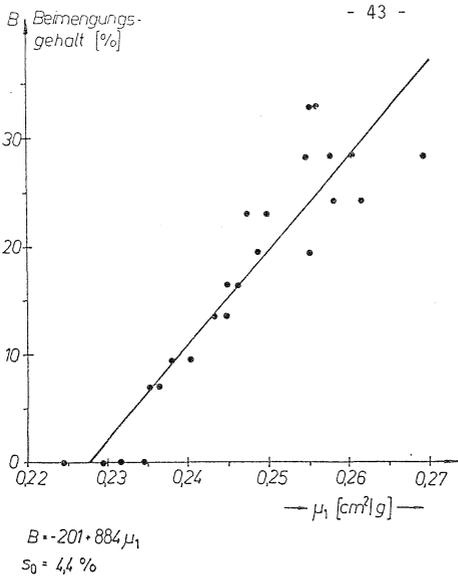
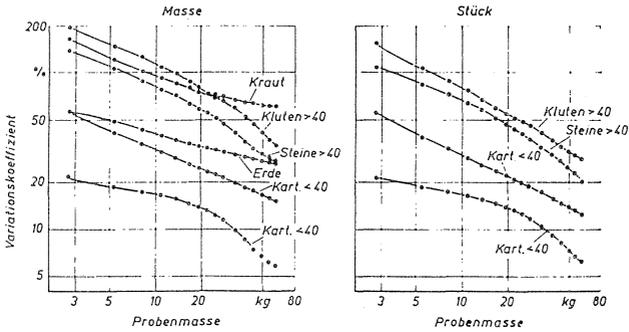


Bild 8 Vergleich radiometrischer Meßergebnisse mit gravimetrisch bestimmten Beimengungsgehalten



Variationskoeffizienten von Erntegutanteilen, Versuchsreihe 1

Bild 9

Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß auch gravimetre Messungen bei beherrschbaren Probengrößen hohe Zufälligkeit aufweisen (Bild 9).

Die Nutzung strahlenden Materials ist in der Bundesrepublik sehr suspekt. In radiometrischen Massebelegungs sonden werden Aktivitäten unter  $1,5 \cdot 10^9$  Bq verwendet. Das führt bei dem sondierten Förderstrom zu Strahlendosen in der Größenordnung von 3 bis 50  $\mu$ Gy. Das ist um den Faktor  $10^{-5}$  bis  $10^{-7}$  niedriger, als PFEILSTICKER nach Untersuchungen an Ratten bei menschlichen Nahrungsmitteln als unbedenklich ansieht. Die mit dem Meßsystem umgehenden Menschen werden nur von dem Strahlungsanteil erreicht, der durch die Quellenabschirmung dringt. Das führt in Anlehnung an GLÄSER u.a. /1989/ und wenn sich eine Person in der mit 200 Stunden angesetzten Erntekampagne in Sondennähe aufhält zur Belastung mit größenordnungsmäßig 0,1 mSv/a. Das ist ein Zehntel dessen, was für Personen aus der Bevölkerung - die also keiner Strahlenaufsicht unterliegen - über einen Zeitraum von 50 Jahren zulässig ist.

#### 4. Fehlerfortpflanzung und Informationsreduktion

In der Kette von der teilstückbezogenen Ertragsmessung bis zur teilstückbezogenen Nährstoffverabreichung können in allen Gliedern Fehler auftreten, z.B.

- bei der Ertragsmessung
- bei der Positionszuordnung des Teilertrages
- bei der Bestimmung des entzugabhängigen Nährstoffersatzbedarfs
- bei der Positionszuordnung der Nährstoffersatzgabe und
- bei der Dosierung der Ersatzgabe.

Große Verarbeitungsleistungen und Speicherkapazitäten moderner Informationssysteme ermöglichen es oder verleiten dazu, diese Fehler durch häufige Wiederholung gleicher Informationsprozesse, also durch hohe Informationsredundanz auszugleichen. So schrieben 1980 zwei englische Autoren im Zusammenhang mit der damals vorbereiteten Einzeltierversorgung: "Es ist außerordentlich wichtig für die Effektivität der Bewirtschaftung einer Milchviehherde, soviel Informationen wie möglich sowohl über die Herde als auch über jede einzelne Kuh sammeln zu können."

Dem ist der Standpunkt entgegenzusetzen, daß auch für Informationen das alte Ökonomieprinzip der Technik "nicht so gut wie möglich, sondern so gut wie nötig" gilt. In diesem Sinne wurden bei uns zu Produktionskontrollsystemen der Milchproduktion /WINTER 1989/ und zur Kartoffelzubereitung Untersuchungen darüber durchgeführt, wie sich Art und Umfang der Erfassung und Verarbeitung von fehlerhaften Prozeßinformationen auswirken. Sinngemäße Untersuchungen dürften auch für das Konzept der teilstückgerechten Feldbewirtschaftung nützlich sein. Mit einer solchen Arbeit sehen wir einen Beitrag unserer Bornimer Abteilung "Technikbewertung" zu dem hier behandelten Gemeinschaftsprojekt.

## 5. Zusammenfassung

In den neuen Bundesländern werden bei maßgeblich großbetrieblicher Agrarstruktur große Ackerschläge mit innerer Standortdifferenziertheit günstige Voraussetzungen dafür bieten, daß Wirkungen teilstückgerechter Feldbewirtschaftung zum Tragen kommen.

Permanente Regelspuren würden den Einsatz auch großer und schwerer Maschinen ermöglichen, ohne den Acker in den Wuchsbereichen zu verdichten. Ortungssysteme zur teilstückgerechten Feldbewirtschaftung sollten dem Rechnung tragen.

Für die teilstückbezogene Messung von Hackfrüchtrträgen ermöglicht das Zwei-Gamma-Transmissionsverfahren das gleichzeitige Ausweisen des Anteils von mineralischen Beimengungen. Bei Einbeziehung von Hackfrüchten in teilstückbezogene Bewirtschaftungssysteme sollte an der Vervollkommnung dieses Meßprinzips weiter gearbeitet werden.

Teilstückgerechte Feldbewirtschaftung unterliegt mehreren sich überlagernden Fehlereinflüssen. Erfahrungen mit anderen landtechnischen Informationsprozessen, für die das auch zutrifft, begründen den Vorschlag zur Untersuchung der Wirkungen von Fehlerfortpflanzung und -überlagerung im Sinne einer Sensitivitätsanalyse.

Literatur:

PETELKAU, DÖLL:

Vermeidung schädlicher Bodenverdichtungen - eine Ertrags- und Effektivitätsreserve.

In: agrartechnik Berlin 35 (1985) 5, S. 200 - 201

GEGO, A.:

Eine international standardisierbare Spur- und Reihenweitenkonzeption.

In: Grundlagen der Landtechnik 22 (1972) 6, S. 175 - 179

WINTER, R.:

Technische Entwicklung der energetischen Basis in der Pflanzenproduktion unter Beachtung der sozialistischen Integration und Schlußfolgerungen für das Maschinensystem Kartoffeln.

In: Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin (1981) 194, S. 15 - 23

SCHLESINGER, F.:

Folgerungen für die Entwicklung der Ernte- und Aufbereitungstechnik aus langjährigen Untersuchungen und Anforderungen an Qualitätserhaltung der Kartoffeln und Aufwandsreduzierung.

In: Tag.-Ber. Akad. Landw.-Wiss. DDR, Berlin (1988) 264, S.25 - 36

FRENZEL, F. und GRÄFENHAIN, V.:

Aschemeßgerät Zfl - KRAS 7. In: Zfl-Mitteilungen Leipzig, Dez. 1990, S. 43 - 46

GLÄSER, M., THÜMMEL, H.-W. und KÖRNER, G.:

Messung des Beimengungsanteils in Kartoffeln an einer Einlagerungsstrecke mittels Zwei-Gamma-Transmissionsverfahren.

In: Isotopenpraxis 23 (1987) 2, S. 58 - 63

PFEILSTICKER:

nach Zitat in "Bestrahlte Lebensmittel - doch ein Risiko?"

In: Flora (1992) 1, S. 43

GLÄSER, M., FUCHS, H.:

Strahlenbelastungen von Meßpersonal und Gut durch  
Bestrahlungsanlagen und radiometrische Sonden in der Landwirtschaft.

In: agrartechnik Berlin 39 (1989) 10, S. 470 - 472

WINTER, R.:

Stochastische Simulationsuntersuchungen über die Wirkung von  
Meßgenauigkeit und Meßfrequenz bei Milchkontrollen.

In: Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin (1989) 283,  
S. 49 - 56



# TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN ZUR ORTUNG LANDWIRTSCHAFTLICHER FAHRZEUGE IM FELD

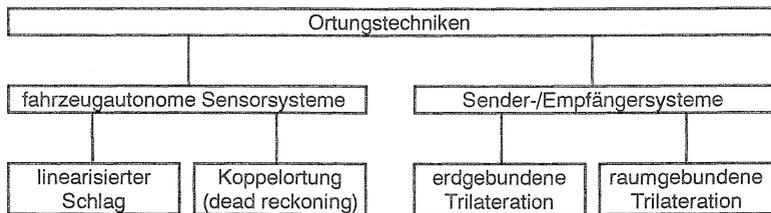
Thomas Muhr und Hermann Auernhammer  
TUM-Weihenstephan, Institut für Landtechnik

## 1. Einleitung

Die pflanzliche Produktion wird heute auf einem hohen Niveau betrieben. Optimierte Bodenbearbeitung, ausgeglichene Düngung und ein differenzierter Pflanzenschutz garantieren höchste Erträge bei hoher Ertragssicherheit auch unter ungünstigen Bedingungen. Allerdings führt dies vielfach zu einer hohen punktuellen Umweltbelastung, weil die Variabilität der Böden nicht oder nur unbefriedigend im Gesamtsystem "Pflanzenbau" berücksichtigt werden kann. Zuverlässige Ortungs- und Navigationssysteme sind deshalb im Sinne eines umweltorientierten Pflanzenbaues auf Teilschlagbasis für die Zukunft unerlässlich.

## 2. Systematik der Ortungstechniken für landwirtschaftliche Fahrzeuge

Ortungssysteme für die Landwirtschaft können in Sensorsysteme und in Sender-/Empfängersysteme unterschieden werden (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Systematik der Ortungstechniken für landwirtschaftliche Fahrzeuge.

Sensorsysteme sind fahrzeugautonome Systeme, d.h. sie benötigen keine zusätzlichen externen Einrichtungen.

In Form des linearisierten Schlages erfolgt die Ortung durch Wegmessung entlang eines vorgegebenen Arbeitsablaufes innerhalb des Feldes. Ein nummeriertes Fahr-gassenschema liefert dabei die zweite Koordinate einer ebenen Positionsbestimmung.

Koppelortung versucht dagegen - wiederum fahrzeugautonom - die Fahrzeugbewegung eigenständig durch mehrere gekoppelte Sensoren zu erfassen und an Totposi-

tionen (dead reckoning) eine Fehlerkorrektur vorzunehmen. Im PKW-Bereich werden dazu Systeme aus Wegsensoren (Raddrehzahl über ABS-Sensoren) und Richtungssensoren (Lenkwinkelgeber, Magnetfeldsonde) in Verbindung mit gespeicherten Karten und Totpunkterfassung eingesetzt.

Bei den Sender-/Empfängersystemen werden fahrzeugautonome und fahrzeugfremde Sender bzw. Empfänger benötigt.

Erdgebundene Trilaterationssysteme (Triangulationssysteme) verwenden terrestrische Ortungshilfen. In Form von elektromagnetischen Wellen ("Funk", Radar, Laser) oder Ultraschall sendet das Fahrzeug Signale aus. Sie werden von Baken an bekannten Positionen aktiv oder passiv zurückgesendet und vom Fahrzeug wieder empfangen. Über Laufzeit- oder Richtungsmessung werden Entfernung und/oder die Richtung zu den jeweiligen Baken und damit die Fahrzeugposition bestimmt.

Bei den raumgebundenen Trilaterationssystemen wird allein die Signallaufzeit zur Entfernungsmessung herangezogen. Bei diesem Verfahren sind Sender und Empfänger getrennt (Einwegmessung). Die für den Einsatz in der Landwirtschaft einzig in Frage kommenden Systeme stellen hier die "Globalen Positionierungssysteme" der USA (NAVSTAR-GPS) und der früheren UdSSR (GLONASS) dar. Satelliten auf Umlaufbahnen senden ständig hochexakte, synchrone Zeitsignale mit den dazugehörigen Positionen aus. Für die zweidimensionale/dreidimensionale Positionsbestimmung eines Empfängers werden drei/vier Satelliten benötigt. Es treten jedoch systematische Fehler (Geometrie der Satelliten und Empfänger, Laufzeitveränderungen in der Ionosphäre, Uhrenfehler) auf. Diese können zum Teil durch einen auf einem vermessenen Punkt stationär betriebenen Empfänger ermittelt und dann über eine Datenfunkverbindung an den Fahrzeugempfänger weitergegeben werden. Dieses aufwendigere aber auch genauere Verfahren wird als differentielles GPS, kurz DGPS bezeichnet. Derzeit können diese Satellitenortungssysteme abgesehen von Kaufpreis für den Empfänger genutzt werden.

### **3. Diskussion der Ortungstechniken für den landwirtschaftlichen Einsatz**

#### **3.1 Der linearisierte Schlag**

Dieses Verfahren hat bis heute als einziger Eingang in die landwirtschaftliche Praxis gefunden. Wichtigster Grund dafür ist die Tatsache, daß genaue Weg-/Geschwindigkeitssensoren bereits seit einiger Zeit fester Bestandteil von geschwindigkeitsgeregelten Dosiersteuerungen für die Applikation von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sind. Die höchsten Genauigkeiten lassen sich dabei mit berührungslos arbeitenden Sensoren realisieren: Ihre Funktion beruht auf dem Dopplereffekt (Ultraschall, Radar); die ermittelte Wegstrecke ist demzufolge vom Radschlupf unabhängig. Untersuchungen der Landtechnik Weißenstephan haben gezeigt, daß die heute verfügbaren berührungslos arbeitenden Wegsensoren in den üblichen Einsatzfällen Genauigkeiten (auf den Weg bezogen) von kleiner 4% erreichen, d.h. bei einem Fahrweg von 400 m ist somit maximal mit einer Abweichung von +/- 16 m zu rechnen (Abb. 2).

Wendevorgänge können dazu benutzt werden, diesen in der Fahrgasse aufgetretenen Fehler jeweils zu annullieren, wenn die wahre Fahrgassenlänge bekannt ist. Damit beschränkt sich die Anpassung der bestehenden Bordelektronik allein auf die Software (Abb. 3).

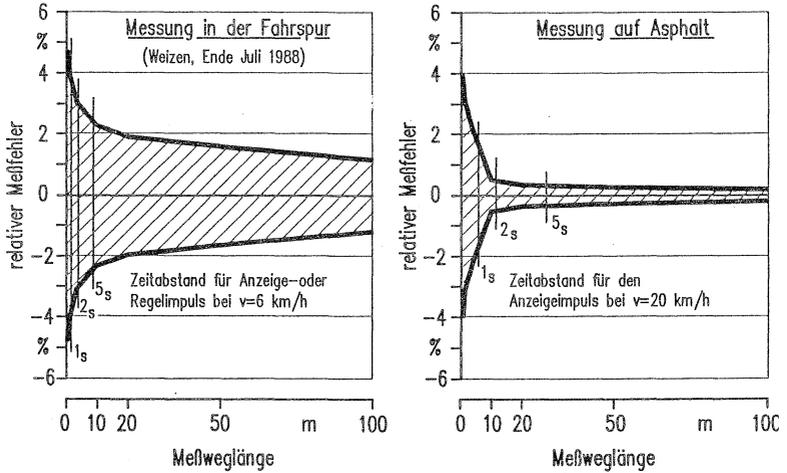


Abbildung 2: Meßfehler der Radarsensoren ( $p=95\%$ ).

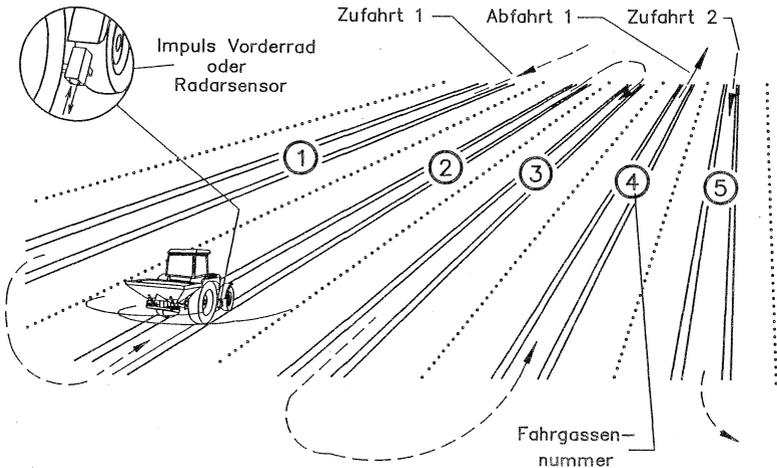
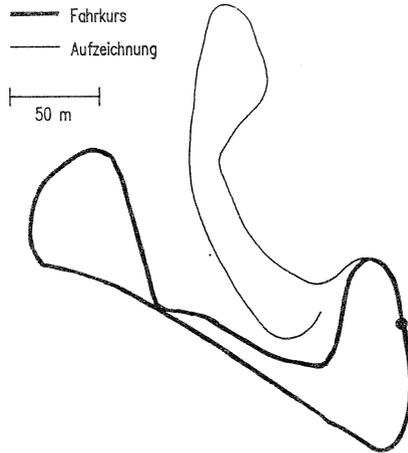


Abbildung 3: Positionsbestimmung im linearisierten Schlag

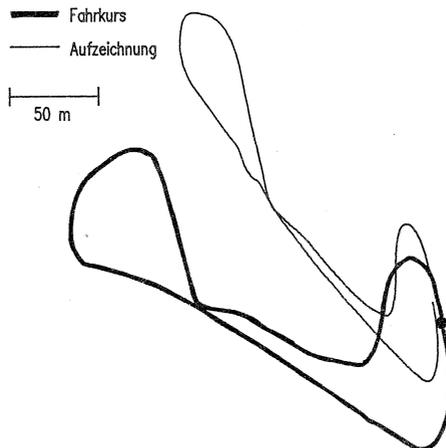
Die Voraussetzung der bekannten Schlaglänge ist jedoch auf unregelmäßig geformten Schlägen nicht immer gegeben. Auch muß sich der Ablauf der jeweiligen Arbeiten streng an das einmal festgelegte Fahrgassenraster halten. Insbesondere bei Arbeitsbeginn und -unterbrechung (z.B. bei leerem Behälter) muß das System exakte Angaben vom Benutzer erhalten, damit das Ablaufschema nicht unterbrochen wird. Da die Fahrgassennummer die zweite Koordinate der Positionsbestimmung darstellt, ist der Fahrgassenabstand und die Arbeitsrichtung über die Jahre einzuhalten. Dadurch können sich für den betrieblichen Ablauf deutliche Störungen ergeben. Bei unzuverlässiger Bedienung des Systems ist der wirkungsvolle Einsatz überhaupt nicht möglich. Deshalb ist die Verwendung des linearisierten Schlages im Moment auf Betriebe mit hochqualifizierten und hochmotivierten Mitarbeitern beschränkt. Für solche Betriebe stellt das Verfahren aber eine kurzfristig realisierbare und kosteneffektive Möglichkeit einer teilflächenbezogenen Bewirtschaftung dar.

### **3.2 Koppelortung**

Bei der Koppelortung müssen dem Ortungssystem ebenfalls sowohl zur Initialisierung bei Arbeitsbeginn, als auch regelmäßig nach Abarbeiten gewisser Weg- bzw. Zeitabschnitte Ausgangspositionen eingegeben werden (sog. Totpunkte). Dazwischen aber errechnet das System durch vektorielle Addition möglichst kleiner Teilwege den zurückgelegten Weg und damit die aktuelle Position. Radsensoren wie im PKW-Bereich sind für landwirtschaftliche Fahrzeuge wegen des i.a. hohen Schlupfes zur Wegbestimmung ebenso wenig geeignet wie Lenkwinkelmessungen zur Richtungsbestimmung. Bei Arbeiten im Feld sind nicht lenkungsbedingte Richtungsänderungen durch Hangabtriebs- oder Zugkräfte die Regel. Auch Magnetfeldsensoren scheinen wegen der wechselnden Anbaugeräte aus Stahl zur Richtungserkennung wenig geeignet. Eine Möglichkeit der kombinierten Weg-/Richtungserkennung für landwirtschaftliche Maschinen könnte in der berührungslosen Wegmessung links und rechts in der Fahrzeugspur bestehen. Die getrennte Erfassung der beiden Teilwege kann über geometrische Fahrwerksparameter zur Berechnung der Richtungsänderung herangezogen werden. Eigene Versuche mit zwei Ultraschall-Geschwindigkeitssensoren (Abb. 4) zeigen, daß die einfache Erfassung der Teilwege über Radsensoren mit über den ganzen Kurs konstanten Parametern auf dem verwendeten Untergrund (Kleegrass gemäht) das bessere Ergebnis ergibt. (Abb. 5) Diese ersten Ergebnisse zeigen, daß für eine zufriedenstellende Aufzeichnung einer Fahrtstrecke eine wesentlich verfeinerte Erfassung der sich dynamisch ändernden Fahrzeugparameter (Einfederung, effektive Spurweite, effektiver Radstand, Achslastverteilung) und ihre Einflüsse auf die berührungslose Wegmessung erforderlich ist. Der Einsatz inertialer Systeme zur integrierten Weg-/Richtungserfassung bzw. mechanischer oder faseroptischer Kreiselsysteme scheint im Moment aus Kostengründen nicht möglich. Aber selbst bei Einsatz dieser wesentlich genaueren Technik wäre immer noch ein Totpunktgleich notwendig. Dieser kann im landwirtschaftlichen Einsatz nur mittels fahrzeugexterner Einrichtungen erfolgen.



**Abbildung 4:** Aufzeichnung einer Meßfahrt zur Koppelnavigation mit Ultraschallsensoren.



**Abbildung 5:** Aufzeichnung einer Meßfahrt zur Koppelnavigation mit Radsensoren.

### 3.3 Erdgebundene Trilaterationssysteme

Weiträumig verfügbare Trilaterationssysteme auf Basis elektromagnetischer Wellen sind vor allem in der Luft- und Seefahrt seit langer Zeit im Einsatz. Die dort erzielten Genauigkeiten sind aber für den Einsatz in der Landwirtschaft bei weitem nicht ausreichend. Die kleinräumige Anwendung genauerer Systeme ist aber mit verschiedenen technischen und administrativen Problemen verbunden. Der Einsatz von Lasersystemen bietet zwar die höchsten Genauigkeiten, ist wegen der ausbreitungstechnisch notwendigen Sichtverbindung aber auf sehr kleine Reichweiten und/oder ebenes Gelände beschränkt.

Mit der Verringerung der verwendeten Frequenzen verliert die Forderung nach der Sichtverbindung zwischen Baken und Fahrzeug an Gewicht; im selben Maß nehmen aber die Probleme mit Reflektionen und Multipath-Effekten zu. Ein in Amerika eingesetztes System benutzt aus diesem Grunde ein Frequenzspektrum anstelle einer oder weniger Einzelfrequenzen. Der flächendeckende Einsatz solcher Systeme ist nicht zuletzt auch aus Sicht der fernmeldetechnischen Zulassung problematisch. Die Erstellung und der Unterhalt der erforderlichen Infrastruktur lassen erdgebundene Trilaterationssysteme derzeit darüberhinaus auch aus organisatorischen Gründen und Kostengründen für den landwirtschaftlichen Einsatz als ungeeignet erscheinen.

### 3.4 Raumgebundene Trilaterationssysteme

Die globalen Positionierungssysteme NAVSTAR-GPS und GLONASS (im weiteren einfach GPS genannt) bieten besonders im differentiellen Betrieb weltweit hohe Genauigkeiten bei der dreidimensionalen Positionsbestimmung. Die erforderliche Infrastruktur ist bis Ende 1993 zumindest bei NAVSTAR-GPS komplett aufgebaut. Durch das Prinzip der Einwegmessung ist die Zahl der Nutzer technisch nicht beschränkt. Hiermit ergibt sich für die Empfängerhardware ein Markt auch in der Massen-anwendung z.B. im PKW- und/oder im LKW-Bereich. Deutliche Preissenkungen für die im Moment noch hohen Empfängerkosten erscheinen damit realistisch.

Allerdings lassen sich Genauigkeiten von besser als 10 m nur im differentiellen Betrieb erreichen. Deshalb ist der Aufbau einer Infrastruktur zur Verbreitung der Korrekturnachricht des Referenzempfängers erforderlich. Da die Korrekturinformation einer Referenzstation aber für einen Radius von bis zu 300 km um die Station Gültigkeit hat, sind im Vergleich zu erdgebundenen Trilaterationsanlagen nur sehr wenige Stationen für eine bestimmte Fläche erforderlich. Die Verbreitung des Korrektursignals könnte über ungenutzte Seitenbänder von Rundfunk- oder Betriebsfunkkanälen erfolgen, so daß zum Empfang lediglich modifizierte Funkanlagen erforderlich wären.

Die oben gemachten Aussagen zur Genauigkeit beziehen sich auf die Nutzung des C/A-Codes im Rahmen des sog. Standard Positioning Service (SPS) bei NAVSTAR-GPS. Derzeit ist auch der P-Code im Precise Positioning Service (PPS) mit entsprechend ausgestatteten Empfängern zu empfangen. Im PPS ist die erreichbare Genauigkeit etwa um den Faktor 10 besser. Nach dem vollständigen Ausbau des Satellitensystems Ende '93, wird jedoch PPS durch eine zusätzliche Verschlüsselung nur noch besonders autorisierten Gruppen zur Verfügung stehen. Aber auch im SPS ist eine Beeinflussung der "Signalgüte" der Satelliten möglich. Diese Politik der Se-

lective Availability (S/A) des US-Verteidigungsministerium bedeutet für die Nutzer des SPS seit Herbst 1991 eine Verschlechterung der Genauigkeit im Einempfängerbetrieb von ca. 30 m auf etwa 100 m (Abb. 6 und 7).

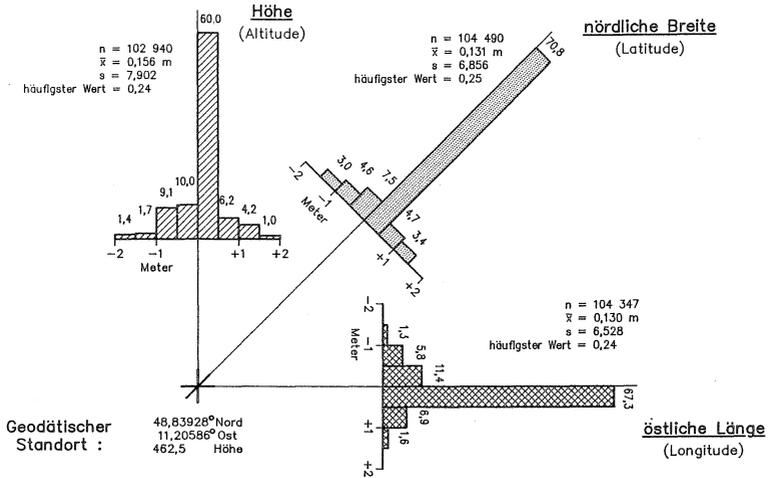


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilungen der Positionsfehler bei DGPS ("S/A off")

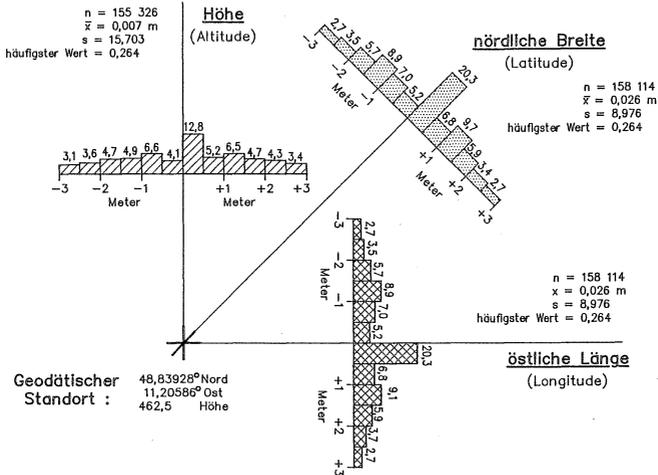


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilungen der Positionsfehler bei DGPS ("S/A on").

Da nicht bekannt ist, ob und wann S/A aus- bzw. eingeschaltet wird, kann für den landwirtschaftlichen Einsatz derzeit nur DGPS in Frage kommen. Damit steht dann allerdings ein Ortungssystem zur Verfügung, das die landwirtschaftlichen Anforderungen in einem weiten Bereich erfüllt. Da ein weltweit gültiges Bezugssystem verwendet wird, empfiehlt es sich besonders für den überbetrieblichen Maschineneinsatz und die automatisierte Prozeßdatenerfassung auf dem Feld. Für einen ungestörten Empfang der Signale ist jedoch Sichtverbindung zu den einzelnen Satelliten erforderlich. Deshalb muß zur Stützung des Systems in stark kupierten Lagen und/oder am Waldrand fahrzeugeigene Sensorik eingesetzt werden.

#### **4. Zusammenfassung**

Die Einteilung der Ortungstechniken für landwirtschaftliche Fahrzeuge in Fahrzeugautonome und Sender-/Empfängersysteme zeigt deutlich die prinzipiellen Probleme der einzelnen Verfahren. Das Verfahren des linearisierten Schlasses ist trotz der schwierigen Handhabung ein kurzfristig mit relativ geringem Aufwand realisierbarer Lösungsansatz. Erdgebundene Trilaterationssysteme scheinen vor allem wegen des hohen finanziellen und organisatorischen Installationsaufwandes nur schwer in die Praxis einführbar. Da die Positionsbestimmung mit GPS auf ein globales Bezugssystem bezogene Positionsdaten liefert, wird dieses Verfahren die Grundlage künftiger Ortungssysteme auf landwirtschaftlichen Maschinen darstellen. Die Probleme des Signalausfalls durch geländebedingte Abschattung lassen sich durch ein fahrzeugautonomes Koppelortungssystem überwinden. In Zukunft wird sich das Abschattungsproblem aber auch durch eine höhere Zahl sichtbarer Satelliten entschärfen. Die dann nur kurzen Zeiten von Signalausfall lassen sich dann auch durch ein relativ einfach aufgebautes Koppelsystem überbrücken.

#### **5. Literaturverzeichnis**

*Auernhammer, H. und T. Muhr:*

GPS in a Basic Rule for Environmental Protection in Agriculture.  
Proceedings of the 1991 Symposium "Automated Agriculture for the 21st Century",  
Chikago 1991, Hrsg. ASAE, St. Joseph, USA, S. 394-402.

*Buschmeier R.:*

CAF with the Satellite Navigation System GPS.  
Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on  
Agricultural Engineering (AgEng '90)", Berlin, VDI-AGR/MEG 1990, S. 88-89.

*Petersen, C:*

Precision GPS Navigation for Improving Agricultural Productivity.  
GPS World 1991, Nr. 1, S.38-43.

*Stafford, J.V. and B. Ambler:*

Dynamic Location for Spatially Selective Field Operations.  
St. Joseph, ASAE-Paper Nr. 91-3528.

LÖSUNGSANSÄTZE ZUR POSITIONSBESTIMMUNG MOBILER LANDMASCHINEN  
MITTELS EINES TRÄGHEITSNavigATIONSsystems

Dr.-Ing. habil. G. Bernhardt, Dipl.-Ing. W. Damm  
Institut für Landtechnik, TU Dresden

1 Bedeutung der Trägheitsnavigation innerhalb der heutigen  
Ortungs- und Navigationssysteme

Wenn heute über Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge gesprochen wird, so wird dies fast ausnahmslos mit der Satellitennavigation in Verbindung gebracht. Neben der berechtigten Vormachtstellung der Satellitennavigation wird auch die Trägheitsnavigation für einige spezielle Anwendungsfälle an Bedeutung gewinnen. Diese Anwendungen können aus den Vorteilen der Trägheits- gegenüber der Satellitennavigation abgeleitet werden.

- Dank eigener Messungen der Fahrzeugbeschleunigungen und der selbststabilisierenden Plattform arbeitet die Anlage völlig autonom. Sie läßt sich somit in bebautem oder stark bepflanzttem Gelände (Kommunal- und Forstwirtschaft) einsetzen.
- Die Anlage liefert ihre Informationen augenblicklich und kontinuierlich, unabhängig von der Fahrzeuglage oder -bewegung. Sie setzt nicht den ständigen "Sichtkontakt" zu mindestens drei Punkten im Raum (Satelliten) voraus.
- Die Anlage arbeitet weltweit ohne stationäre Hilfsmittel (Bodenstationen) sowie völlig unabhängig vom Wetter und Tages- oder Jahreszeiten (Satellitenfenster).
- Die Anlage ist nicht störbar. Damit ist sie unabhängig von der politischen oder militärischen Situation betreibbar.
- Die Anlage liefert kontinuierliche Fahrzeuginformationen. Man ist mit einem Trägheitsnavigationssystem also in der Lage, nach einer exakten Anfangsorientierung eine automatische Kurssteuerung vorzunehmen.

Diesen Vorteilen, die den Einsatz in Landmaschinen rechtfertigen würden, stehen derzeit folgende Nachteile gegenüber:

- Das System erfordert eine exakte Anfangsorientierung, für die in der Fachliteratur zwischen 20 min. und 4 Stunden genannt werden.

Dies ist dem Landwirt oder dem Lohnunternehmer nicht zuzumuten. An der TU Dresden werden aus diesem Grund Untersuchungen zur Vereinfachung der Anfangsorientierung durchgeführt.

- Ein Trägheitsnavigationssystem ist mit einem nicht kompensierbarem Kreisel drift behaftet. Die Driftrate hängt fast ausschließlich von der Präzision bei der Kreiselherstellung ab. Die Anschaffungskosten steigen progressiv mit der erreichbaren Genauigkeit. Diese haben bei militärischen Anlagen einen hohen Stand erreicht. Für das an der TU Dresden vorhandene, aus der ehemaligen Sowjetunion stammende, Panzernavigationsgerät "TNA-3" werden maximal 1,3 % Fehler in 7 Betriebsstunden angegeben. Damit lassen sich die Anforderungen an eine Landmaschine im wesentlichen erfüllen.
- Der Wartungsaufwand ist vergleichsweise höher, dürfte aber für die zivile Nutzung in einem vertretbarem Rahmen liegen. Für das "TNA-3" ist ein Wartungszyklus von 450 Betriebsstunden bzw. 5 Jahren angegeben. Darüber hinaus ist nach 50 ununterbrochenen Betriebsstunden ein erneuter Feinabgleich des Systems vorzunehmen.

Gegenwärtig ist der Einsatz von Trägheitsnavigationssystemen für eine komplexe Anwendung in der Landwirtschaft mit großer Wahrscheinlichkeit auch aus Kostengründen nicht möglich. Es sei an dieser Stelle auf eine Reihe von Aktivitäten, unter anderem der "Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation" (DGON) und auf die Möglichkeit der Nutzung von Technik aus der Verschrottung militärischer Fahrzeuge im Rahmen der Abrüstung verwiesen.

## **2 Die Anfangsorientierung**

### **2.1 Hilfsmittel zur Anfangsorientierung**

Vor der Nutzung eines Trägheitsnavigationssystems ist es zwingend erforderlich, die Ausgangsposition des Systems und den Anfangskurswinkel des Fahrzeuges zu bestimmen. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse muß ausschließlich auf die Genauigkeit der Anfangsorientierung zurückgeführt werden, da sowohl kreiselbedingte Fehler als auch Fehler bei der Wegstreckenaufnahme wesentlich geringeren Einfluß auf die Navigationsergebnisse haben oder kompensierbar sind.

Zur Bestimmung der Anfangsorientierung werden folgende Hilfsmittel benötigt:

- topographische Karten möglichst großen Maßstabes,
- Stechzirkel, Transversalmeßstab und Sehnenwinkelmesser,
- ein optisches Beobachtungs- oder Vermessungsgerät (z.B. Theodolit), sowie zur Erhöhung der Genauigkeit
- Festpunktbeschreibungen aus dem Koordinatenkatalog.

Bei der Auswahl der topographischen Karten ist zu beachten, daß sich das Gauß-Krüger-Koordinatensystem immer auf einen Bezugs- bzw. Referenzellipsoiden bezieht. Die Volkswirtschaftskarten beziehen sich in der Regel auf den von Bessel (1841). In Westeuropa wird auf der Basis des Ellipsoiden von Hayford, welcher im Jahre 1924 von der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) zum internationalen Ellipsoiden erklärt wurde, gearbeitet. Seit 1980 existiert das GRS-80, welches bereits auf Satellitenvermessung basiert und seit 1984 WGS 84. Nach Aussagen von Lohmar in /6/ wird gegenwärtig an einer Neuvermessung eines allgemeinen, geodätischen Referenzsystemes mit GPS gearbeitet. Auf dieser Basis und unter dem Gesichtspunkt, daß militärische Feindbilder schwinden, ist mit einem einheitlichen, weltweit gültigem Kartenwerk zu rechnen. Praxis in den Staaten des ehemaligen Warschauer Paktes war unter anderem die Verfälschung von Kartenmaterial für die Volkswirtschaft (Bessel). Da noch nicht alle Karten neu vermessen wurden, haben wir uns an der TU Dresden zu Nutzung militärtopographischer Karten entschlossen. Diese basieren auf dem für den Warschauer Pakt verbindlichen Referenzellipsoid von Krassowski (1942). Wir leiten daraus Vorteile für die Anfangsorientierung ab, da es für dieses Kartenwerk millimetergenaue Festpunktvermessungen gibt (siehe auch Abb. 1 Folgeseite). Darüber hinaus bietet sich die Verwendung des Krassowski-modells bei der Vermessung und Navigation mit militärischer Technik an.

## **2.2 Die Ausrichtung des Beobachtungsgerätes auf die Fahrzeuglängsachse der Maschine**

Neben dem Trägheitsnavigationssystem "TNA-3" konnten aus den Beständen der ehemaligen NVA Artillerie - Richtkreise PAB 2 - A erworben werden. Dies kann prinzipiell einem präzisen

Landvermessungsgerät gleichgesetzt werden. Ein solcher Richtkreis muß auf die Fahrzeuglängsachse der Landmaschine ausgerichtet werden. Dazu sind 1000 Meter gerade, ebene Fahrstrecke erforderlich. Wir nutzen für die Justierung des Beobachtungsgerätes auf einer Landmaschine einen 320 Meter langen, vor dem Institutsgebäude liegenden, betonierten Fahrweg.

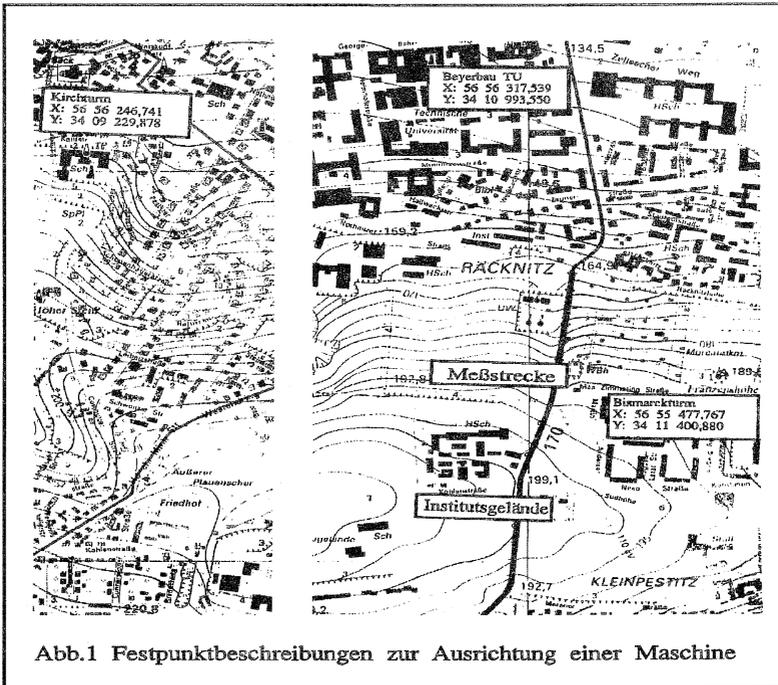


Abb.1 Festpunktbeschreibungen zur Ausrichtung einer Maschine

Diese Verkürzung ist statthaft, da wir unsere Meßstrecke mittels dreier Festpunktvermessungen genauestens einrichten konnten. Durch mehrmalige Wiederholungen des Meßvorganges wurden Fehler weitestgehend eliminiert. Für eine spätere, breitere Nutzung wäre an dieser Stelle eine werksseitige Montage möglich.

### 2.3 Bestimmung der Anfangsorientierung der Maschine

Im Gegensatz zur Satellitennavigation stellt die Trägheitsnavigation eine aktive, kontinuierliche Positionsbestimmung dar. Jede Bewegung wird registriert und zur vorherigen Position hinzugerechnet. Es ist demnach erforderlich, vor jeder Navigationsaufgabe die Anfangsorientierung der Maschine zu bestimmen. Muß diese auf dem zu bearbeitenden Schlag erfolgen, so besteht prinzipiell nur die Möglichkeit, ähnlich der Methode zur Bestimmung der Fahrzeuglängsachse zu verfahren. Hierzu müssen wieder topographische Karten verwendet werden. In der Karte sind anvisierbare Punkte (z.B. Kirchtürme) zu kennzeichnen und die geodätischen Daten zu ermitteln. Mit dem Beobachtungsgerät werden diese fixen Punkte anvisiert und daraus der eigene Standort berechnet. Danach wird eine definierte Strecke (z.B. 100m) gerade zurückgelegt, der zweite Standort vermessen und daraus der Kurswinkel gegen Gitter Nord errechnet. Um eine Einschätzung der erreichbaren Genauigkeit vornehmen zu können, wurde auf diese Weise eine Festpunktbeschreibung "nachgemessen". Es wurden Positionsfehler von  $< 3\text{m}$  und Winkelabweichungen von  $< 0,1^\circ$  auf 1000m ermittelt. Für die beschriebene Anfangsausrichtung mußten während der Versuche im vergangenen Jahr ca. 30min pro Ausrichtung angesetzt werden. Dazu kommen noch die Vorbereitungszeit für die Vermessung selbstgewählter Fixpunkte, welche jedoch nur einmal auszuführen ist. Für diese Art der Anfangsorientierung wurden keine Fehleruntersuchungen durchgeführt. Die Methode stellt nach unserer Auffassung auch eine zu starke Belastung für einen praktischen Einsatz dar. Deshalb werden an der TU Dresden Methoden zur Vereinfachung der Anfangsorientierung untersucht.

Wir gehen davon aus, daß wir die Maschine auf dem Hof bzw. auf unserem Institutsgelände ausrichten und uns dieses Gelände in seiner Vermessung bekannt ist. Gemäß der Abb. 2 wurde mit dem Mähdrescher parallel zur Halle "AS" bis auf 20m rechtwinklig an den Lagerschuppen [Richtung 14-71] herangefahren. Als Hilfsmittel haben wir Markierungslinien auf den Hof aufgespritzt. Mit dem Beobachtungsgerät wurden die beiden Markierungen anvisiert und daraus die Abweichung der Fahrzeuglängsachse von der Vorgaberichtung 59-71 berechnet. Der

so ermittelte Wert der momentanen Kursrichtung konnte mit der konstanten Position [X:56 55 291,5 ; Y:34 10 810,0] am Navigationsgerät eingestellt werden.

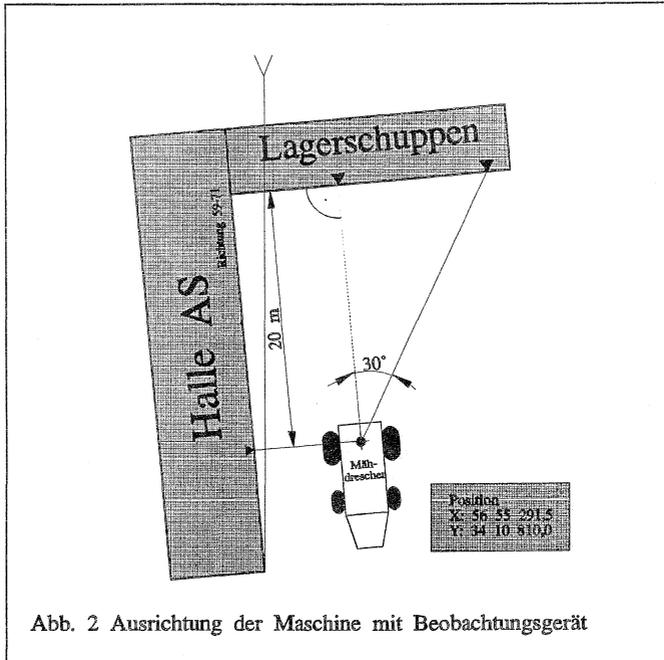


Abb. 2 Ausrichtung der Maschine mit Beobachtungsgerät

Mit dieser Art der Ausrichtung wird ein Fehler zugelassen. Es ist mit dem Anvisieren der beiden Fixpunkte nicht meßbar, ob es sich um eine Winkelabweichung oder einen Versatz der Fahrzeuglängsachse handelt. Dieser Fehler mit dem Aufbau eines zweiten Beobachtungsgerätes am Heck der Maschine kompensierbar, treibt aber Aufwand und Preis weiter in die Höhe. Um den Orientierungsaufwand zu verringern, werden weitere Möglichkeiten untersucht. Es wird derzeit an einer Vermessung der Testmaschine mit Ultraschallsensoren gearbeitet. Dazu sind folgende Varianten denkbar:

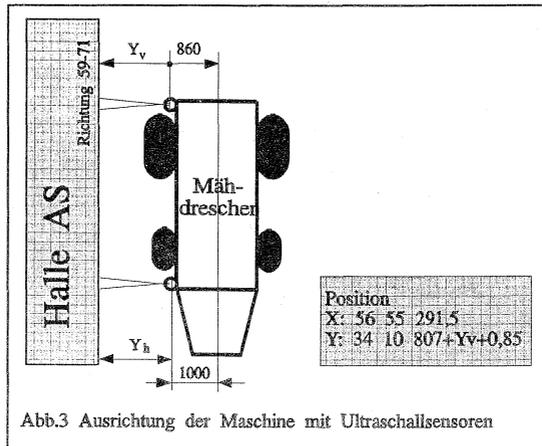
1. fest an der Halle "AS" befindliche Sensoren messen den Abstand zu zwei gekennzeichneten ebenen Flächen an der Maschine,

2. ein oder zwei an der Maschine befindliche Sensoren messen die Abstände zur Wand und
3. der Abstand zwischen Hallenwand und Rahmen der Maschine wird manuell mit einer Meßlatte ermittelt.

Über diese Methoden läßt sich sowohl der Abstand von der Wand [X: 56 55 294,90 ; Y: 34 10 814,41] als auch der Winkel zur Wand [Richtung 59-71] ermitteln.

Die Arbeit mit der Meßlatte verspricht den geringsten materiellen Aufwand. Die erreichbaren Genauigkeiten werden etwa auf dem Niveau der Ultraschallsensoren liegen. Der manuelle Aufwand ist erheblich, womit die ausschließlich vom Anwender abhängige Fehlerquote negativ beeinflußt wird.

Für die Variante 1 spricht, daß die Sensoren nicht den harten Arbeitsbedingungen z. B. eines Mähdreschers ausgesetzt werden. Die Schallkeule der Sensoren (ca. 5°) verlangt aber eine eindeutige Meßfläche am Rahmen der Maschine. Diese Normmeßflächen von min. 100x100mm sind am Mähdrescher E 517 relativ schlecht anbringbar, da viele vorstehende Baugruppen die Meßergebnisse verfälschen können. Wir haben uns für die Montage zweier Ultraschallsensoren an der Maschine entschlossen (Abb.3).



Die von uns eingesetzten Sensoren arbeiten im Bereich von 300...3000mm mit einem Schaltabstand (Auflösung) von 11mm. Der maximale Fehler beträgt bei einem Abstand von 4,70m an der Maschine  $\pm 0,268^\circ$ , das entspricht 00-04 und liegt etwas über den hohen Anforderungen im militärischen Bereich. Berücksichtigt man, daß die Normzeit für die Ausrichtung eines Panzers in der ehemaligen NVA 1,5 Stunden betrug, kann die beschriebene Möglichkeit befriedigen. Die verwendeten Sensoren verfügen über eine serielle Schnittstelle (RS 232) und sind damit an den Bordrechner der Maschine anschließbar. Im Display werden die für den Koordinatenrechner des Navigationssystems notwendigen Ausgangskordinaten X und Y sowie der Ausgangskurswinkel  $\alpha(k)$  angezeigt.

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Ausgangskurswinkels mit maschinenfesten Sensoren ist das Abfahren einer ebenen Fläche (Wand) bei gleichzeitigem Messen des Abstandes. Über den zurückgelegten Weg und dem jeweils zugeordneten Abstand zur Wand wird eine Regression durchgeführt. Mit Hilfe des Korrelationskoeffizient ist zu entscheiden, ob die Meßfahrt wiederholt werden muß oder der Anfangskurswinkel  $\alpha(k)$  angezeigt wird.

### **3 Möglichkeiten der Trägheitsnavigation**

#### **3.1 Das Grundprinzip und erste Ansätze**

Das Grundprinzip der Trägheits- oder Inertialnavigation besteht in der Messung der Beschleunigungen  $a$  längs genau definierter Achsen. Durch Integration lassen sich Geschwindigkeit  $v$  und zurückgelegter Weg  $s$  und daraus die neue Position des Systems berechnen. Das eigentlich Komplizierte der Trägheitsnavigation ist die exakte Zuordnung von Beschleunigungen zu den jeweiligen Achsen. Die einfachste Methode zur Bestimmung dürfte die Koppelung mit einem Fluidkompass sein. Die Schifffahrt nutzt diese Technik noch heute, allerdings nicht mit den für die Landtechnik stehenden Genauigkeitsforderungen. Es gibt aber auch Versuche bei Landfahrzeugen, die Wegstreckenmessung (Kilometerzähler) mit Fluidkompassen zu koppeln und daraus die neue Position zu bestimmen. Diese Methode birgt eine Reihe von Fehlern und verspricht nur in Verbindung mit digitalisierten Karten und auch nur für spezielle Anwendungsfälle Erfolg.

Gegenwärtig gibt es Bestrebungen, den klassischen, mechanischen Kreisel durch Laserringe zu ersetzen (siehe auch in /6/). Diese bestehen aus mehreren Laserringen, deren Muster sich beim Drehen verändert und gemessen werden kann. Laserringe sind genauer und leichter als mechanische Kreisel. Sie verbrauchen weniger Strom und müssen nicht kardanisches aufgehängt werden. Die Aufgaben der Driftkompensation lassen sich fast problemlos über Computer lösen. Halten diese Kreisel die in sie gesetzten Erwartungen, so steht vor einer zivilen Nutzung jedenfalls eine langjährige militärische Erprobung. Andererseits, deshalb mußten diese Systeme hier erwähnt werden, könnten damit die Preise für mechanische Kreiselssysteme auf ein Niveau sinken, die einen für die Menschheit sinnvollen Einsatz außerhalb der zivilen Luftfahrt gestatten.

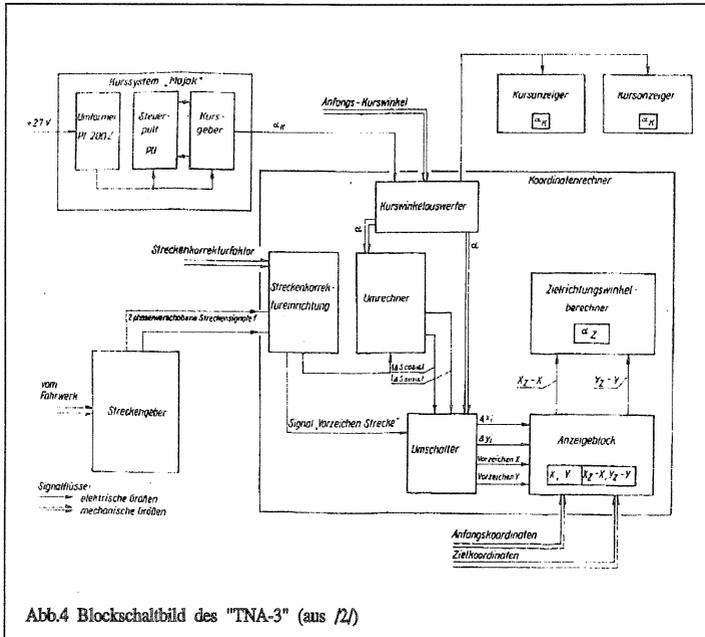
### 3.2 Vorstellung des Panzernavigationssystems "TNA-3"

Im Rahmen der Konversion konnte aus Reservebeständen der ehemaligen NVA ein im Warschauer Pakt auf Panzern und Schützenpanzerwagen übliches, werksneues Trägheitsnavigationssystem erworben werden. Das Navigationssystem, das in Abb.4 (Folgeside) dargestellt ist, besteht aus folgenden Baugruppen:

- das Kurssystem "MAJAK" mit seinen Komponenten  
Kreiselkursgeber, Steuerpult und Umformer,
- Streckengeber,
- Koordinatenrechner und
- Kursanzeiger.

Der Kreiselkursgeber ist die Hauptbaugruppe des gesamten Systems. Die Arbeitsweise entspricht der des klassischen Kreisels mit drei Freiheitsgraden und kann hier als bekannt vorausgesetzt werden. Der Rotationskörper erreicht eine Drehzahl von etwa  $21400 \text{ min}^{-1}$ , wofür eine Leistung von 450W (+ 150W Heizung bei  $< +5^\circ\text{C}$ ) erforderlich ist. Dies muß beim Anschluß an das Bordnetz der Landmaschine beachtet werden. Zum Einen können sich Auswirkungen auf z.B. den Bordrechner ergeben, zum Anderen wird auch im Sommerbetrieb ein Strom von reichlich 20A für das Gesamtsystem benötigt! Im Kreiselblock sind die Horizontiereinrichtung (Kompensation der scheinbar vertikalen Auswanderung) und die Azimutkorrekturereinrichtung

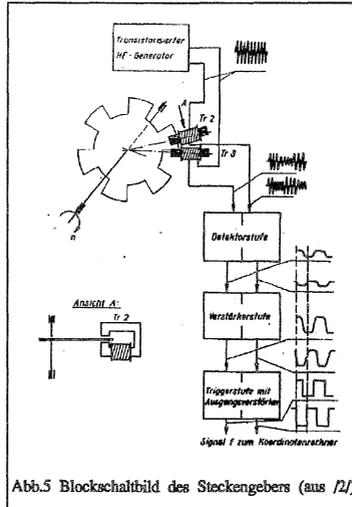
(Kompensation der Präzession) integriert. Diese erhalten ihre Ausgangsinformationen vom Steuerpult. An ihm lassen sich Breitengrad des Einsatzgebietes und Korrekturglied aus dem Feinabgleich nach dem Kontrolllauf des Koordinatenrechners einstellen.



Der Umformer ist ein Motor-Generatorblock, der eine Dreiphasenwechselspannung von 36V/400Hz erzeugt.

Abb. 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des über Tachowelle angetriebenen Streckengebers. Er liefert dem Koordinatenrechner eine Signalfrequenz (proportional der Umlauffrequenz) und eine Phasenverschiebung (Fahrtrichtung). Für Kettenfahrzeuge ist der mechanische Antrieb legitim, für unsere Anwendungen müssen modernere Lösungen untersucht werden. Es wurden Wegstreckenmessungen mit Reibrad und Peisselerrad durchgeführt. Darüber hinaus sind der Einsatz von Radarsensoren und die Verrechnung der Meßwerte der

vorhandenen Geschwindigkeitssensoren an der Lenkachse des Mähreschers zu untersuchen.



Der Koordinatenrechner hat die Aufgabe, den elementaren Steckenabschnitt  $\Delta s_i$  mit dem vom Kreiselskursgeber bereitgestellten Kurswinkel gegenüber Gitter Nord nach folgenden Gleichungen zu zerlegen

$$\Delta x_i = \Delta s_i * \cos \alpha_k$$

$$\Delta y_i = \Delta s_i * \sin \alpha_k$$

und zu den Ausgangskordinaten X und Y zu addieren. Diese kontinuierlich ausgeführten Operationen werden am Zählwerk fortlaufend angezeigt. Die Anzeigeschrittweite beträgt 1m und wird von Zählmagneten (zweispulige Elektromagnete) bestimmt. Für erste Untersuchungen wurde an den Zählmagneten eine Schnittstelle installiert, über die eine Aufzeichnung der Impulse in den Bordrechner erfolgte. Als Bordrechner verwendeten wir das von Herlitzius in /11/ beschriebene verteilte Meßwerterfassungssystem. Die Datenerfassung erfolgte in Echtzeit parallel zum Koordinatenrechner über die genormte Schnittstelle RS 485. Die Daten werden entweder über die ebenfalls am Rechner vorhandene RS 232 in den Laptop eingelesen oder auf 128-kByte-Memory-Cards gespeichert. Die Beschreibung erfolgt kontinu-

ierlich und läßt sich, zum Wechseln der Karten, rechnerintern über 32 kByte puffern. Die Memory-Cards werden extern in den PC eingele- sen. Die Datenübertragung erfolgt über eine interruptionsfähige Schnittstelle, die notwendige Datentransferrate beträgt 64 bit/s bzw. 8kByte/s. Unsere, im vergangenen Jahr getestete Konfiguration läßt 5 Betriebsstunden mit einer Memory-Card zu. Mit der vorge- stellten Version sind wir in der Lage, neben der globalen Ortung eine schlagspezifische Zuordnung durchzuführen.

Der Koordinatenrechner verfügt darüber hinaus über einen Kurswin- kelauswerter mit Grob- und Feinanzeige. An ihm wird der Anfangs- kurswinkel eingestellt. Nach Inbetriebnahme erfolgt sofort die An- zeige jeder Winkeländerung der Maschine mit einer ablesbaren Genau- igkeit von  $\pm 0,01$ , das entspricht  $\pm 0,06^\circ$ . Wir sind, wenn auch ma- nuell angesteuert, mit dem "TNA-3" in der Lage, die in 2.3 be- schriebene parallele Fahrt zur Hallenwand exakt auszuführen.

Eine weitere Baugruppe des Navigationssystems ist der für unsere Anwendungen nicht benötigte Kursanzeiger.

Das vorgestellte "TNA-3" ist ein komplettes, in sich abgeschlos- senes System, auch mit allen seinen Problemen (ungeeigneter Steckenmesser, Originalkabelsatz erforderlich, Masse ca. 40kg). Es bietet sich aber für die Untersuchung von Navigationsaufgaben im Bereich der Forschung vor allem durch die erreichbare Genauigkeit und seine Robustheit an. Für uns stellen sich folgende Aufgaben:

1. Ersatz des mechanischen Streckengebers
2. Ersatz des Koordinatenrechners durch einen moderneren Rechner mit genormter Schnittstelle sowie Datenerfassungs- und -speichersystem
3. Verknüpfung des Navigationssystems mit Ergebnissen der Korndurchsatzmessung
4. Aufbau eines Regelsystems zur automatischen Kurssteuerung.

### 3.3 Der Einsatz von maschinenfesten Beschleunigungssensoren zur Steckenmessung

Die Erfassung von Beschleunigungsvorgängen mit entsprechenden ma- schinenfesten Sensoren hat im Zusammenhang mit leistungsfähigerer Rechentechnik in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Für die

Flugzeugnavigation werden den "Shrapdownsystemen", vor allem wegen ihres Preisvorteils, Chancen eingeräumt. Die Stabilisierung der Meßachsen erfolgt weiterhin über Kreisel. Umfassende Untersuchungen wurden in Braunschweig durchgeführt und sind in /7/ und /8/ dokumentiert. Eine Einschätzung für den Einsatz in Landmaschinen kann nicht gegeben werden.

Wir gehen davon aus, daß für den Einsatz in Landfahrzeugen Beschleunigungsmessungen mit nichtkreiselstabilisierten Achsen ausreichend und deshalb zu untersuchen sind.

Als Beschleunigungsaufnehmer werden rein Ohm'sche (Dehnmessstreifen), induktive und kapazitive Sensoren verwendet. Für die Präzisionsmeßtechnik stehen eine Reihe von Sensoren zur Verfügung, die hinsichtlich ihrer Eignung für Landmaschinen als auch hinsichtlich ihrer Kosten zu untersuchen sind.

In der Industrie werden entsprechende Sensoren zum Erfassen von Lageänderungen unterschiedlichster Größenordnung eingesetzt. Sowohl die Winkeländerung an Kranauslegern (praktisch statisch) als auch Fahrzeug-Crash-Untersuchungen (Beschleunigungen bis 2000g) werden erfaßt. In der Regel werden aber nur Bewegungen in einer Koordinatenebene aufgezeichnet. Dreidimensionale Beschleunigungen mit festem Koordinatensystem wurden am Institut für Landtechnik bereits Anfang der 70'er Jahre untersucht und sind in /12/ dokumentiert. Die Übertragung der Beschleunigungen des maschinenfesten Koordinatensystems der Landmaschine in ein globales muß mit heutigen Hilfsmitteln auch on-line als lösbar angesehen werden. Entsprechende Untersuchungen befinden sich in Vorbereitung.

#### 4 Zusammenfassung

An der gegenwärtigen Führungsstellung der GPS-Ortung für Landmaschinen besteht kein Zweifel. Trägheitsnavigationssysteme zeichnen sich dagegen durch eine vollständige Unabhängigkeit und hohe Genauigkeit ohne zusätzliche Hilfsmittel aus. Über kreiselfreie Methoden sind den Landmaschinenherstellern kostengünstigere und hinreichend genaue Lösungen zur Positionsbestimmung anzubieten.

Literaturverzeichnis

- /1/ DV - 41/56 Richtkreis PAB 2a  
Ministerium für Nationale Verteidigung der DDR, Berlin 1968
- /2/ A 051/1/321 Navigationsgerät TNA-3, Beschreibung und Nutzung  
Nationale Volksarmee der DDR, O.U. 1974
- /3/ Birr, H.-D.  
Leitfaden der Navigation, Terrestrische Navigation, 5. Auflage  
transpress VEB Verlag für Verkehrswesen Berlin, 1988
- /4/ Clausing, D.J.  
Moderne Flugzeugnavigation  
Motorbuch Verlag Stuttgart, 1988
- /5/ Seewald, M.  
Navigationsgeräte der Landstreitkräfte, 2. Auflage  
Brandenburgisches Verlagshaus Berlin, 1990
- /6/ Land Vehicle Navigation 1989, Münster FRG  
Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V.  
Verlag TÜV Rheinland Köln, 1989
- /7/ Lohl, N.  
Genauigkeitsanalyse von Trägheitsnavigationssystemen  
Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982
- /8/ Niederstaßer, H.  
Ermittlung von Fehlern mechanischer Kreisel eines Navigations-  
systems mit körperfesten Sensoren aus Flugversuchen  
Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986
- /9/ Terheyde, K. , Zickwolff, G.  
Müller/Krauß - Handbuch für die Schiffsführung, 8. Auflage  
Band 1 Teil B  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983
- /10/ Navigazionnaja apparatura "TNA-3",  
Instrukzija po ekspluatazii PB 1.590.010 IE - E  
(Navigationsgerät "TNA-3", Betriebsanleitung), 1984
- /11/ Herlitzius, T. , Schütze, W.  
Experimentelle Untersuchungen am Mähdrescher unter Verwendung  
eines Multisensorregelsystems  
6. Dresdener Landtechnisches Kolloquium, Dresden 1991
- /12/ Bernhardt, G.  
Untersuchungen über das mechanische Verhalten des Bodens unter  
dem Einfluß eines um seine horizontale Achse rotierenden  
Werkzeuges  
Dissertation (unveröffentlicht), Technische Universität  
Dresden, 1972

## **Grundlagen und Anwendung von GPS und DGPS - Stand und Entwicklung, Arbeiten der DGON -**

Wolfgang Lechner  
Avionk Zentrum Braunschweig

### 1. Einführung

NAVSTAR GPS (Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System) ist ein satellitengestütztes Positionierungs-, Navigations- und Zeitverteilungs-System für die militärische und zivile Nutzung. Es wurde entwickelt, um dem Nutzer eine weltweite, präzise, wetterunabhängige Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Zeit in einem einheitlichen Referenzsystem zu ermöglichen und befindet sich derzeit im Aufbau. Mit der operationellen Verfügbarkeit des Systems wird Ende 1993 gerechnet, dem Nutzer sollen dann 21 Satelliten und 3 aktive Reserve-Satelliten zur Verfügung stehen.

Aufgrund der primär militärischen Interessen, die zur Entwicklung und zum Aufbau von NAVSTAR GPS geführt haben, besteht die Möglichkeit, für nicht autorisierte Nutzer den Zugriff auf das System zu begrenzen. Gleichwohl wird GPS für den zivilen Nutzer mit der höchstmöglichen Genauigkeit verfügbar sein, die im Einklang mit den nationalen Sicherheitsinteressen der USA liegt. Die derzeit verfolgte Politik zielt darauf ab, dem zivilen Nutzer in der operationellen Phase eine Positionierungsgenauigkeit von 100 Meter (horizontal, 2drms) zu gewährleisten. Diese Betriebsart wird als Standard Positioning Service SPS bezeichnet, die hohe Genauigkeit des Precise Positioning Service PPS von 10 Meter (horizontal, 2drms) steht nur autorisierten Nutzern zur Verfügung.

Einzelheiten zur Genauigkeit und Verfügbarkeit von GPS für den zivilen Nutzer können u.a. folgenden Dokumenten entnommen werden, die auch eine detaillierte Beschreibung von NAVSTAR GPS bieten und auf Anfrage bezogen werden können:

Titel: US Federal Radionavigation Plan  
(letzte Ausgabe 1990)

Bezug: US Department of Transportation

Research and Special Programs Administration  
DOT Navigation Working Group  
Washington DC, 20590  
U.S.A.

Titel : Technical Characteristics of the NAVSTAR GPD  
(letzte Ausgabe Juni 1991)

Bezug: Bundesminister der Verteidigung  
Ref. Rü T IV 3  
Postfach 1328  
5300 Bonn 1

## 2. Positionsbestimmung mit GPS and DGPS

Zur Berechnung der Position eines stationären oder bewegten Trägers mit Hilfe von NAVSTAR GPS bestimmt der GPS-Empfänger die Signallaufzeit zu mindestens vier Satelliten des Systems. Aus diesen Laufzeitmessungen werden dann noch Verfahren, die in der Literatur vielfach beschrieben sind, die dreidimensionalen Koordinaten des GPS-Empfängers sowie der Fehler der Empfängeruhr bestimmt. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist dabei von einer Reihe von Parametern abhängig, wobei eine Vielzahl von Fehlern zu unterscheiden ist, von denen hier nur die wichtigsten genannt werden sollen:

- Fehler in den Ephemeriden der Satelliten
- Fehler in den Satellitenuhren
- Ausbreitungsbedingte Fehler
  - + Ionosphäre
  - + Troposphäre
- Mehrwegeausbreitung
- Fehler in den Empfängeruhren
- Empfängerrauschen
- künstliche Verschlechterung der Signale
  - + Selective Availability
  - + Anti Spoofing

Betrachtet man diese Fehlerquellen im einzelnen, so stellt man fest, daß die meisten dieser Fehler für zwei verschiedene Empfänger, die nur einen geringen Abstand voneinander haben, nahezu identische Auswirkungen auf die Positionsbestimmung haben. Daraus resultiert die Idee, einen GPS Empfänger auf einen mit genügender Genauigkeit vermessenen Punkt zu stellen, die Resultate der Positionsbestimmung mit

den "Sollwerten" zu vergleichen und dann aus den Differenzen nach bestimmten Verfahren "Korrekturwerte" für die Verbesserung der Position eines beweglichen Empfängers zu errechnen.

Dieses Verfahren wird, realisiert in einer Vielzahl von anwendungsorientierten Varianten, als Differential GPS bezeichnet; die erreichbaren Genauigkeiten der damit möglichen "relativen Positionierung" (den "beweglichen" Nutzer relativ zur "festen" Referenzstation) liegen zwischen ca. 10 m bei einfachen Techniken und Entfernungen zur Referenzstation von bis zu 1000 km bis hin zu einigen Millimetern mit sehr aufwendigen Verfahren des Postprocessing in der Geodäsie.

Gemeinsam haben alle DGPS Verfahren, daß die Meßinformationen der Referenzstation in geeigneter Form dem beweglichen Nutzer zur Verfügung stehen müssen, d.h. hier muß eine geeignete Datenübertragung gefunden werden, die für den Einzelfall der Anwendung auszulegen ist. Reichweite, mögliche Datenrate (und damit erreichbare Genauigkeit) etc. müssen dabei berücksichtigt werden.

Die Anwendung für derartige DGPS Verfahren sind nahezu unbegrenzt und es würde den Rahmen dieses Beitrages sprengen, hier einen Überblick geben zu wollen. Es sei deshalb auf die Literatur, insbesondere auf die Proceedings des DGON Workshops und der DGPS '91 verwiesen. An dieser Stelle sei nur erwähnt, daß mit Hilfe eines auf DGPS basierenden Systems im Juli 1989 durch das Institut für Flugführung der TU Braunschweig die weltweit erste vollautomatische Landung eines Flugzeuges demonstriert wurde, sicherlich eine der eindrucksvollsten Realisierungen dieser Technik.

### 3. DGPS Aktivitäten in der DGON

Im Jahre 1989 wurde in der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) der Fachausschuß "Weltraumtechnik" als übergreifende Institution über die klassischen Themenbereiche Landverkehr, Luftfahrt und Schifffahrt gegründet mit dem Ziel, die neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Satellitennavigation zu berücksichtigen und die interdisziplinäre Rolle dieser Technik zu unterstreichen.

Einer der wichtigsten Aspekte, der von Anfang an in diesem Forum diskutiert wurde, war die Anwendung von Differentialtechniken in der Satellitennavigation, um die Genauigkeit in der Positionierung zu steigern. Das große Nutzerinteresse, das in den nationalen Veranstaltungen der DGON deutlich wurde, führte dann zur Idee, auf internationaler Basis ein Expertentreffen zu organisieren, um diese relativ neue Technik zu präsentieren, zu diskutieren und zu demonstrieren. Dazu wurde durch die DGON eine neue Reihe internationaler Symposien ins Leben gerufen; die unter dem Titel "First International Symposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System DGPS '91" im September 1991 in Braunschweig ihren Anfang fand. Mehr als 370 Teilnehmer aus 24 Ländern unterstrichen dabei die weltweite Bedeutung der DGPS Verfahren in der Navigation.

Eine wesentliche Bereicherung war durch die starke Teilnahme von Wissenschaftlern aus der (damals noch) UdSSR gegeben; durch diese Teilnahme wurde das sowjetische Gegenstück zu GPS, das Global Navigation Satellite System GLONASS intensiv mit in die Diskussionen einbezogen. Um diesem Trend Rechnung zu tragen, hat es sich immer mehr eingebürgert, nicht mehr nur von GPS und GLONASS, sondern allgemeiner von Global Navigation Satellite Systems GNSS zu sprechen. Demzufolge heißt auch die Nachfolgeveranstaltung, zu der ganz spontan die Kollegen des Niederländischen Institutes für Navigation eingeladen haben, DSNS '93 (Differential Applications of Satellite Navigation Systems); DSNS '93 wird vom 30.03. - 02.04.1993 in Amsterdam stattfinden.

Neben diesen fachlich-demonstrativen Elementen des Symposiums verfolgte der Fachausschuß "Weltraumtechnik" der DGON noch ein weiteres Ziel. Dieses leitete sich aus Aktivitäten ab, die der DGON weltweit eine gewisse Vorreiterrolle gaben. Nachdem während des DGPS Workshops im November 1990 von verschiedenen Nutzern die Forderung nach einer Standardisierung von präzisen DGPS Verfahren erhoben wurde, gründete der Fachausschuß "Weltraumtechnik" einen speziellen Unterausschuß, der sich mit dieser Thematik befaßte. Wesentliche Ziele der mehr als 35 beteiligten Vertreter aus der Industrie, Wissenschaft und Verwaltung, die fast alle Anwendungsgebiete vertreten konnten (z.B. Luft- und Raumfahrt, Land- und Schiffsanwendungen, Landsvermessung) waren dabei:

- Diskussion eines Konzeptes für einen DGPS Service in Deutschland für Anwendungen mit Genauigkeitsforderungen besser als 5 m, d.h. unter Nutzung der Trägerphaseninformationen
- Erarbeitung von Empfehlungen für geeignete Hardware-/Software-Kombinationen für entsprechende Referenzstationen
- Erarbeitung von Empfehlungen für geeignete Datenformate zur Datenübertragung
- Erarbeitung von Empfehlungen für geeignete Datenübertragungswege
- Festlegung des notwendigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs
- Initiierung und Unterstützung der internationalen Koordinierung und Standardisierung
- Entwicklung eines funktionsfähigen Prototypsystems und Demonstration während der DGPS '91.

Von diesen Punkten, die z. Zt. noch nicht alle vollständig bearbeitet sind, waren insbesondere die Fragen nach internationaler Standardisierung des Datenformates frühzeitig zu klären, da hier Auswirkungen auf die Hersteller von GPS Empfängern und Software-Entwicklern zu erwarten waren. DGPS '91 war somit eine gute Gelegenheit, die Arbeiten der DGON zu präsentieren und internationale Anstrengungen auf diesem Gebiet zu forcieren.

Als Ergebnis der Diskussionen kam man überein, daß RTCM (Radiotechnical Commission for Maritime Services) und RTCA (Radiotechnical Commission for Aeronautics), weltweit anerkannte Organisationen auf diesem Fachgebiet, eine gemeinsame Arbeitsgruppe zu dieser Thematik gründen sollten, die auf der Basis der Vorschläge, die in der DGON erarbeitet wurden, eine Empfehlung ausarbeiten sollte. Diese Arbeitsgruppe hat inzwischen ihre Arbeit aufgenommen und es ist beabsichtigt, bis Ende März 1992 ein vorläufiges Ergebnis zu präsentieren.

#### 4. Literatur

- US Federal Radionavigation Plan (letzte Ausgabe 1990), Bezug s. Einleitung
- Technical Characteristics of the NAVSTAR GPS (letzte Ausgabe Juni 1991), Bezug s. Einleitung
- (Near) Realtime Differential GPS Anwendungen, Proceedings DGON Workshop 06./07.11.1990, Hamburg, Bezug über DGON
- First International Symposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System, Proceedings DGPS '91, Bezug über DGON



## **Absehbare Entwicklungen bei GPS und rechtliche Voraussetzungen**

Bernd Hoßfeld, Systemtechnik Nord GmbH

GPS ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium entwickeltes, weltweit nutzbares Navigationssystem, das für eine Reihe von Anwendungen künftig als primäres Navigationssystem vorgesehen ist. Im Endausbau wird das System aus 24 Satelliten bestehen (21 + 3 Reserve). Das US-Verteidigungsministerium wird das System für den Betrieb freigeben, sobald 21 Satelliten verfügbar sind. Dies wird für das Jahr 1993 erwartet. Bis dahin, also auch in der heutigen Situation, werden alle Anwender darauf hingewiesen, daß sich das System im Ausbau befindet und daß die Verfügbarkeit und die Genauigkeit jederzeit ohne Vorwarnung vom Betreiber beeinflußt und geändert werden kann. Daraus folgt, daß alle Anwender auf ihr eigenes Risiko dieses System nutzen können, solange es noch nicht betriebsbereit erklärt wurde. Künftig, nach der Inbetriebnahme, werden zwei Dienste angeboten:

SPS (=Standard Positioning Service) ist ein Positions- und Zeitreferenzdienst, der allen Anwendern ständig weltweit und ohne Entgelt zur Verfügung stehen wird. SPS wird über die GPS L1-Frequenz den sogenannten Coars Aquisition (C/A) Code und Navigationsdaten aussenden. Es ist vorgesehen, mit 95 % Wahrscheinlichkeit eine Genauigkeit von 300 m verfügbar zu haben. Die L1-Frequenz enthält auch Precision (P) Code-Information, die während des Systemaufbaues für alle Anwender vorübergehend nutzbar sind. Jedoch ist es nicht vorgesehen, diesen Code der Allgemeinheit zugänglich zu machen, sobald GPS operationell wird.

PPS (Precise Positioning Service) ist ein hochgenauer Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitreferenzdienst, der ständig und weltweit nur solchen Nutzern zur Verfügung steht, die dafür vom US-Verteidigungsministerium autorisiert sind. PPS ist primär für die militärische Nutzung vorgesehen und wird über die GPS L1- und L2-Frequenzen angeboten. Die Signale werden verschlüsselt ausgesendet, so daß nur besonders ermächtigte Anwender von diesem Dienst Gebrauch machen können. In begrenztem Umfang können auch zivile Nutzer (USA und Verbündete) ermächtigt werden, wenn es im Interesse der US-Regierung liegt, besondere Sicherheitsanforderungen vom Anwender erfüllt werden, und es keine andere Alternative zum PPS gibt.

Es ist vorgesehen, diese Dienste ab 1993 mindestens für 10 Jahre so wie beschrieben ständig, weltweit und kostenfrei anzubieten.

Als zweites Satellitennavigationssystem wird zur Zeit das GLONASS-System in Rußland aufgebaut. Es ist für die zivile Nutzung der Land-, Luft- und Seenavigation vorgesehen und besteht, wie das GPS-System aus 24 Satelliten (21 + 3 Reserve), die auf drei orbitalen Ebenen mit je 8 Satelliten positioniert sind und in einer Höhe von 19.100 km (ca. 1.000 km niedriger als GPS) mit einer Periode von 11 Stunden 15 Minuten umlaufen. Das System wird ständig weltweit verfügbar sein.

Die im 1,6 GHz-Bereich ausgesendeten Nachrichten enthalten Informationen über die Ephemeridenpositionen, Korrekturdaten zur GLONASS-Zeit und Zustandsdaten über die Satelliten. Die folgenden Genauigkeiten sind gewährleistet:

- \* 100 m mit 95 % Wahrscheinlichkeit in der Ebene
- \* 150 m mit 95 % Wahrscheinlichkeit in der Höhe
- \* 15 cm/sec. mit 95 % Wahrscheinlichkeit für die Geschwindigkeit
- \* 1 Mikrosek. Zeitgenauigkeit

Zur Zeit arbeitet GLONASS mit 15 operativen Satelliten. Der Endausbau soll bis 1995 erreicht werden. Es soll kostenfrei und ohne Einschränkungen für die Nutzer auf mindestens 15 Jahre verfügbar sein.

Zur Erläuterung der erreichbaren GLONASS- und GPS-Genauigkeiten sei im folgenden auf die wesentlichen Gesichtspunkte der satellitengestützten Ordnung eingegangen.

Mit Hilfe hochgenauer Uhren sowohl in den Satelliten, wie auch in den Empfängern, wird aus den Laufzeitunterschieden der empfangenen Signale die Entfernung zwischen dem Empfänger und den Satelliten, die auf ihren Bahnen jederzeit und überall bekannt sind, die Position des Empfängers ermittelt. Da sich die Satellitenpositionen aufgrund von Gravitationseinflüssen verändern können, werden alle Satelliten regelmäßig von Bodenkontrollstationen überwacht und gegebenenfalls in ihrer Bahn korrigiert. Ebenso werden aktuelle Positionsdaten an die Satelliten übertragen und von dort an die GPS-Empfänger weitergegeben. Weitere Einflußfaktoren auf die Ortungsgenauigkeit liegen in der Funkübertragung durch die Ionosphären- und Atmosphärenbeeinflussung, in der geometrischen Position der Satelliten, aus deren Signalen der Empfänger seine Position berechnet (je größer der Winkel zwischen den Satelliten, desto höher die Genauigkeit) und aus der Betriebsart des GPS-Systems. Diese, Selectiv Availability (S/A) genannt, kann vom Betreiber des GPS-Systems, dem US-Verteidigungsministerium, ein- und ausgeschaltet werden, um die Ergebnisse der GPS-Ortung künstlich zu verfälschen. Weitere Fehlerquellen können in den Ungenauigkeiten der Satellitenatomuhren liegen, den numerischen Fehlern (Rundungsfehlern) bei der Positionsberechnung und anderen. Die Größenordnung der einzelnen Fehlerarten sowie die zu erreichende Gesamtgenauigkeit sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die für die zivile Nutzung eingeschränkte GPS-Genauigkeit kann durch das sog. Differential-GPS (DGPS) deutlich verbessert werden. Wird an einem Punkt, dessen Position hinreichend genau vermessen ist, ein GPS-Referenzempfänger aufgestellt, so lassen sich aus den Differenzen zwischen bekannter und vom Empfänger errechneter Position Korrekturdaten ermitteln, mit deren Hilfe alle im Umfeld der Referenzstation arbeitenden GPS-Empfänger korrigiert werden können (Abb. 1). Dieses DGPS-Verfahren verbessert die o.a. Fehler je nach Art und Umfang der Korrekturverfahren auf den Dezimeterbereich (aufwendig, z.B. für Fluganwendungen) oder aber auf 5 - 10 m (einfach, für Land- und Seeanwendungen).

Tabelle 1: GPS-Genauigkeiten

Uhrenfehler	0,6 m	
Bahnfehler	0,6 m	
Empfängerfehler	1,2 m	
atm. /ionosph. Fehler	3,6 m	
S/A Fehler	7,5 m	
Summe quadr. Mittelwert	ohne S/A 4,5 m	mit S/A 9,0 m
Geometrischer Fehler		
GDOP 4 - 6 (gut)	18 - 27 m	36 - 54 m
GDOP 10 - 12 (schlecht)	45 - 54 m	90 - 118 m

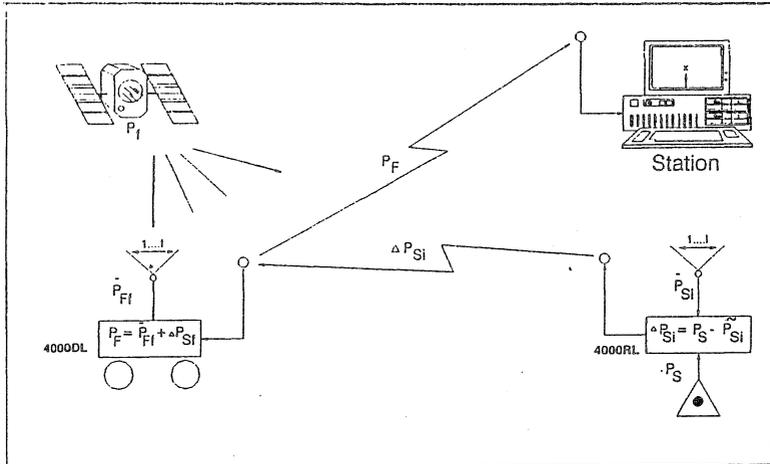


Abbildung 1: Differenzielles GPS

Durch die Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation wurden im Jahr 1991 Untersuchungen initiiert, die das gesamte Spektrum der DGPS-Technologie abdecken und sich besonders mit der Standardisierung der Übertragungsverfahren befassen. So ist daran gedacht, Referenzstationen einzurichten, die etwa im Umkreis von 100 km Korrekturdaten aussenden und in einem möglichst breiten Anwendungsspektrum genutzt werden sollen. Noch völlig offen sind aber alle Fragen über den Betrieb, die Kosten und möglichen Entgelte eines solchen Dienstes für die Allgemeinheit.

Im Luftfahrt- und Seefahrtsbereich ist davon auszugehen, daß dieser Dienst von den zuständigen Behörden eingerichtet und angeboten wird. Bei den Landverkehrsanwendungen ist dagegen aufgrund der geringen Anforderungen und weitaus einfacheren Technik damit zu rechnen, daß viele Betreiber, wie etwa Feuerwehren und Rettungsdienste, ihre eigenen Referenzstationen einrichten und unabhängig von anderen Nutzern betreiben werden. In allen Fällen des Flottenmanagements, bei dem es nicht um die hochgenaue Fahrzeugnavigation sondern hauptsächlich um die Positionsdarstellung in einer Zentrale geht, kann nämlich ein vereinfachtes DGPS-Verfahren angewendet werden (Abb. 2).

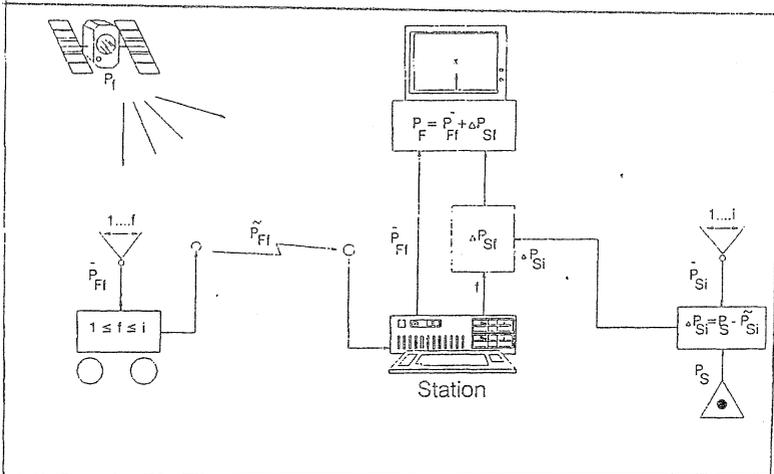


Abbildung 2: Vereinfachtes DGPS-Verfahren

Während also die Betreiber der satellitengestützten Ortungssysteme die Funktionen im vorgegebenen Genauigkeitsbereich für jede beliebige Anwendung zur Verfügung stellen, bleibt es allein dem Anwender überlassen, Vorkehrungen gegen die möglichen Risiken, insbesondere im Hinblick auf die Verlässlichkeit der Ortungsgenauigkeit zu treffen.

Dies trifft einige Nutzergruppen weitaus stärker als andere, insbesondere dann, wenn von einem nicht zuverlässigen Navigationssystem Gefahr für Leib und Leben ausgehen kann. Je genauer eine Ortung durchgeführt wird, desto größer ist u.U. die Abhängigkeit von der Verlässlichkeit dieser Technologie. So ist sicherlich im Bereich der Luftfahrt die höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit dann gefordert, wenn GPS im Bereich der Landeanflugsteuerung verwendet wird. Weitaus geringer sind dagegen die Anforderungen bei der Navigation auf Interkontinentalflügen.

Ähnliches gilt für die Seefahrt: Die Navigation in engen Küstenrevieren, Hafeneinfahrten oder Binnengewässern setzt verlässliche Genauigkeiten im 5 - 10 m Bereich voraus. Außerhalb dieser Bereiche ist die Standardgenauigkeit von GPS oder die der herkömmlichen Radionavigationssysteme wie Decca oder Loran C völlig ausreichend.

Auch bei der Landnavigation gibt es unterschiedliche Anforderungen. Die überregionalen Ferntransporte etwa für das LKW-Flottenmanagement können mit der GPS-Standardgenauigkeit von 100 bis 300 m völlig ausreichend abgewickelt werden. Dagegen liegen die Anforderungen im regionalen Bereich, ebenso wie in der Landwirtschaft im 5 - 10 m Bereich. Diese Anforderungen sind mit herkömmlichen DGPS-Verfahren problemlos zu gewährleisten, wobei auf die geodätischen Erfordernisse, die bei der Katastervermessung im cm Bereich oder besser liegen, hier nicht näher eingegangen werden soll.

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß für alle Bereiche der überregionalen Fahrzeugnavigation an Land, in der Luft oder zur See, die GPS-Standardgenauigkeit völlig ausreicht. Alle höheren Anforderungen können mit Hilfe zusätzlicher Technologie wie DGPS erfüllt werden, wobei zusätzlich zur Verlässlichkeit des GPS-Systems auch noch die Verlässlichkeit der DGPS-Referenzstation in die Erörterungen einbezogen werden muß.

Im Bereich des Luft- und Seeverkehrs werden GPS und GLONASS auch künftig nicht als einziges Navigationssystem genutzt werden, sondern immer in Verbindung mit redundanten Systemen, die unabhängig von den Satelliten betrieben werden und somit eine Rückfallposition und zusätzliche Sicherheit darstellen. Es ist sicherlich auch möglich, daß GPS und GLONASS gegenseitig als Backup-Systeme genutzt werden können. Darauf deutet bereits die Entwicklung von kombinierten Empfängern hin, die sowohl GPS- als auch GLONASS-Signale auswerten und dem Anwender zur Verfügung stellen.

Wie stellen sich nun die Aussichten für die künftige Nutzung der satellitengestützten Ortung- und Navigation dar?

Die Betreiber von GPS und GLONASS werden die Nutzung der Satellitensignale freigeben und innerhalb der bekannten Genauigkeitsgrenzen sicherstellen. Darüber hinaus ist es dem Anwender überlassen, mögliche Risiken durch die Einbindung redundanter Systeme zu verringern und die Genauigkeiten, wo erforderlich, mit Hilfe zusätzlicher Technologien zu steigern. Noch gibt es keine Regelungen für den Betrieb und die Einrichtung von DGPS-Referenzdiensten. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Betreiber von DGPS-Referenzstationen für die Funktion ihres Systems in ähnlicher Weise garantieren müssen, wie heute bereits die Betreiber der herkömmlichen Radionavigationssysteme Decca und Loran C. Letztendlich wird aber die Entscheidung und damit auch die Verantwortung immer bei dem Führer eines Fahrzeugs liegen, ob und inwieweit er sich auf die ihm zur Verfügung stehenden Technologien verläßt oder nicht. Andererseits wird gerade auch die Verlässlichkeit dieser Systeme, dies gilt ganz besonders für GPS und GLONASS, über die Akzeptanz der neuen Technologien bei den Anwendern entscheiden.



## Differentielles GPS, der Schlüssel zur hochgenauen Positionsbestimmung.

GLOBALOS C 2000 die DGPS Systemlösung der SEL-ALCATEL  
Jürgen Straub, Manager GPS Applications

Durch die neue Politik des GPS Systembetreibers, des amerikanischen Verteidigungsministeriums (US Department of Defense, DoD), wird die im Standard Positioning Service (SPS) den zivilen Nutzern ermöglichte Positionsgenauigkeit von ca. 30 m (2D RMS), mittels Bahndatenverschlechterung (SA, Selective Availability) auf ca. 100 m (2D RMS) vermindert. Diese Signaldegradierung erfordert den Einsatz von differentiellen GPS (DGPS) Technologien um wieder Positionsgenauigkeiten, im Bereich des SPS ohne SA, und besser (<10m, 2D RMS) zu realisieren.

Die hauptsächlich in geodätischen Anwendungen verbreitete Zweifrequenztechnologie, unter Verwendung des P-Code (Precision Code), kann in absehbarer Zukunft durch Aktivierung des A-S (Anti-Spoofing, Ersetzung des P-Codes durch den Y-Code) von den zivilen Anwendern nicht mehr genutzt werden.

Die Nutzung des "Precise Positioning Service" (PPS) ist vom GPS Systembetreiber DoD nur für militärische Anwendungen freigegeben und durch den Einsatz von Kryptoverfahren abgesichert.

DGPS dagegen ist eine im Rahmen der DoD Politik akzeptierte Technologie zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit im SPS für die zivilen Nutzer des GPS Systemes.

Differentielle GPS Verfahren werden von nahezu allen Nutzergruppen im Bereich der Land-, See-, und Luftanwendungen gefordert und angewandt, um die angestrebten Positionsgenauigkeiten zu erreichen.

Die differentiellen GPS Verfahren lassen sich in die beiden Hauptkategorien

	Echtzeit-Lösung	(Realtime)
und	nachbearbeitete Lösung	(Post-Processing)

einteilen.

Zur Erreichung dieser Genauigkeitsklassen sind unterschiedliche Verfahren und Datenformate entwickelt worden. Die bereits eingeführten Verfahren und zukünftigen Lösungsansätze werden im Vortrag erläutert.

Marktanalysen haben ergeben, daß die von den Anwendern geforderten Positionsgenauigkeiten folgendermaßen katalogisiert werden können:

< 25m	2D RMS
< 10m	2D RMS
< 1m	2D RMS

SEL-ALCATEL bietet mit den GLOBUS Core Modulen und der modularen Familie von DGPS-Referenzstationen eine komplette Systemlösung für eine breite Palette von DGPS-Anwendungen an.

Das modulare Konzept der Referenzstationen und der Nutzerseite ("Moving" oder "Roving Units") ermöglicht es zum Beispiel, neue DGPS-Datenformate und Verfahren durch reine Softwaremodifikationen in der Systemlösung zu realisieren.

Die DGPS-Datenschnittstellen der GLOBUS Core Module, als auch der Referenzstationen entsprechen internationalen Standards und erlauben dem Nutzer die problemlose Einbindung in die für Echtzeitanwendung benötigte Telemetrie-einrichtung.

Das Gesamtsystem wird ergänzt durch eine Reihe von Zubehör, das von Installations- und Anzeigeeinrichtungen, Datenregistrierungs- und Funktionsüberwachungs-Hardware und Software, bis hin zu den für die Datenübertragung erforderlichen Modems reicht, so daß eine komplette Systemlösung aus einer Hand zur Verfügung steht.

## Möglichkeiten der Kooperation Raumfahrt/Landwirtschaft

Ph. Hartl  
Universität Stuttgart

### 1. Einleitung

Wenn ich in diesem Vortrag kooperative Möglichkeiten in den Forschungs- und Entwicklungsbereichen der Raumfahrt und der Landwirtschaft behandeln soll, dann kann dies nur unter Vorbehalt geschehen: Ich kann hier zwar meine persönliche Einschätzung wiedergeben, handle aber weder im Auftrag der DARA noch einer anderen Raumfahrtorganisation, wie etwa der ESA. Ich bin auch kein Fachmann aus dem Bereich "Landwirtschaft", sondern für Gebiete aus dem Bereich Raumfahrttechnik und Navigation an der Universität in Lehre und Forschung tätig.

Dennoch erschien der Veranstaltungsleitung das Thema wichtig genug, daß sie es selbst unter diesen Einschränkungen in das Programm aufnehmen und von mir behandelt wissen wollte. Ich habe mich dazu bereit erklärt, in der Hoffnung, damit zur Intensivierung der Kontakte zwischen den zuständigen Partnern ermuntern zu können.

### 2. Zuständigkeit der DARA

Die Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten GmbH (DARA) koordiniert die gesamten Raumfahrtaktivitäten des Bundes und vertritt die deutschen Raumfahrtinteressen zentral im internationalen Bereich. Sie ist für die Planung der deutschen Beteiligung an internationalen Programmen und Projekten, ferner für die Planung nationaler Vorhaben, sowie für die Ausarbeitung von Empfehlungen, Analysen und Projektvorschlägen in technologischer, ökonomischer und finanzieller Hinsicht zuständig. Insoweit die Landwirtschaft die Möglichkeiten der Raumfahrt für ihre Belange in Forschung, Entwicklung, Betrieb und Administration nutzen kann und will ist die DARA für sie daher ein wichtiger Partner, sowohl was die nationalen als auch die EG- und die internationalen Fragen und Probleme betrifft. Im "International Space Year 1992 (ISY)" gäbe es sicherlich viele Gelegenheiten sich wechselseitig die eigenen relevanten Probleme vorzustellen und die Chancen und Möglichkeiten einer Problemlösung durch Anwendung von Methoden der anderen Seite zu diskutieren, um gemeinsame Programmziele zu entwickeln. Dabei spreche ich durchaus von der "Wechselseitigkeit", weil sicherlich manche "Probleme" der einen Seite für die andere Seite gar keine wären und manche Lösungen auch durch Kombinationen von Verfahren und Kenntnissen relativ einfach zu realisieren wären.

Die DARA ist, wie alle anderen Raumfahrtorganisationen, bemüht, im Jahre 1992, also 500 Jahre nach Entdeckung Amerikas, unbekannte Nutzungsbereiche zu entdecken und neue Wege zu gehen. Die Raumfahrtorganisationen beginnen daher, intensiver ihre eigenen Arbeiten vorzustellen und nach mehr Partnerschaft mit den Nutzern Ausschau zu halten. Ich bin sehr optimistisch, daß verschiedenste neue Ansätze für

Forschung, Entwicklung und Anwendung auf diese Weise gefunden werden. So hatte wohl kaum jemand vor einigen Jahren an die Möglichkeiten der Anwendung von satellitengestützter Navigation für die Landwirtschaft gedacht, geschweige denn etwa deren Bezug zu der Aufgabe gesehen, damit deren Ökologieprobleme anzugehen. Und doch ist die heutige Veranstaltung ein Demonstrationsbeispiel hierfür.

### 3. Ziele der DARA

Erklärte Ziele der DARA sind u.a. die Realisierung von Vorhaben, die

- der Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse,
- der Lösung von Umweltfragen,
- der Verbesserung der Infrastruktur über weltraumgestützte Telekommunikation, Ortung und Navigation und
- der Steigerung der Leistungsfähigkeit der deutschen Wirtschaft dienen können.

Die Nutzungsmöglichkeiten der Raumfahrt für die Belange der Landwirtschaft sind nur indirekt angesprochen. Entsprechende F&E-Vorhaben werden aber von der DARA gefördert, bisher insbesondere in der Fernerkundung. Die Förderung von Vorhaben im Navigationsbereich mit landwirtschaftlichem Bezug ist derzeit zumindest im Gespräch. M.E. sollte dafür aber besonders auch die Europäische Gemeinschaft Interesse zeigen und Fördermittel bereitstellen können. Dies wäre sicherlich auch im Sinne der DARA und der ESA: Die Raumfahrtorganisationen versuchen, die Technologien und Satellitendienste bereitzustellen und erwarten, daß die Förderorganisationen der "Nutzer" ihrerseits zumindest z.T. auch Mittel für die partnerschaftliche Zusammenarbeit für ihre eigene Klientel einsetzen. In dieser Beziehung ist sicherlich noch vieles offen. Die Raumfahrtorganisationen müssen zur Klärung dieses "Schnittstellenproblems" noch aktiver mit den Nutzerorganisationen ins Gespräch kommen.

### 4. Gemeinsamkeiten

Motivationen für den Ausbau der Zusammenarbeit gibt es viele. Ich möchte im folgenden nur ganz kurz einen Aspekt hervorheben. Die Raumfahrttechnik und die Landwirtschaft haben eines gemeinsam: Sie sind auf Fördermittel des Staates angewiesen und stehen daher auch besonders im Blickfeld der Politik und der öffentlichen Kritik. Es besteht für beide Bereiche fortwährend der Bedarf den Nutzen der Förderung öffentlich nachzuweisen, obwohl (fast) jedem Kritiker deutlich sein dürfte, daß ein Land wie die Bundesrepublik Deutschland weder auf die Landwirtschaft ganz verzichten kann, um eine gewisse Autonomie beizubehalten und die Pflege unserer Kulturlandschaft zu gewährleisten, noch als Industriestaat auf die Fortentwicklung und Nutzung der Hochtechnologie, in der die Raumfahrt zweifellos eine Spitzenstellung einnimmt. Auch die Tatsache, daß in Hinblick auf die Konkurrenz die technologische Fortentwicklung erforderlich ist, aber mangels "Profit" nicht ohne öffentliche Förderung für beide Bereiche geschehen kann, dürfte ebenfalls für viele einsichtig sein.

Es ist daher weniger eine Frage, ob gefördert werden sollte, sondern in welchem

Umfang und mit welcher Zielsetzung. Die "Kommerzialisierung" steht ebenfalls dabei zur Diskussion. Wenn man als eine "öffentliche Aufgabe" die Realisierung der politischen Ziele, von denen im folgenden die Rede ist, anerkennt, dann hätte man eine Basis, von der aus Raumfahrt und Landwirtschaft ein Programm der Zusammenarbeit definieren könnten.

#### 5. Parteiübergreifende politische Ziele

Politische Ziele im hier angesprochenen Sinne müssen natürlich parteiübergreifend sein. Dazu gehören weltpolitisch gesehen Themen wie

- Sicherheit, die ja nur gewährleistet werden kann, wenn die sozialen Unterschiede weltweit nicht allzu extrem sind,
- Welternährung, die langfristig in Hinblick auf das Bevölkerungswachstum ein erhebliches Problem darstellt und natürlich einerseits nur dann einer Lösung zugeführt werden kann, wenn dieses gestoppt wird, was sicherlich primär eine Frage der Bildung, der Religion und des Wohlstandes sein dürfte. Es müssen aber auch die agrarbezogenen Aufgaben, etwa der Ertragssteigerung, der Erschließung neuer Gebiete für die Feldwirtschaft und die Beweidung etc. intensiv in den Gebieten der Entwicklungsländer und des früheren Ostblocks, sowie die Methoden der effektiven Produkterzeugung und -ernte fortentwickelt werden.
- Entwicklungshilfe mit dem Ziel, den bedürftigen Völkern zu helfen, daß sie langfristig auf eigenständig ihre Existenz sichern können,
- Globaler Umweltschutz und
- Eindämmung des Drogenproblems.

Im europäischen und nationalen Rahmen, kommen noch Themen der

- Arbeitsplatzsicherung
- Sozialer Wohlstand
- Lebensqualität
- Infrastrukturverbesserung
- Regionaler Umweltschutz
- etc. hinzu.

In diesem Rahmenkatalog sind praktisch durchgehend landwirtschaftliche Aspekte angesprochen, aber auch die Unterstützungsmöglichkeiten der Raumfahrtstechniken bei der Problemlösung.

## 6. Landwirtschaft

Die globale Aufgabe der Landwirtschaft besteht darin, die Welternährung angesichts des enormen Bevölkerungsanstiegs zu sichern. Es muß daher der langfristige Bedarf ermittelt und durch geeignete Vorsorgemaßnahmen und Entwicklungen gedeckt werden. Zwar gibt es derzeit noch Überkapazitäten. Es stehen daher soziale Probleme der in der Landwirtschaft Beschäftigten und Kosten für die Lagerhaltung im Vordergrund, wenn man einmal von den regionalen Hungersnöten und Verteilungsproblemen absieht. Um aber die Reserven für die langfristigen Probleme rechtzeitig zu mobilisieren bedarf es der objektiven, flächendeckenden, globalen, landwirtschaftsrelevanten Datenerfassung, wie sie die Fernerkundung wenigstens z.T. schon heute, allerdings nur im Ansatz, bieten kann. Klimatische, boden-, wasser-, und bevölkerungsbedingte Probleme und Chancen sind noch nicht genügend ausgelotet.

Ferner bedarf es der Fortentwicklung landwirtschaftlicher Techniken für die speziellen Belange der Entwicklungsländer und der früheren Ostblockländer, wobei auch die Möglichkeiten der satellitengestützten Kommunikation, Navigation und Fernerkundung genutzt werden müssen. Auch der mangelnde Ausbildungsstand der Bevölkerung in den heute verfügbaren Techniken und der Infrastruktur spielt hier eine wichtige Rolle. Die Möglichkeiten der Schulung der Bevölkerung dürften erhebliche Probleme aufwerfen. Ohne näher darauf einzugehen, möchte ich behaupten, daß in der Kooperation Raumfahrt (Fernerkundung, Kommunikation, Navigation), Informatik, Landwirtschaft, sowie Geo- und Geisteswissenschaften und Industrie völlig neue und effiziente Entwicklungen möglich wären und neue Berufssparten entstehen könnten, die sich auch von den heutigen Berufen der Entwicklungshilfe erheblich unterscheiden. Auf die besonderen Aspekte der Umwelt- und Drogenanbauproblematik in diesen Regionen möchte ich hier nicht eingehen, obwohl ich glaube, daß auch in dieser Hinsicht die Kooperation Landwirtschaft, Raumfahrt und anderer Fachdisziplinen eine wichtige Rolle spielen könnte.

Auf den ersten Blick sind die Aufgaben in Europa völlig anders. Die hiesige Überproduktion führt bekanntlich in der EG zu Preis- und Kostenverzerrungen und zu erheblichen wirtschaftlichen Problemen einerseits und zu Existenzsorgen bei den Bauern andererseits. Neue Wege werden bekanntlich nun gegangen, um die sozialen Härten, die ökonomischen und ökologischen Konflikte zu mindern. Es sei auf die Flächenstilllegung hingewiesen. Der Anbau der Ölfrüchte wird z.B. nicht mehr ertragsmäßig sondern flächenmäßig subventioniert, etc. Die Kontrolle, um einen Mißbrauch der Subvention zu verhindern, kann rationell und objektiv eigentlich nur mithilfe der Satellitentechniken geschehen: Mit Fernerkundung und längerfristig durch zusätzliche satellitengestützte Methoden der Navigation läßt sich eine Kontrolle durchführen, die sicherstellt, daß die für die Subvention angemeldeten Flächen tatsächlich nicht trotzdem für ertragsreichen Anbau weiter Verwendung finden.

Aber nicht nur bei der Kontrolle, auch in vielen anderen Bereichen kann die Fernerkundung Hilfe bieten. Darauf einzugehen verbietet die Zeit hier. Auf die Möglichkeiten der Navigation brauche ich nicht einzugehen, da die Tagung in einer Vielzahl von Vorträgen diesem Thema gewidmet ist: Der Messung der individuellen Eigenschaften eines Schlages, der Bodenvariationen, der Hangneigung, der

Sonnenbestrahlung, des Mikroklimas, der Bewässerung, des Schädlingsbefalls, der Unkrautdichte, etc. Alle diese Daten führen letztlich zur Erstellung eines landwirtschaftlichen Bodeninformationssystems.

Ein solches System kann nun wiederum mit Fernerkundungsdaten unterlegt werden, sodaß die bildhaften Realverhältnisse als Funktion der Zeit sichtbar werden. Die Fernerkundung wird ihrerseits wiederum davon profitieren und sehr viel exaktere Aussagen liefern können, wenn auf diese präzisen Daten des geocodierten Informationssystems zurückgegriffen werden kann.

Für die Entwicklungsländer und auch für die großen Flächen des Ostens besteht die Möglichkeit der Erstellung eines solchen Systems eigentlich nur mit Hilfe der Raumfahrt. Letztlich könnte damit ein abgewandeltes System der Feldbearbeitung von Interesse werden, bei dem die automatische Fahrzeugsteuerung und Feldbearbeitung Realität wird. Neue Fahrzeug- und Maschinentechniken wären sicherlich nötig. Auch "Naherkundungsverfahren" auf der Basis optischer und Mikrowellensensoren könnten so erforderlich und entwickelt werden. Solche Maschinen könnten aber auch einer koordinierten und effizienteren Ausnutzung zugeführt werden, würde man die Navigation und Kommunikation via Satellit nutzen.

Im Falle einer Anmietung des Fahrzeugparks wäre auch ein Nachweis über die Größe der tatsächlich bearbeiteten Fläche durch die Streckenregistrierung möglich. Es ließe sich ein objektives Verfahren der Kostenberechnung für die Maschinenbenutzung, aber auch ein Nachweisverfahren für die Aktivitäten des Bearbeiters ableiten (wann, wo, mit welcher Arbeit) und vor allem eine rasche Übersicht gewinnen, wo die Bearbeitung noch fehlt, wie man schnellstens zu dem betreffenden Ort kommt, etc.

## 7. Schlußbemerkung

Die Beispiele könnte man fortsetzen, wie das Programm der Tagung zeigt. Es kommt hier aber nicht darauf an, alle heute schon angedachten oder in Erprobung befindlichen raumfahrtgestützten Techniken der Landwirtschaft aufzuzeigen. Vielmehr sollte man folgende Schlüsse ziehen dürfen:

- Eine intensivere Kooperation der Partner aus der Landwirtschaft und der Raumfahrt kann zu großem Nutzen führen.
- Der Nutzen wäre sicherlich wechselseitig: Die Anregungen von den landwirtschaftlichen Nutzern könnte z.B. auch zu einer verbesserten, bedarfsorientierten Auslegung der Raumfahrzeuge und deren Teilsysteme führen.
- Die aus der Anwendung angeregten industriellen Entwicklungen könnten wirtschaftlich interessant werden (z.B. Export von GPS- Empfänger mit ergänzender Meßtechnik und Software und satellitengestützter sowie terrestrischer Kommunikation).
- Die heimische Landwirtschaft könnte in ökonomischer und ökologischer Hinsicht Profit ziehen.
- Die Entwicklungshilfe könnte neu gestaltet werden und mehr bewirken.

- Die politische Position der Bundesrepublik könnte davon profitieren. Für die Lösung globaler, regionaler und lokaler Probleme könnten Werkzeuge neuer Qualität entwickelt werden. Man sollte vor allem die Kombination Fernerkundung, Navigation, Kommunikation in der Landwirtschaft - natürlich zusammen mit der Informatik - näher in die Problemlösungen integrieren. Daraus ließen sich Synergie-Effekte ableiten.
- ISY 92 sollte zum Anlaß genommen werden, Landwirtschaft und Raumfahrt einander noch näher zu bringen.

## Technische Komponenten für die Erstellung von Ertragskarten während der Getreideernte mit dem Mähdrescher

Dipl.-Ing. P. Reitz, Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach  
Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim

### 1 Einleitung

Zur wirtschaftlichen und umweltgerechten Nutzung von Agrarlandschaften werden vom Landwirt Verbesserungen in der Produktionstechnik verlangt. Dazu bietet der Einsatz von Computern Möglichkeiten, einen kontrollierten Einsatz der landwirtschaftlichen Betriebsmittel wie Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmittel zu gewährleisten. Die Datenerfassung ist das erste Glied im Kreislauf eines computergestützten Ackerbaus. Digital gespeicherte Ertragskarten bilden hierfür einen wichtigen Baustein. Aus der Kenntnis der örtlichen Erträge innerhalb eines Feldes können Rückschlüsse auf die Bodenqualität gezogen werden. Weiterhin läßt sich der Nährstoffentzug durch die Pflanzen nach einer Wachstumsperiode für die weitere Düngplanung abschätzen [1]. Betriebstechnische Angaben wie die Erntemenge, die abgeerntete Fläche und die Arbeitszeit werden bei der Datenerfassung für Ertragskarten automatisch mitgeliefert.

In diesem Beitrag werden spezielle technische Probleme bei der Erstellung von Ertragskarten mit dem Mähdrescher erläutert und Sensoren vorgestellt, die in Hohenheim am Institut für Agrartechnik auf ihre Eignung im Feldeinsatz untersucht werden.

### 2 Bestimmungsgrößen einer Ertragskarte

Als Ertrag  $m_k$  wird die auf die Erntefläche A bezogene Kornmasse  $m_k$  verstanden. Der tatsächliche Ertrag kann nicht vollständig vom Mähdrescher aufgenommen werden. Die Körner von ausgefallenen Ähren und die Schneidwerksverluste verbleiben auf dem Feld und können noch nicht erfaßt werden. Der mit dem Schneid-

werk aufgenommene Kornmassenstrom teilt sich in den Anteil, der in den Korntank fließt, und den Verlustanteil, der wieder auf das Feld gelangt. Die Zählung der Verlustkörner ist mit den bekannten Sensoren am Schüttler- und Reinigungsausgang möglich.

Die Zusammenhänge bei der kontinuierlichen Bestimmung des Korn-ertrags  $m_K$  aus dem Korndurchsatz  $\dot{m}_K$  und der Flächenleistung  $\dot{A}$  werden durch die folgende Gleichung beschrieben.

$$m_K''(t) = \frac{\dot{m}_K(t)}{\dot{A}(t)} = \frac{\dot{m}_K(t)}{\dot{A}(t)} = \frac{\dot{m}_K(t)}{v_F(t) \cdot b_S(t)}$$

Die aktuelle Flächenleistung  $\dot{A}$  eines Mähdreschers ergibt sich aus dem Produkt von Geschwindigkeit  $v_F$  und Schnittbreite  $b_S$ .

Die Verknüpfung von Positions- und Ertragsdaten erfolgt immer zum Zeitpunkt der Gutaufnahme mit dem Mähdrescher. Bei der Datenzuordnung müssen deshalb die maschinenspezifischen Durchlaufzeiten der Körner zwischen Schneidtisch und den jeweiligen Meßstellen berücksichtigt werden.

Zur Erstellung einer Ertragskarte werden Datensätze aus Korndurchsatz, Geschwindigkeit, Schnittbreite, Position und Zeitpunkt der Messung benötigt. Diese Meßgrößen können entweder direkt oder über mit ihnen korrelierende Größen bestimmt werden.

### 3 Ertragsermittlung

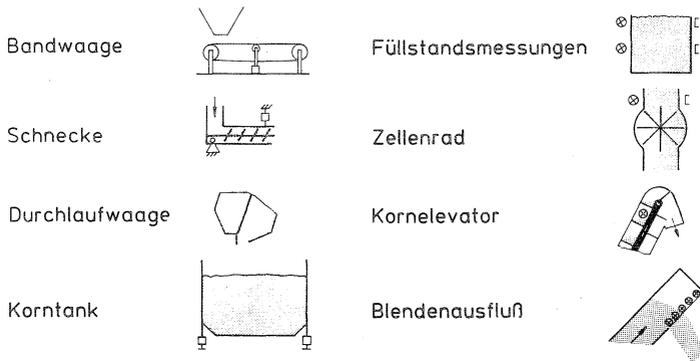
#### 3.1 Korndurchsatzmessung

Für die Durchsatzmessung kommt die Anwendung verschiedener physikalischer Wirkprinzipien in Frage. Mit dem Durchsatz korrelierende Größen sind u. a. die Massenkraft, der Volumenstrom, der Impuls, die Corioliskraft, die Absorption radioaktiver Strahlung, die Kapazität eines Kondensators oder die Kornabscheidung der Reinigungsanlage. Besondere Probleme beim Messen

dieser Größen bereiten die auf dem Mährescher auftretenden Schwingungen und Neigungen und schnelle Änderungen in den Guteigenschaften. Bild 1 und Bild 2 geben einen Überblick über einige Meßverfahren. Für den Einsatz im Mährescher wurden bisher nur zwei dieser Verfahren bis zur Serienreife entwickelt.

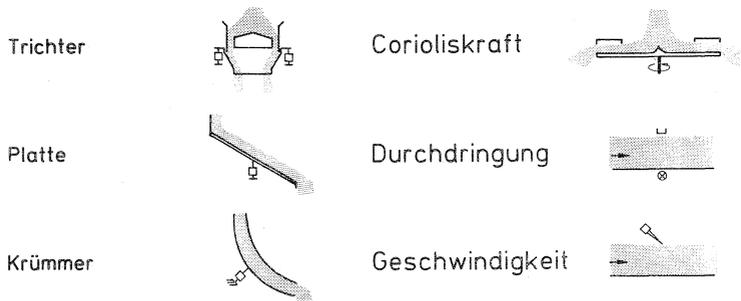
Massenkraft

Volumenstrom



**Bild 1** : Möglichkeiten zur Bestimmung des Korndurchsatzes durch Messung der Massenkraft und des Volumenstroms [2]

Impuls



**Bild 2** : Möglichkeiten zur Bestimmung des Korndurchsatzes durch indirekte Meßverfahren [2]

Der dänische Mähdrescherhersteller Dronningborg bietet als Modul zu einem Informationssystem ein Durchsatzmeßgerät an, das den Massendurchsatz direkt aus der Abschwächung von Gammastrahlen beim Durchdringen des fließenden Körnerstroms bestimmt. Einbauort von Strahlenquelle und Detektor ist der Übergang vom Kornelevator auf die Korntankbefüllschnecke. Bei gleichbleibender Durchflußgeschwindigkeit ist das Meßergebnis weitgehend von Gutart und -feuchte unabhängig. Trotz der geringen Strahlungsintensität sind die gesetzlichen Sicherheitsvorschriften im Umgang mit radioaktiven Materialien einzuhalten.

Die Firma Claas vertreibt ein volumetrisch arbeitendes Durchsatzmeßgerät, das auf den Kornelevator aufgesetzt wird. Es werden die Umdrehungen eines Zellenrads gezählt, die zur Förderung des Körnerstroms notwendig sind. Damit gewährleistet ist, daß die Zellen immer vollständig gefüllt sind, wird das Rad nur dann angetrieben, wenn an einem oberhalb des Zellenrads angebrachten Näherungssensor Gut anliegt. Weil der Gutstrom bei diesem Verfahren umgeleitet wird, kann es zu Problemen bei der Förderung oder zur Beschädigung des Gutes kommen.

Für eine genaue Ermittlung des Kornmassendurchsatzes über volumetrische Meßverfahren wird vom Mähdrescherfahrer eine häufige manuelle Bestimmung der Korndichte verlangt, um den Einfluß durch Änderungen der Guteigenschaften zu berücksichtigen. Eine automatische Korndichtebestimmung auf dem fahrenden Mähdrescher kann den Fahrer wesentlich entlasten und die Meßgenauigkeit steigern. Dazu wurde das in Bild 3 dargestellte Gerät mit Kompensation der auf das Meßsystem wirkenden Schwingungen und Neigungen entwickelt [3]. Zwei mit DMS beklebte Biegebalken sind zu einem gabelförmigen Element angeordnet worden. An dem einen Balken ist ein Behälter zur Aufnahme eines definierten Kornvolumens befestigt, am anderen eine definierte Bezugsmasse. Zur Kompensation der Störgrößen wird ausgenutzt, daß auf beide Elemente die gleichen Beschleunigungen wirken. Für die Anwendung dieses Geräts auf dem Mähdrescher muß ein automatisierter Ablauf aus Probenentnahme, Dichtebestimmung und Entleerung verwirklicht werden.

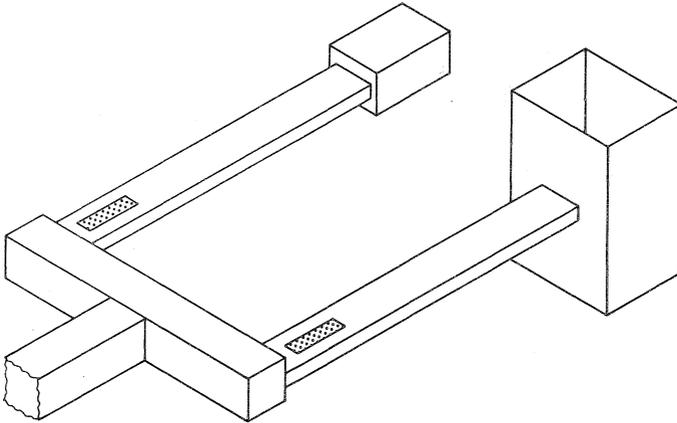


Bild 3 : Dichte-Kalibriereinrichtung nach [3]

Ein in der Fördertechnik eingesetztes Verfahren ermittelt den Durchsatz durch Messung des Momentes der Corioliskraft. Das Gut wird einer rotierenden Scheibe zentral zugeführt und durch die Wirkung der Zentrifugalkraft entlang von Leitschaufeln nach außen gefördert. Bei dieser Relativbewegung auf der bewegten Scheibe wirkt die Corioliskraft. Das aus der Corioliskraft resultierende Moment ist bei konstanter Winkelgeschwindigkeit der Scheibe proportional zum Massenstrom [4]. Nachteile sind auch hier der Eingriff in den Gutstrom und der zur Messung benötigte Energiebedarf.

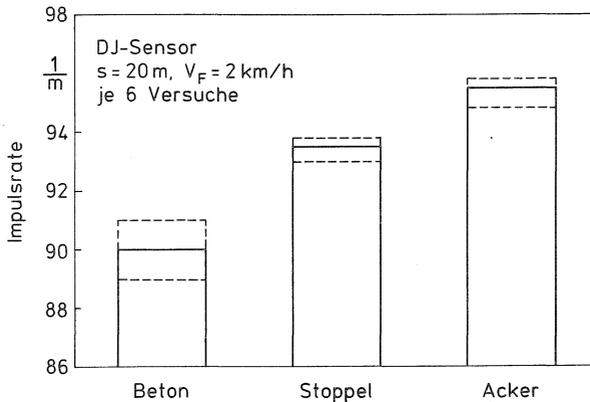
### 3.2 Geschwindigkeitsmessung

Zur berührungslosen Geschwindigkeits- und Wegmessung wird auf dem Versuchsmähdrescher ein unter der Vorderachse montierter Radar-Geschwindigkeitssensor eingesetzt. Das Radargerät arbeitet mit Mikrowellen und nutzt den Doppler-Effekt aus. Der Doppler-Effekt beschreibt die durch eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger hervorgerufene Frequenzverschiebung zwi-

schen ausgesendetem und empfangenem Signal. Da Sender und Empfänger in einem Gehäuse integriert sind, tritt der Doppler-Effekt beim Radarsensor zweimal auf. Die meßbare Frequenzverschiebung  $\Delta v$  wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$\Delta v = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{v_F \cdot \cos \alpha}{c}$$

Die Dopplerfrequenz  $\Delta v$  ist neben der Grundfrequenz  $v_0$ , der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  auch vom Neigungswinkel  $\alpha$  und somit von der Ausrichtung des Sensors abhängig. Bei der Montage des Sensors am Mähdrescher ist auch darauf zu achten, daß niederfrequente Schwingungen der Maschine nicht auf den Sensor übertragen werden. Sie werden als Relativbewegung interpretiert und verfälschen dadurch das Meßergebnis.



**Bild 4** : Impulsraten des Radarsensors auf verschiedenen Untergründen nach [7]

Durch Integration über der Zeit erhält man aus der Dopplerfrequenz die Impulsrate, die dem zurückgelegten Weg proportional ist und zwar theoretisch unabhängig von der Geschwindigkeit. Nach einer elektronischer Aufbereitung können diese Impulse einem Zähler zugeführt werden [6]. Zur Kalibrierung des Sensors wurden verschiedene Teststrecken abgefahren und die dabei erzeugten Impulse gezählt. Bild 4 zeigt, daß die gemessenen Impulsraten des eingesetzten Sensors bei der Fahrt über verschiedene Untergründe nicht konstant sind. Vergleichende Untersuchungen an landwirtschaftlich genutzten Radar-Geschwindigkeitsensoren wurden bereits mehrfach durchgeführt [6, 7, 8].

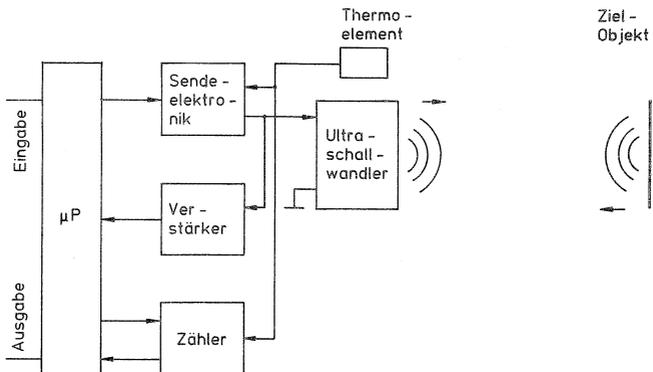
### 3.3 Schnittbreitenmessung

Bedingt durch die Geometrie des Feldes und das fahrerische Können oder die Ermüdung der Bedienperson ist es nicht immer möglich, die volle Schneidwerksbreite auszunutzen. Bei einigen Bordrechnern kann der tatsächlich genutzte Teil der Schneidwerksbreite manuell eingegeben werden. Dies ist jedoch sehr umständlich und fehlerbehaftet. Um die Flächenleistung mit ausreichender Genauigkeit berechnen zu können, ist die Messung der tatsächlichen Schnittbreite notwendig. Dazu sind beim Versuchsmährescher Ultraschall-Abstandssensoren in die Halnteiler des Schneidwerks eingebaut worden. Mit ihnen wird der Abstand zwischen der Schneidwerkskante und den Halmen des stehenden Bestands gemessen. Hinsichtlich der Anbringung ist darauf zu achten, daß eindeutig zwischen Lagergetreide und hohen Stoppeln unterschieden werden muß. Auch einzelne zur Seite geneigte Halme können das Meßergebnis verfälschen.

Die untersuchten Sensoren arbeiten mit 30 Impulsen in der Sekunde, die in Ultraschallschwingungen umgesetzt werden. Am Sensorkopf werden die Wellen mit einer Frequenz von 215 kHz unter einem Keulenwinkel von  $10^\circ$  ausgesendet. Treffen sie im Ausbreitungsbereich auf ein Hindernis, werden sie reflektiert und am Sensorkopf wieder empfangen. Die Abstandsberechnung erfolgt über eine hochgenaue Bestimmung der Laufzeit des Signals. Die

Auflösung des Abstandssignals beträgt 1 mm und liegt somit weit unter dem kleinsten Reihenabstand einer Drillmaschine, durch den die Auflösung der Schnittbreitenmessung begrenzt wird.

Der prinzipielle Aufbau eines Sensors ist in Bild 5 dargestellt. Ein Mikroprozessor steuert die Sendeelektronik an, identifiziert das empfangene Signal, mißt die Laufzeit und berechnet die Entfernung. Da die Resonanzfrequenz des Schallwandlers temperaturabhängig ist, wird sie mit Hilfe eines Thermoelements nachgeregelt. Durch die Anpassung der Taktfrequenz des Zählers wird auch der Temperatureinfluß auf die Schallgeschwindigkeit in Luft berücksichtigt. Die Signalausgabe kann wahlweise analog oder digital erfolgen [9].



**Bild 5** : Prinzipieller Aufbau eines Ultraschallsensors [9]

Auf dem Versuchsmähdrescher wird das analoge Ausgangssignal des Sensors gemessen. Zur statischen Kalibrierung wurden auf einem Brett befestigte Getreidehalme in Schrittweiten von 0.05 m entlang der Schneidwerkbreite verschoben. Die gemessene Ausgangsspannung ist streng proportional zum eingestellten Abstand. Der Meßbereich reicht von 0.15 m bis 1.50 m. Bei den Feldversuchen zum Test der Sensoren wurde der minimale Meßabstand bewußt nicht unterschritten. Mit einer Umlenkvorrichtung kann der minimale Meßabstand bis auf 0.05 m verringert werden.

## 4 Positionsbestimmung

### 4.1 GPS

Als Hauptsystem zur Positionsbestimmung wird auf dem Versuchsmähdrescher eine GPS-Empfangsanlage eingesetzt. Sie besteht aus der Antenne, die auf dem Dach der Fahrerkabine montiert ist, der Receiver/Prozessor-Einheit und einer Kontroll- und Auswerteeinheit. Dazu wird der Meßwerterfassungsrechner eingesetzt.

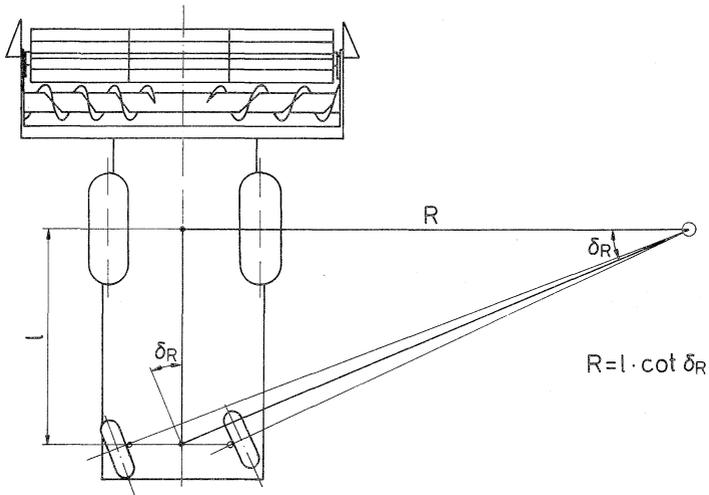
Der in Hohenheim verwendete GPS-Empfänger verfügt über 6 Kanäle zum kontinuierlichen Empfang des C/A-Codes über die L1-Trägerfrequenz [10]. Er ist für den Differentialbetrieb geeignet, wurde in den ersten Versuchen jedoch nur im stand-alone-Betrieb eingesetzt. Die Position wird in absoluten Koordinaten als Breitengrad B, Längengrad L und Höhe H im WGS'84-Koordinatensystem ausgegeben. Über die serielle Schnittstelle können zusätzlich zur Position auch Zeit, Fahrgeschwindigkeit, Angaben über die Satellitenkonstellation (DOP-Werte) und weitere das System beschreibende Daten an den Rechner übermittelt werden.

### 4.2 Koppelortungsverfahren

Zur Kontrolle der Positionsergebnisse des GPS und zum Überbrücken von Zeiten, in denen der Satellitenempfang unterbrochen ist, kann die Position für kurze Strecken aus dem Fahrbewegungsablauf des Mähdreschers berechnet werden. Dazu werden der aktuelle Fahrkurs und der zurückgelegte Weg aufgezeichnet.

Die Wegmessung erfolgt mit dem zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzten Radar-Geschwindigkeitssensor. Da nur die Relativgeschwindigkeit ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung gemessen wird, ist ein zusätzlicher Schalter am Fahrhebel montiert, der bei Rückwärtsfahrt ein Signal ausgibt.

Der Fahrkurs kann aus der Stellung der gelenkten Räder  $\delta_R$  bestimmt werden (Bild 6). Als Sensor wird ein potentiometrisch arbeitender Leitplastik-Wegaufnehmer verwendet, der die Kolbenstellung des Lenkzylinders mißt. Aus der Lenkkolbenstellung ergeben sich über die Lenkungsgeometrie die Radeinschlagwinkel. Für langsame Kurvenfahrt besteht bei Beachtung der Ackermannschen Bedingung<sup>1</sup> ein Zusammenhang zwischen dem mittleren Radeinschlagwinkel  $\delta_R$  und dem Fahrkurs  $R$ . Der Seitenschlupf zwischen Reifen und Untergrund und das Schräglaufverhalten der Reifen bei Kurvenfahrt werden nicht berücksichtigt.



**Bild 6** : Kinematik der Achsschenkel-Hecklenkung am Mähdrescher

Nach einer Anfangsorientierung des Fahrzeugs kann die Position in Bezug auf den Startpunkt über einen Algorithmus aus Radeinschlagwinkel, Achsabstand und zurückgelegter Wegstrecke berechnet werden. In Verbindung mit dem GPS lassen sich die Anfangsorientierung und ein regelmäßiger Positionsabgleich relativ einfach durchführen.

---

Ackermannsche Bedingung: Die in der Mitte der Räder errichteten Normalen schneiden sich im Kurvenmittelpunkt.

## 5 Ertragskartenerstellung

### 5.1 Meßwerterfassung

In den ersten Ernteversuchen wurde zur Korndurchsatzermittlung auf dem Versuchsmähdrescher eine bereits im Korntank vorhandene Waage verwendet, mit der die abgeerntete Körnermasse direkt bestimmt werden konnte. Für die folgenden Versuche ist der Einsatz eines kontinuierlichen Durchsatzmeßverfahrens geplant. Die Durchlaufzeit der Körner mußte nicht berücksichtigt werden, da die Wägung etwa alle 20 m erst nach Anhalten des Mähdreschers und Durchlaufen aller Körner durchgeführt wurde. Die abgeerntete Fläche zwischen den Wiegevorgängen wurde aus dem Wegsignal des Radarsensors und dem Mittelwert der Schnittbreitenmessungen bestimmt. Der Signalfluß der Meßwerterfassung auf dem Versuchsmähdrescher ist in Bild 7 schematisch dargestellt.

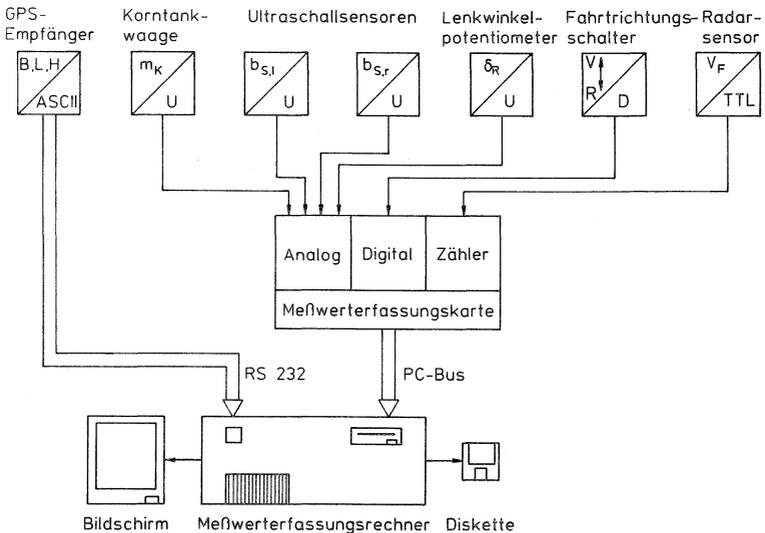
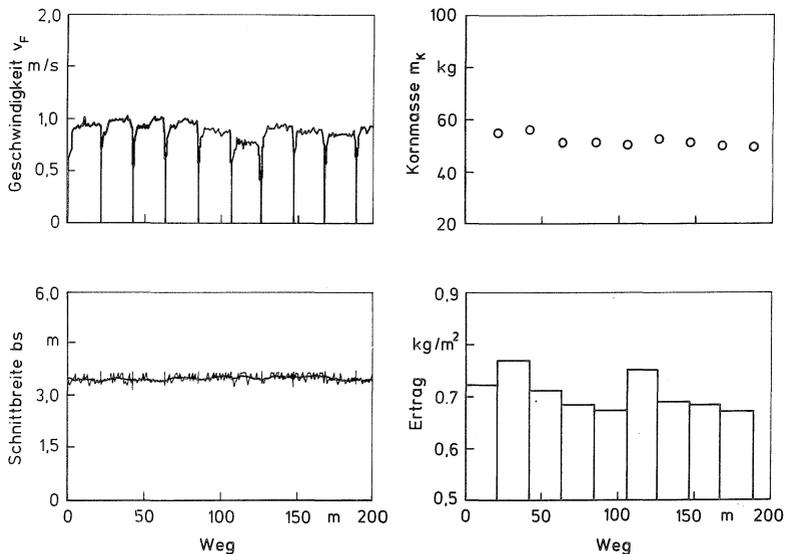


Bild 7 : Signalfluß der Meßwerterfassung

Die vom GPS berechneten Positionsdaten werden über die RS-232-Schnittstelle des Meßwerterfassungsrechners eingelesen. Zur Erfassung der weiteren Meßgrößen ist der Rechner über den PC-BUS mit einer Meßwerterfassungskarte für analoge, digitale und TTL-Eingangssignale verbunden. So können mit nur einem Rechner Position (B, L, H), Kornmasse  $m_k$ , Schnittbreite  $b_s$ , Radein-schlagswinkel  $\delta_r$  und Geschwindigkeit  $v_f$  einmal in der Sekunde in einen Datensatz eingelesen werden. Diese Werte werden während der Messung auf dem Bildschirm angezeigt und nach Versuchsende zur weiteren Auswertung auf Diskette gespeichert.

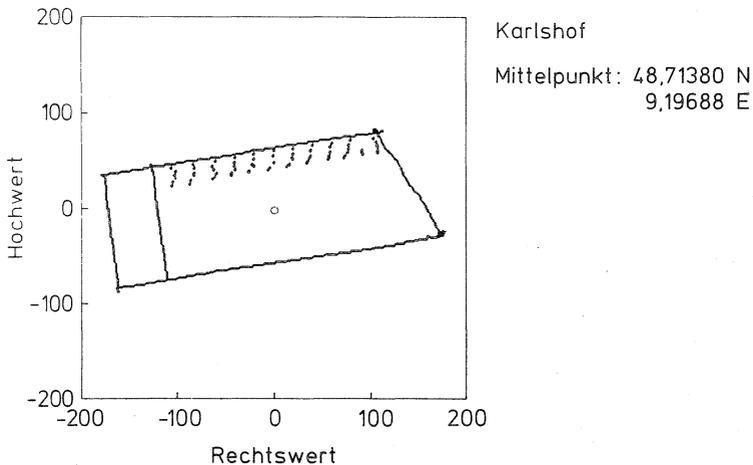
## 5.2 Versuchsauswertung und Ergebnisse

In Bild 8 sind am Beispiel einer geradeausverlaufenden Fahrt die Meßwerte von Geschwindigkeit, Schnittbreite und Kornmasse und der berechnete Ertrag über dem zurückgelegten Weg aufgetragen. Der beschriebene diskontinuierliche Versuchsablauf ist in



**Bild 8** : Meßwertverläufe und berechneter Ertrag

Bild 9 zeigt die bei den Feldversuchen im Juli 1991 bestimmten Meßpunkte. Der berechnete Ertragswert wird immer dem Mittelpunkt der abgeernteten Teilfläche zugeordnet. Die Feldgrenzen wurden mit dem GPS beim Umfahren des Feldes mit dem Mährescher bestimmt. Beim kontinuierlichen Empfang von mindestens vier Satelliten konnten dreidimensionale Ortungsergebnisse über einen Versuchszeitraum von etwa 4 Stunden mit dem GPS ermittelt werden. Die Abweichung betrug weniger als 2 m vom tatsächlichen Standort. Beim Empfang von drei Satelliten wurde die Position unter Annahme einer konstanten Höhe zweidimensional berechnet und diese Genauigkeit nicht mehr erreicht.



**Bild 9** : Ertragsmeßpunkte aus dem Versuchsjahr 1991

Zur Erstellung der Ertragskarte in Bild 10 ist das gesamte Feld in 10 x 10 m große quadratische Teilflächen eingeteilt. Aus allen innerhalb einer solchen Teilfläche bestimmten Ertragswerten wird der Mittelwert gebildet und in dem entsprechenden Muster graphisch dargestellt. Teilflächen, in denen keine Meßpunkte liegen, werden nicht dargestellt, deshalb ist nur ein Teil des Feldes gerastert.

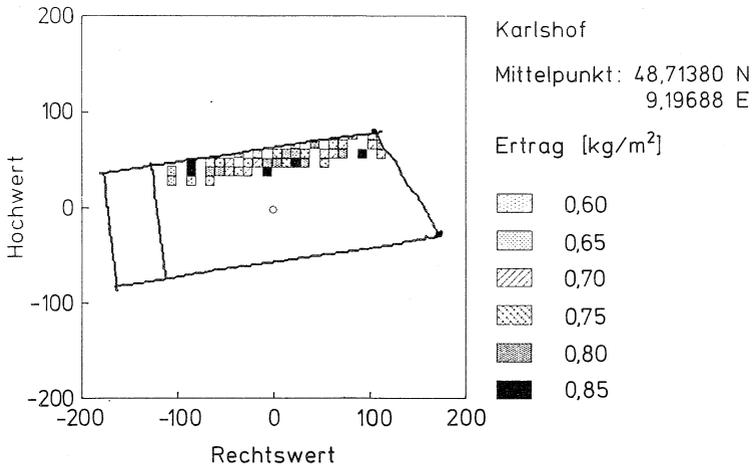


Bild 10 : Ertragskarte aus dem Versuchsjahr 1991

## 6 Zusammenfassung

Für viele technische Probleme, die bei der Erstellung von Ertragskarten auftreten, sind bereits brauchbare Lösungsansätze vorhanden. Das Verfahren für die Zukunft muß genau, preiswert und robust sein. Außerdem soll der Mährescherfahrer durch die Bedienung der Geräte nicht zusätzlich belastet werden.

Bei der Positionsbestimmung werden diese Anforderungen durch das GPS im wesentlichen erfüllt. Die mögliche Genauigkeit ist jedoch durch die noch nicht vollständige Satellitenkonstellation, Abschattungen der Signale und das nicht angemeldete Hinzuschalten der Störsignale nicht permanent zu erreichen. Differentielles GPS und die Verbindung mit einfachen Koppelortungssystemen sind Möglichkeiten, diese Nachteile zu beseitigen.

Spezielle Anforderungen an eine Korndurchsatz-Meßeinrichtung sind ein geringer Einfluß der Guteigenschaften und mechanischen Störungen auf das Meßergebnis. Die Körnerverluste sind ins Meß-

ergebnis mit einzubeziehen. Eine Kalibrierung der Meßeinrichtung während der Ernte sollte nicht notwendig sein oder automatisch durchgeführt werden. Diese Anforderungen werden von den vorgestellten Geräten noch nicht ausreichend erfüllt.

Die Bestimmung der aktuellen Flächenleistung ist mit berührungslos arbeitenden Radarsensoren zur Geschwindigkeitsermittlung und Ultraschallsensoren zur Schnittbreitenmessung prinzipiell möglich. Probleme bei der Montage und Ausrichtung der Sensoren sind noch zu lösen.

### Literatur

- [1] Auernhammer, H. : Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung. Landtechnik 7+8/90 S. 272 / 278
- [2] Kutzbach, H.D. : Entwicklungstendenzen bei der Regel- und Informationstechnik an Mähdreschern. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik (1988), Heft 6, Mähdrescher, S. 121/135
- [3] Böttinger, S. : Durchsatz- und Verlustfassung für eine Regelung der Mähdrescher-Reinigungsanlage. agrartechnik 3/1990, S. 109/110
- [4] Jost, G. : Meßsystem zum kontinuierlichen Verwiegen von Schüttgütern, Chemie-Anlagen + Verfahren (1987), Nr. 11
- [5] Diekhans, N. : Entwicklung eines neuen Sensors für Körnerverluste. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik (1988), Heft 6, Mähdrescher, S. 171/188
- [6] Fichtel, H. und O. Balcharek : Vergleichende Untersuchungen von Radargeräten zur Geschwindigkeitsmessung an Landmaschinen. Grundl. Landtechnik Bd. 36 (1986), Nr. 3, S. 68/73
- [7] Drerup, C. : Praktische Vergleichsuntersuchungen mit vier Geschwindigkeitssensoren. Diplomarbeit (1988), Universität Hohenheim, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion, unveröffentlicht
- [8] Demmel, M.; T. Muhr und H. Auerhammer : Vergleichende Untersuchungen zur berührungslosen Weg-/Geschwindigkeitsmessung. BML-Arbeitstagung (1990), KTBL-Arbeitspapier 145, S.7.1/7.6
- [9] Firmenschrift Honeywell : Geräte-Information E101 zu Ultraschall-Abstandssensoren, (1991)
- [10] Firmenschrift Magnavox : MX 4200 D, Differential GPS Receiver. Technical Reference Manual, (1990)



## **Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991**

Markus Demmel, Thomas Muhr, Josef Rottmeier, Paul v. Perger und  
Hermann Auernhammer  
TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik

### **1. Einleitung**

Die Ertragsermittlung stellt den Einstieg in einen "Regelkreis umweltgerechte und ertragsorientierte Düngung" dar [1]. Sie kann heute schon durch das Vorhandensein entsprechender Ertragsmeßsysteme für den Mähdrescher in Verbindung mit geeigneten Ortungsverfahren durchgeführt werden. Damit läßt sich unter Verwendung entsprechender Auswertesoftware als erster Schritt eine angepaßte Düngung auf Teilflächen verwirklichen.

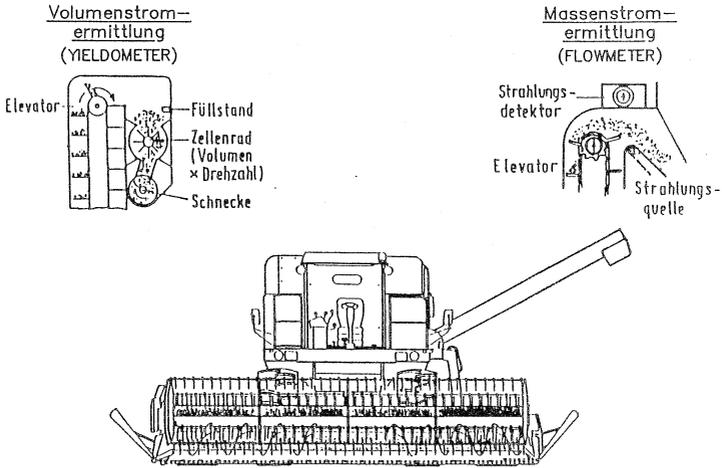
Auf Grund eines längerfristigen Forschungsvorhaben im "Forschungsverbund Agrar-ökosysteme München" (FAM) hat das Institut für Landtechnik die Aufgabe übernommen, während der Aufbau- bzw. Monitoringphase auf der gesamten Fläche des Versuchsgutes Scheyern die lokale Ertragsermittlung mit dem Ziel der Erstellung von Ertragskarten durchzuführen. Nach einer ersten Vorversuchsserie 1990 mit einer Druschfläche von nahezu 40 ha wurden in der Ernteperiode 1991 etwa 200 Hektar Getreide beerntet.

### **2. Material und Methoden**

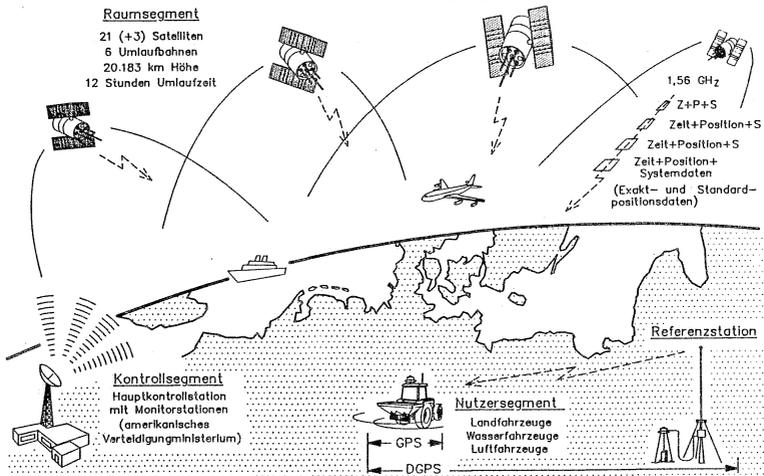
Die lokale Ertragsermittlung kann nur direkt in der Erntemaschine, bei Getreide im Mähdrescher durchgeführt werden. Sie erfordert zwei miteinander verbundene und online arbeitende Meßtechniken. Zum einen muß der Ertrag kontinuierlich ermittelt und aufgezeichnet werden. Beide derzeit am Markt verfügbaren Meßsysteme kamen zum Einsatz (Abb. 1).

Das Meßprinzip nach dem Volumenstrom ist immer abhängig vom Volumengewicht, also vom 1000-Korn-Gewicht. Nur eine exakte Kalibrierung und entsprechende Nachkalibrierungen bei sich ändernden Bedingungen ermöglichen damit ausreichend exakte Meßergebnisse. Das Massestrommeßprinzip ist dagegen unabhängig von diesen Einflüssen. Allerdings können auch bei diesem Meßprinzip durch Abweichungen der geforderten konstanten Durchflußgeschwindigkeit, bedingt durch sich ändernde Feuchtegehalte, Fehler auftreten.

Zum anderen wird eine möglichst genaue Ortbestimmung benötigt. Unabhängig von schlag- bzw. betriebsspezifischen Infrastrukturmaßnahmen ist dazu die Satellitenortung über das NAVSTAR Global Positioning System (GPS) vorzüglich geeignet (Abb. 2).



**Abbildung 1:** Eingesetzte Ertragsermittlungssysteme für Mähdrescher.



**Abbildung 2:** Aufbau des NAVSTAR "Global Positioning Systems (GPS)".

Das vom US-Verteidigungsministerium aufgebaute System ist mit derzeit 16 verfügbaren Satelliten nahezu vollständig einsatzfähig. GPS-Empfänger stehen von verschiedenen Herstellern zur Verfügung. Für den stand-alone Einsatz wird nach Auskunft des Betreibers mit 95 % Wahrscheinlichkeit eine Genauigkeit besser 300 Meter (S/A-on) verfügbar sein. Spezielle Systeme können in differentieller Nutzung betrieben werden und reduzieren dadurch den Positionsfehler auf Dezimeter bzw. wenige Meter.

Ertrags- und Ortungsdaten, verbunden mit der Uhrzeit und eventuellen weiteren Maschinenzustandsgrößen bilden die Ausgangsbasis für alle Schritte der Datenverarbeitung bis hin zu geographisch dargestellten Ertragskartierungen. Da derzeit kein Mähdrescherhersteller Maschinen mit beiden Teilsystemen (Ertragsermittlung + Ortung) anbietet, mußten für den Versuchseinsatz entsprechende Umrüstungen vorgenommen werden. Dies geschah in einer sehr fruchtbaren Form in Zusammenarbeit mit zwei Mähdrescherherstellern, einem Softwarehaus und einem Anbieter von Satellitenortungssystemen. Um Ausfälle und damit Arbeitspausen in der kurzen Erntezeitspanne weitgehend zu vermeiden wurden umfangreiche Vorversuche vorgeschaltet und durchgeführt.

### **2.1 Tast- und Vorversuche 1990**

Durch das Zusammentreffen mehrerer glücklicher Umstände konnte schon in der Ernte 1990 ein erster Vorversuch durchgeführt werden. Dafür stand folgende Technik zur Verfügung:

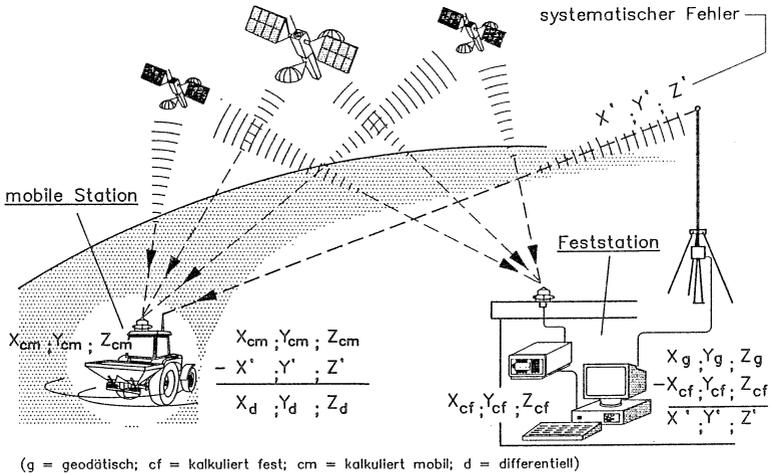
- Mähdrescher CASE JUMBO 8900 mit Ertragsmeßsystem FLOWMETER, (Hersteller DRONNINGBORG, Dänemark), Vorführmaschine,
- Mähdrescher CLAAS DOMINATOR 108 mit Ertragsmeßsystem YIELD-O-METER, (Hersteller CLAYDON, England), Eigentumsmaschine der von Hardegg'schen Güterverwaltung, Österreich),
- Einfaches GPS-Satellitenortungssystem GLOBOS LN 2000 von SEL
- getrennte Datenerfassung für beide Datenströme (Ertrag / Position) mittels:
  - o Laptop COMPAQ SLT/286 mit 20 MB Harddisk
  - o Industrie-PC TELEFUNKEN IAPR 386 mit 3 MB RAM-Disk, Schlumberger S-NET Karte und IMP DATALOGGER

Mit diesem Gesamtsystem wurden etwa 30 Hektar Winterweizen (CASE JUMBO 8900 in Scheyern und am Schlüterhof) und 10 Hektar Körnermais (CLAAS DOMINATOR 108 bei der von Hardegg'schen Güterverwaltung, Österreich) gedroschen.

Die Datenauswertung erfolgte mit dem geografischen Informationssystem ARC/INFO und speziell hierfür entwickelter Datenaufbereitungssoftware. Sie ermöglichte erstmals eine Ertragskartierung in verschiedenen Rastergrößen in Anlehnung an vorgegebene Fahrspuren.

### **2.2 Vor- und Hauptversuch 1991**

Um für die lokale Ertragsermittlung beim Mähdrusch 1991 eine höhere Ortungsgenauigkeit zu erreichen, kam in der Ernte 1991 ein "Differentialles GPS" (DGPS) zum Einsatz. Die verwendete Prototypenversion arbeitete nach dem "Position-Correction" Verfahren (Abb. 3).



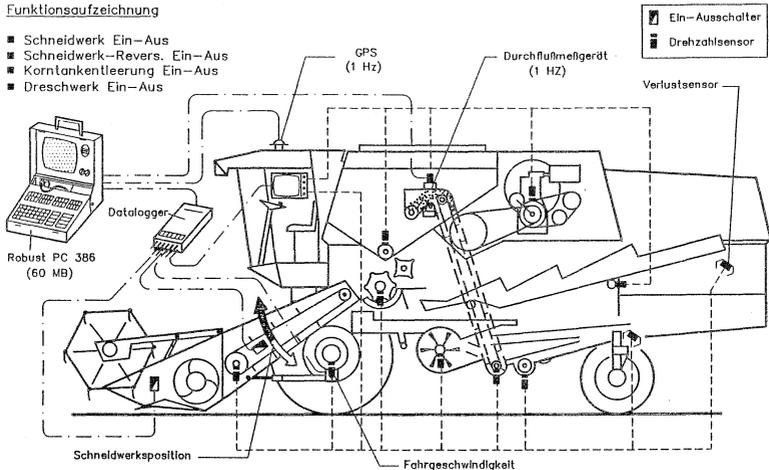
**Abbildung 3:** Differentielles "Global Positioning System (DGPS)".

Außerdem konnte auf zwei, eigens für diese Versuche zur Verfügung stehende, fabrikneue Mähdrescher uneingeschränkt zurückgegriffen werden. Es handelte sich dabei um einen CLAAS DOMINATOR 108 MAXI und um einen MASSEY FERGUSON MF 34RS (Hersteller DRONNINGBORG, Dänemark). Da mit diesen Maschinen parallel auf jeweils separaten Feldern gearbeitet werden sollte, mußte die Datenaufzeichnung geändert werden. Zum Einsatz kamen zwei identische Industrie- PC der Fa. KONTRON. Sie zeichneten die jeweils an RS232-Schnittstellen anstehenden Positions- und Ertragsdaten direkt im Mähdrescher auf. Daneben wurden noch weitere Mähdrescherfunktionen erfaßt (Tab. 1).

**Tabelle 1:** Sensorausrüstung der beiden Versuchsmähdrescher.

Ausstattung	CLAAS DOMINATOR 108 MAXI	MASSEY FERGUSON MF 34 RS
elektr. Ertragsmeßeinheit	YIELD-O-METER	DATAVISION FLOWCONTROL
Datendisplay	MUELLER UNICONTROL	DATAVISION
Datenspeicherung	Robust-PC: Kontron IP-LITE (2x RS f. Ortung und Ertrag) (S-Net + DATALOGGER für Sensoren)	Robust-PC: KONTRON IP-Lite (2x RS f. Ortung und Ertrag) (S-Net + DATALOGGER für Sensoren)
Positionsbestimmung	SEL DGPS GLOBOS LN 2000	SEL DGPS GLOBOS LN 2000
Sensoren für:		
Schneidwerk Arbeitsstellung	Zugschalter	Induktivsensor
Schnittanfängerfassung	Lichtschanke	Lichtschanke
Wegstreckenmessung	Induktivsensoren an beiden Antriebsrädern	Induktivsensoren an beiden Antriebsrädern
Zellenradrehzahl	Induktivsensor	—
Dreschwerk ein/aus	—	DATAVISION
Schneidwerk ein/aus	—	DATAVISION
Schneidwerk reversieren	—	DATAVISION

Damit ergab sich eine umfassende Maschinenüberwachung und Datenaufzeichnung (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Datenerfassung für die Ertragskartierung im Mähdrescher.

Die Datenerfassung auf den Mähdreschern erfolgte in zweifacher Form. Zum einen wurden die Positionsdaten des Mobilempfängers (einfaches GPS) empfangen und mit den entsprechenden Ertragsdaten abgespeichert (Erfassungsfrequenz 1 Herz, da die langsamere Updaterate der Ertragsermittlungssysteme 1 Hz beträgt). Zum anderen wurde über das differentielle GPS bei einer Update-Rate von 1 pro 7 Sekunden auch die korrigierte Position kombiniert mit einem gleitenden Ertragsmittelwert aus den vorhergehenden 7 Sekunden erfaßt und abgelegt.

Alle Mähdrescher-Korntankinhalte wurden einzeln auf einer geeichten Fuhrwerkswaage verwogen, um daraus die Genauigkeit der Ertragsmeßsysteme ableiten zu können. Begleitend dazu wurde für die Probe eines jeden Korntankinhaltes das Hektolitergewicht und die Kornfeuchte bestimmt. Auf einer Teilfläche wurde zur Überprüfung der Ortungsgenauigkeit vom Lehrstuhl für Geodäsie der TUM ein geodätisches Ortungsreferenzsystem eingesetzt.

Mit beiden Maschinen wurden im Juli und August 1991 die in Tabelle 2 aufgeführten Vor- und Hauptversuche durchgeführt.

Alle Vorversuche fanden auf Gut Wittenfeld (Landkreis Eichstätt) statt. Die Hauptversuche wurden ausschließlich in Scheyern durchgeführt. Sie umfaßten die gesamte, mit Winterweizen bestellte Ackerfläche des Versuchsgutes.

**Tabelle 2:** Erntekennndaten für die lokale Ertragsermittlung 1991.

	CLAAS DOMINATOR 108 MAXI		MASSEY FERGUSON MF 34 RS	
	Vorversuch	Hauptversuch	Vorversuch	Hauptversuch
Einsatzzeit (h)	20	40	35	55
Einsatzfläche (ha)	W-Gerste	30	-	30
	W-Roggen	-	-	20
	W-Weizen	-	50	-
Mittlerer Ertrag (dt/ha)	W-Gerste	82	-	80
	W-Roggen	-	-	88
	W-Weizen	-	64	-
Mittlere Kornfeuchte (%)	14,5	15,0	14,5	15,0
Gesamtdruschfläche (ha)	30	50	50	70
Gesamtdruschmenge (t)	246	320	416	375

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen betreffen die Ernte 1990 als Tast- und Vorversuche, sowie die Ernte 1991 mit Vor- und Hauptversuchen.

#### 3.1 Tast- und Vorversuche 1990

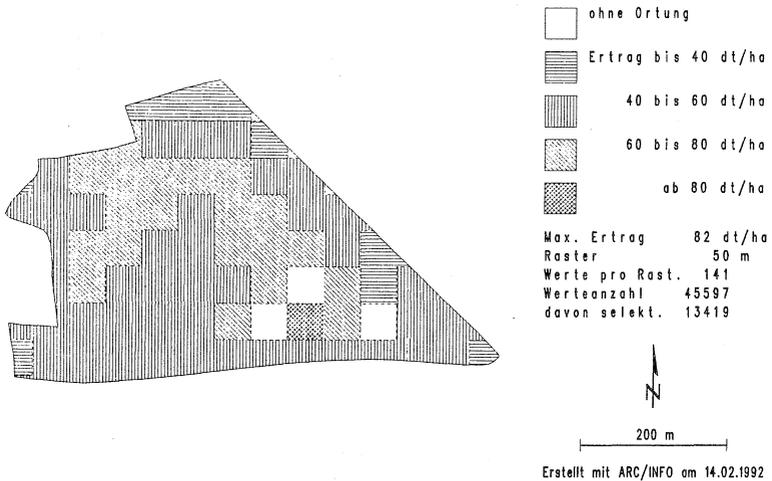
Bedingt durch die noch unvollständige Satellitendeckung und Anfangsschwierigkeiten bei der Datenaufzeichnung konnte bei der Datenauswertung und Ertragskartenerstellung eine vollständige Flächendeckung nur bei einer Rastergröße von 50 mal 50 Metern erreicht werden (Abb. 5).

Trotz der noch vorhandenen Probleme deckte sich die Ertragsstruktur nach Angaben des damaligen Verwalters sehr gut mit den tatsächlichen Gegebenheiten.

#### 3.2 Vor- und Hauptversuche 1991

Durch den gleichzeitigen Einsatz von zwei Großmähdreschern und den Umstieg auf das weltweit erstmals in einem landwirtschaftlichen Betrieb eingesetzte differentielle GPS erschien es angebracht, umfangreiche Vorversuche mit den Maschinen und Meßsystemen durchzuführen.

Für den Aufbau der Meßtechnik, die Ausrüstung der Mähdrescher und den eigentlichen Drusch bei den Vor- und Hauptversuchen wurden 1991 annähernd 100 Mann-tage investiert, der Aufwand für die Organisation sowie für die Datenauswertung und Ertragskartenerstellung nicht einbezogen. An insgesamt 18 Druschtagen konnten mehr als 100 MByte Rohdaten aufgezeichnet.



**Abbildung 5:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha) (Winterweizen; FLOWMETER; SEL-GLOBOS LN 2000, Erntetag 12.8.1990).

### 3.2.1 Genauigkeit der Ertragsermittlung

Die vorgenommenen Überprüfungen der Genauigkeit der Ertragsermittlung an insgesamt 200 Korntankinhalten ergaben, daß beide Ertragsermittlungssysteme im Mittel einen Fehler kleiner 1 % aufweisen. Allerdings schwanken die Abweichungen von Tankinhalt zu Tankinhalt und erreichen in Einzelfällen bis zu + oder -10 % Abweichung, mit Standardabweichungen von  $\pm 3,7$  % beim Massefluß- und  $\pm 5,1$  % beim Volumenmeßgerät.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, daß die Genauigkeit der am Markt befindlichen Ertragsermittlungssysteme ausreichend ist. Für die zukünftige breite Anwendung dieser Technik ist jedoch eine größere Sicherheit der Genauigkeit durch eine Verringerung der Streuung der Meßfehler, sowie beim Volumenmeßgerät die Ausschaltung der Fehlerquelle "Mensch" bei den Kalibriervorgängen von Nöten.

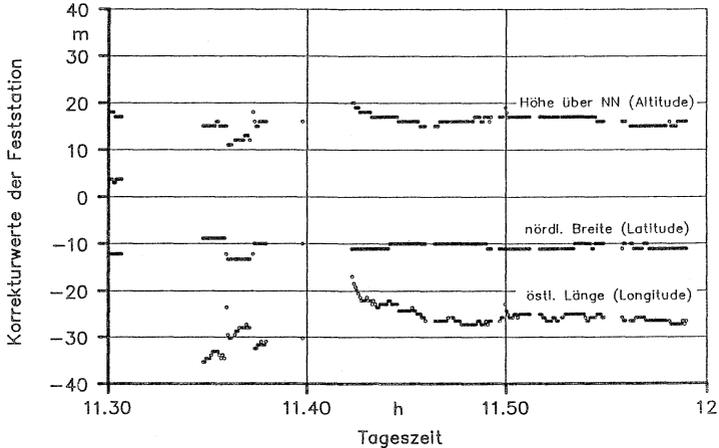
### 3.2.2 Ortungsgenauigkeiten

Die exakten Auswertungen zu den mit DGPS (Position-Correction) im Mobileinsatz erreichbaren Ortungsgenauigkeiten unter Einbeziehung der geodätischen Referenzmessungen sind noch nicht abgeschlossen. 24-Stunden - Aufzeichnungen der Positionsbestimmung mit einfachem GPS an einem geodätisch vermessenen Punkt (statisch) kurz vor Erntebeginn (30./31.7.1991, S/A off) lassen auf eine sehr hohe Genauigkeit schließen (Tab. 3).

**Tabelle 3:** Kenndaten der Ortungsgenauigkeit.

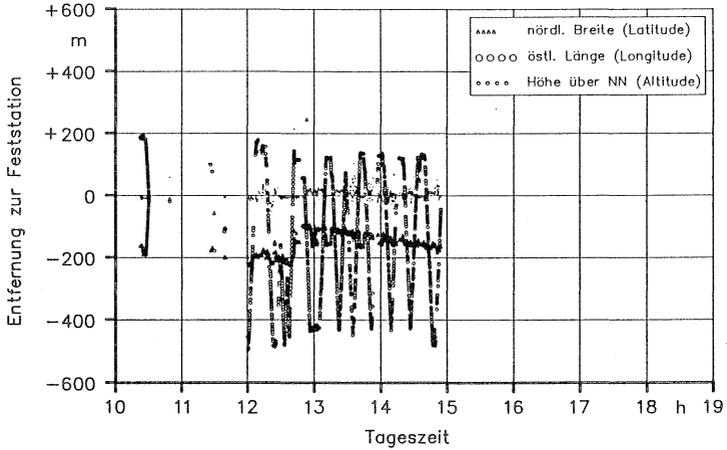
Standort	nördl. Breite	östl. Länge	Höhe über NN
S/A off (30./31.7.1991)	48,83928 °	11,20586 °	462,5 m
n = 9 295 (75,3% Verfügbarkeit)			
Mittlere Abweichung (m)	- 14,95	- 21,32	14,93
Standardabweichung (m)	± 14,26	± 12,23	± 23,65
95% - Vertrauensintervall in (m)	± 28,00	± 24,03	± 46,48
Minimalwert	- 229,91	-227,47	-154,50
Maximalwert	+ 184,66	+ 252,40	+ 212,50
S/A on (22./23.1.1992)			
n = 10 989 (89,0% Verfügbarkeit)			
Mittlere Abweichung (m)	- 13,22	- 21,69	14,96
Standardabweichung (m)	± 33,55	± 32,46	± 59,76
95% - Vertrauensintervall (m)	± 65,94	± 63,78	± 117,43
Minimalwert (m)	-219,36	- 182,29	- 295,23
Maximalwert (m)	+ 129,22	+ 209,68	+ 332,37
S/A Einfluß			
Mittelwert %	- 11,60	+ 0,02	+ 0,00
Standardabweichung %	+ 235,30	+ 265,40	+ 252,70

DGPS-Simulationen führten zu Abweichungen kleiner  $\pm 7,5$  Meter. Die Analyse der Korrekturwerte der DGPS-Feststation zeigte eine zeitweise hohe Konstanz dieser Werte verbunden mit großen Sprüngen, die auf Wechsel bei den empfangenen Satelliten zurückzuführen sind (Abb.6).



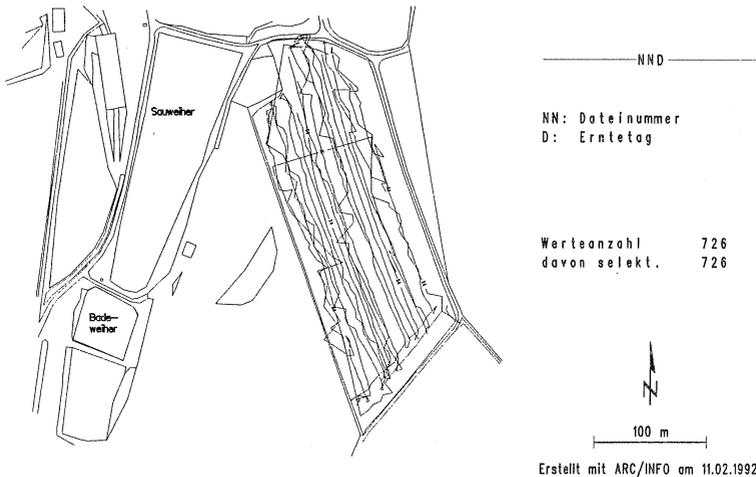
**Abbildung 6:** Korrekturwerte der Feststation DGPS in Scheyern (13.8.91; SEL-Globos LN 2000; PP11).

Die Abbildung der Entfernungen des Mähreschers zur Feststation gibt eine erste Auskunft über die Positionsveränderung der Maschine zu einem bekannten Fixpunkt, noch getrennt nach Breite, Länge und Höhe (Abb. 7).



**Abbildung 7:** Entfernungen der Mähdröschler zur Feststation DGPS in Scheyern (13.8.91; SEL-Globos LN 2000; PP11).

Die Aneinanderreihung der Positionsdaten des Mähdröschlers beim Drusch eines Schlages ergibt die Abbildung des Fahrweges des Mähdröschlers. Diese Darstellung ermöglicht die visuelle Beurteilung der Qualität der Ortung während des Drusches (Abb. 8).



**Abbildung 8:** Fahrweg Scheyern "Unteres Geiswegfeld" (3,4 ha) (Wegermittlung SEL-DGPS, Erntetag 15.8.1991).

Erstellt mit ARC/INFO am 11.02.1992

### 3.2.3 Ertragskartierung

Die kontinuierliche Ertragsmessung verbunden mit einer genauen Positionsbestimmung im Feld erlaubt eine lokale Ertragsermittlung mit anschließender Ertragskartierung. Hierzu müssen die Rohdaten vielfältigen Plausibilitätskontrollen unterworfen werden bevor sie von speziellen Auswerteprogrammen geographisch dargestellt werden können.

Die Programme sind entweder vollkommen neu zu entwickeln oder es kommen "Geographische Informationssysteme" (GIS) ergänzt durch eigene Unterprogramme zum Einsatz. Die vorliegenden Auswertungen basieren zum einen auf Auswerte- und Analyseprogramme, die am Institut für Landtechnik entwickelt wurden, und zum anderen auf den geographischen Informationssystemen ARC/INFO von ESRI bzw. SPANS von TYDEC. Speziell der Aufbau und die Darstellung der Ertragskarten mittels GIS erfordert sehr leistungsfähige Hardware (Workstations) und wird in Zukunft sicherlich nicht am landwirtschaftlichen Betrieb angesiedelt sein können.

Hinzu kommt, daß derzeit noch keine gesicherten Erkenntnisse über die Art und Weise der Auswertung und Darstellung lokal variierender Erträge in Bezug auf pflanzenbauliche und bodenkundliche Belange, wie auch in Bezug auf die Erfordernisse bei der Umsetzung in Saat-, Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen vorliegen. Deshalb wurde für die Ertragsdarstellung nur eine einfache Punktzuordnung vorgenommen.

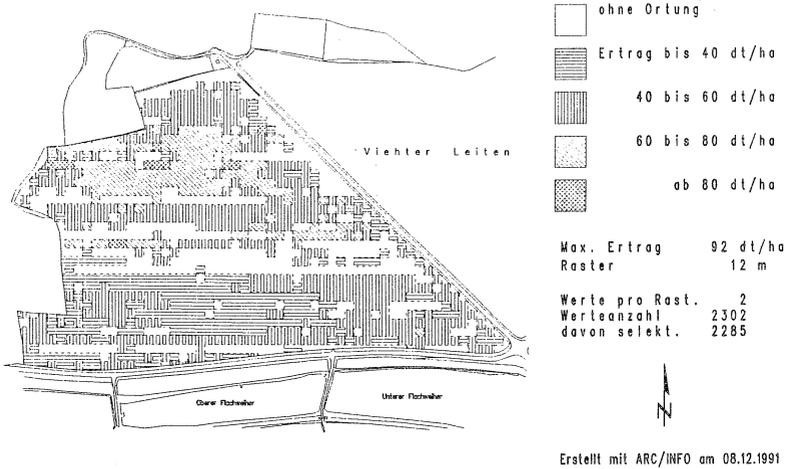
Ausgehend von unterschiedlichen Arbeitsbreiten landwirtschaftlicher Maschinen wurden alle Flächenerträge als Mittelwerte für Raster (Grids) unterschiedlicher Größen (12m x 12m, 24m x 24m und 50m x 50m) ermittelt, wie auch "Flächen gleicher Erträge", also Isoertragsflächen durch Nachbarschaftsanalyse berechnet. Im folgenden werden diese Möglichkeiten am bereits aus den Vorversuchen 1990 bekannten Einzelschlag "Flachfeld" vorgestellt.

Die Darstellung in Rastern der Größe 12m x 12m läßt noch deutlich die Flächen ohne Positionsbestimmung (zu geringe Anzahl der Satelliten, schlechte Signalqualität) erkennen (Abb. 9).

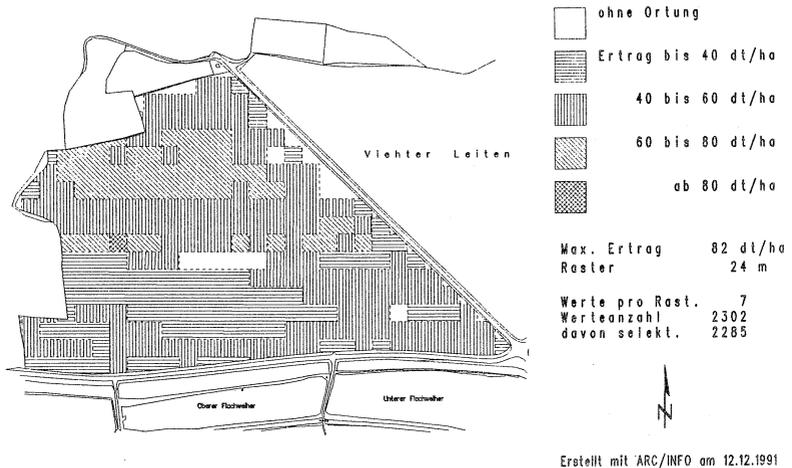
Die Vergrößerung der Raster auf 24m x 24m, einem Maß, das auf den Fahrgassenabstand und die Arbeitsbreite (Spritze, Düngerstreuer) von Großbetrieben abgestimmt ist, führt bereits zu einer fast vollkommenen Flächendeckung (Abb. 10).

Eine letzte Erweiterung der Raster auf 50m x 50 m, also auf einen viertel Hektar oder 4 bzw. 2 Arbeitsbreiten, reduziert den "Fleckenteppich" unterschiedlicher Erträge und läßt Gebiete gleicher Ertragsklassen zu größeren Flächen verschmelzen (Abb. 11).

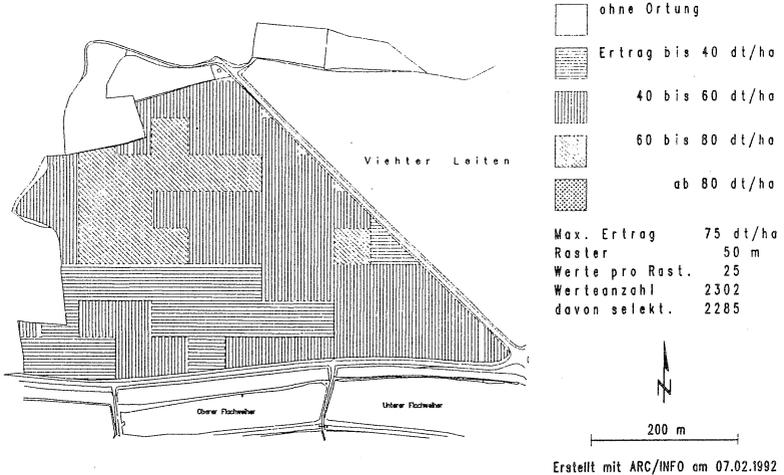
Im Vergleich zur Kartierung der Ernte 1990 lassen sich Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Witterung und eines veränderten Düngungsniveaus erkennen. Die Schwerpunkte der Ertragsstrukturierung kommen jedoch an ähnlichen Stellen zu liegen.



**Abbildung 9:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Raster 12m x 12m).



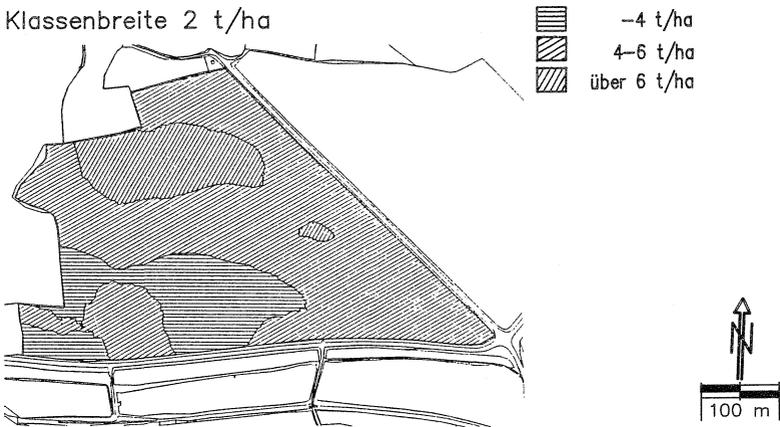
**Abbildung 10:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Raster 24m x 24m).



**Abbildung 11:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Raster 50m x 50m).

Im direkten Vergleich dazu zeigt die Kartierung von Isoertragsflächen bei gleichen Ertragsklassen naturgetreuerere Ertragsabbildung (Abb. 12).

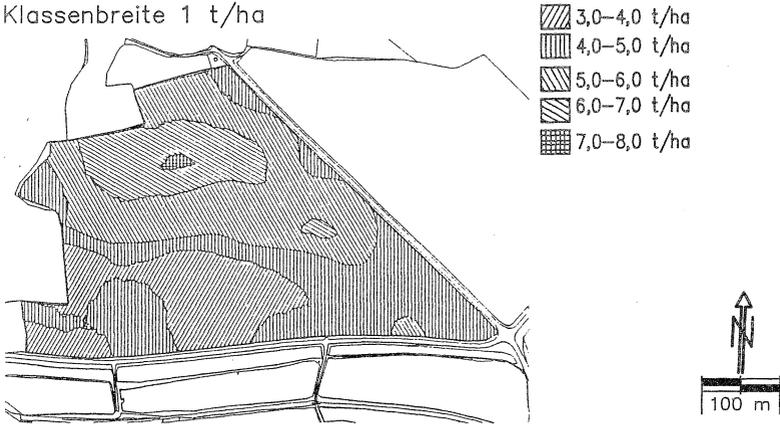
Klassenbreite 2 t/ha



**Abbildung 12:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Isoertragsflächen, 2t-Klassen).

Allerdings stellt eine 2 Tonnen - Klassierung eine sehr grobe Ertragsabstufung dar. Wird auf 1 Tonnen - Klassen übergegangen, dann ergeben sich weit interessantere Zusammenhänge (Abb. 13).

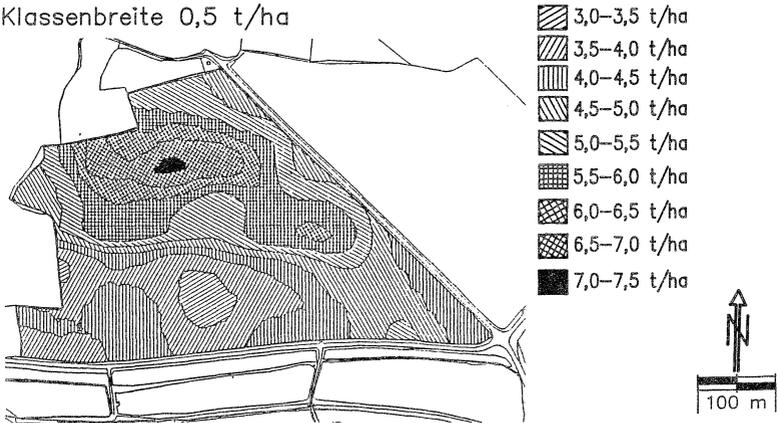
Klassenbreite 1 t/ha



**Abbildung 13:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Isoertragsflächen, 1t-Klassen).

Inwieweit eine weitere Reduzierung der Klassensprünge einen zusätzlich realisierbaren Nutzen für die Praxis erbringen kann, läßt sich derzeit noch nicht absehen (Abb. 14).

Klassenbreite 0,5 t/ha

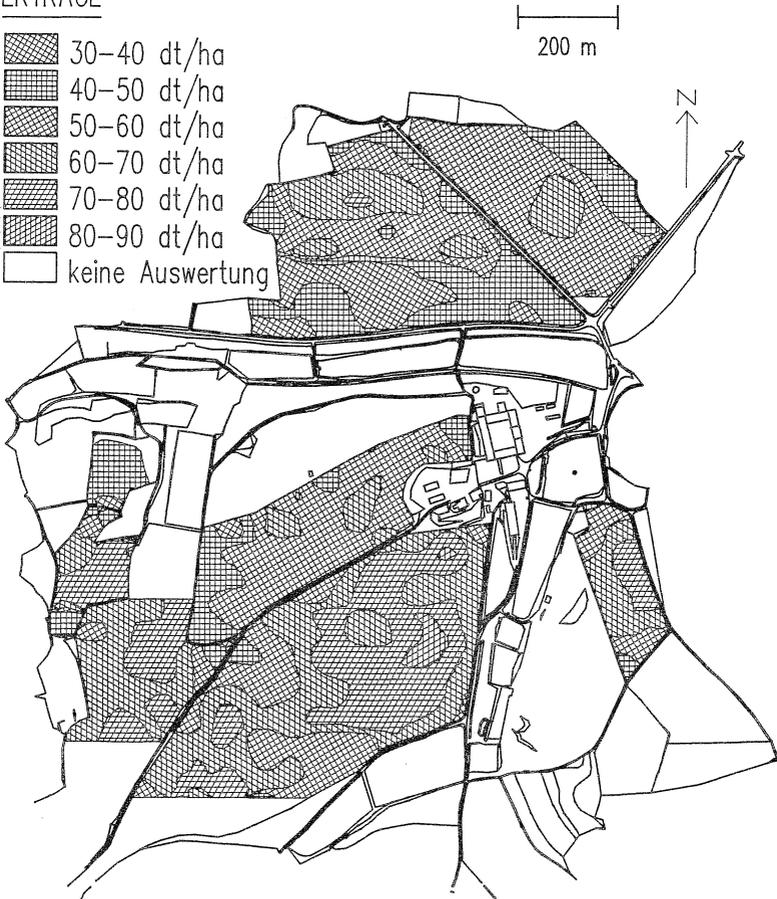
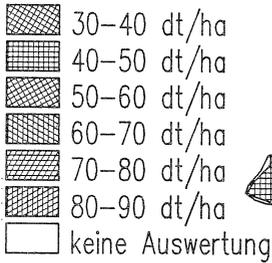


**Abbildung 14:** Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" (16,6 ha)  
(Winterweizen, SEL-DGPS, "Datavision Flowcontrol",  
12.+13.8.91, Isoertragsflächen, 0,5t-Klassen).



Die Gesamtertragskarte der Ernte 1991 in Scheyern in Form von Isoertragsflächen zeigt dabei wiederum deutlicher als die Rasterdarstellung die Abhängigkeit der Ertragsausbildung von topographischen und geologischen Formationen. Sehr deutlich ist dabei die Ausdehnung von Isoertragsflächen über Schlaggrenzen und Wege hinweg zu erkennen (Abb. 16).

### ERTRÄGE



**Abbildung 16:** Ertragskarte "Scheyern gesamt" (Winterweizen, SEL-GPS/DGPS, 12.-18.8.91, Isoertragsflächen).

#### 4. Zusammenfassung

Die in der Ernte 1990 vom Institut für Landtechnik mit Tast- und Vorversuchen begonnenen Arbeiten zur lokalen Ertragsermittlung beim Mähdrusch wurden im Untersuchungs-jahr 1991 im Rahmen des "Forschungsverbundes Agrarökosysteme München" auf etwa 200 ha Druschfläche ausgedehnt. Die zwei eingesetzten Mäh-drescher waren mit unterschiedlichen Ertragsmeßsystemen (Massestrom- bzw. Volumenstrommeßsysteme) ausgestattet. Die Positionsbestimmung erfolgte weltweit erstmalig bei einem landwirtschaftlichen Einsatz mittels differentiellem GPS.

Sowohl die Ertragsmeßgeräte als auch das Ortungssystem zeigten eine hervorragende Funktionssicherheit wie auch ausreichende Genauigkeiten. Die damit gewonnenen Ertrags-/Positionsdaten wurden mithilfe eigener Auswerteprogramme und geographischer Informationssysteme in Ertragskarten unterschiedlicher Struktur (Raster- bzw. Isoflächendarstellung) überführt.

#### 5. Literatur

*Auernhammer, H.:*

Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung. Landtechnik 45 (1990), H.7/8, S.272 -278

*Buschmeier, R.:*

CAF with the Satellite Navigation System GPS.

Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90)" Berlin, VDI-AGR/MEG 1990, S.88 - 89

*Muhr, T., M. Demmel und H. Auernhammer:*

Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Feld.

In: Wagemöglichkeiten im Schlepperheckkraftheber und in Transportfahrzeugen. Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan 1991, Heft 2, S.72 - 84

*Petersen, C.:*

Precision GPS Navigation for Improving Agricultural Productivity.

GPS World 1991, Nr.1, S.38 - 43

*Schnug, E., S. Haneklaus und J. Lamp:*

Economic and Ecological Optimisation of Farm Chemical Applications by "Computer Aided Farming" (CAF).

Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90)" Berlin, VDI-AGR/MEG 1990, S.88 - 89

*Schueller, J.K.:*

Determination of Spatially Variability Yield Maps.

St. Joseph, ASAE Paper Nr. 87-1533

## **Theoretische und technische Ansätze für die Spurführung mobiler Aggregate**

ord. Prof. Dr.-Ing. habil. L. Kollar, Humboldt-Universität zu Berlin

### **1 Zum Begriff der Lenkung**

Das Lenken umfaßt die Teilaufgaben

- Orten des Fahrzeugs hinsichtlich eines Bezugssystems,
- Aufrechterhalten der Längsbewegung,
- Erteilen einer Geschwindigkeit zur Fahrkursänderung und
- Bewegungskontrolle hinsichtlich des Bezugssystems.

Daraus leitet sich die Aufgabe für den Fahrer mobiler landwirtschaftlicher Aggregate ab.

Soll die durch einen Fahrer beim Lenken ausgeführte Arbeit auf Automaten übertragen werden, sind Betriebsgrößen auszuwählen, durch die der Lenkprozeß gut beschrieben wird, die meßtechnisch sicher erfaßt werden können und sich zur Beeinflussung des Prozesses im Sinne einer automatischen Steuerung eignen.

Betriebsgrößen, die diesen Anforderungen genügen, sind

- Fahrkursabweichung  $y_M$  und
- Gierwinkel  $\xi_0$  (Stellungswinkel der Aggregatlängsachse zur Leitlinie).

Bei der Lösung der technischen Aufgaben ergeben sich besondere Schwierigkeiten daraus, daß das adaptive Verhalten, das der Fahrer im Laufe der Arbeit mit dem Aggregat entwickelt, nur begrenzt oder gar nicht berücksichtigt werden kann. Die dabei zu realisierenden Anforderungen sind sehr unterschiedlich (Tab. 1).

### **2 Aufgaben zur Automatisierung der Lenkung**

Bei der Lösung von Aufgaben zur Automatisierung der Lenkung sind gegenwärtig national und international zwei Konzeptionen in den Forschungsarbeiten erkennbar. Sie unterscheiden sich inhaltlich dadurch, daß während des Arbeitsprozesses

1. der Fahrer sich als Operateur auf dem Aggregat befindet (Konzeption I) und
2. das Lenken durch Automaten ausgeführt wird, die einen fahrerlosen Betrieb zulassen (Konzeption II).

Wichtige technische und ökonomische Kriterien für den Einsatz der

Tab. 1 Güteermkmale und agrotechnische Forderungen (Auszug aus TGL 33738)

Arbeitsart	Güteermkmale	
	Sachverhalt	Richtwerte
Drillsaat bei 6 - 12 km/h	Anschlußreihenabstand	zulässige Abweichung: $\pm$ 5 cm
Breitsaat mit Agrarflugzeug	Arbeitsbreite	zulässige Abweichung: bis 5 %
Dammverformung bei 7,2 - 8,4 km/h	Anschlußreihenabstand	zulässige Abweichung: $\pm$ 15 cm; - 5 cm
Kartoffellegen bei 1,2 - 4,8 km/h	Anschlußreihenabstand	zulässige Abweichung: + 15 cm; - 5 cm
Pflege und Pflanzenschutz bei 4,8 - 6,0 km/h	Arbeitsbild	Dämme nicht verschoben, Dammflanken nicht gepreßt
Hacken mit Maschine bei 3 - 6,0 km/h	Dammbearbeitung	Dammverschiebung und Dammflankenpressung nicht zulässig
Eggen, Striegeln, Bürsten bei 5,1 - 8 km/h	Arbeitsbreite	Überlappung gering halten Egge bis 5 %; Striegel bis 10 %
	Bearbeitung	lückenlos, keine unbearbeiteten Stellen, Zinken nicht im gleichen Strich laufen lassen
Pflanzenschutzmittel ausbringen bei 5,4 - 16,8 km/h	Arbeitsbreite	zulässige Abweichung: bis $\pm$ 0,5 m bei Reihenkulturen keine Abweichung von einem ganzzahligen Vielfachen der Reihenzahl der Bestelltechnik

Aggregate bei beiden Konzeptionen bestehen darin:

- die Arbeitsgüte zu verbessern und die agrotechnischen Forderungen unabhängig von Einsatzort und Einsatzzeit einzuhalten,
- die agrotechnisch möglichen Arbeitsgeschwindigkeiten einzuhalten und die konstruktiv gegebene Arbeitsbreite auszunutzen, um maximale Flächenleistungen zu erreichen,
- die spezifischen Aufwendungen mit automatischer Lenkung je bearbeitete Fläche im Vergleich zur manuellen Lenkung kleiner zu halten und
- die konzipierten Automatisierungseinrichtungen bei vorhandenen und zu erwartenden landtechnischen Arbeitsmitteln verwenden zu können.

Bei der Konzeption I hat der Fahrer als Operateur jederzeit die Möglichkeit, in das Prozeßgeschehen einzugreifen. Dadurch ist der Bedarf an zusätzlichen Betriebs-, Sicherheits- und Sicherheitsüberwachungseinrichtungen des Aggregats gering. Automatisierungssysteme zur Lenkung von Aggregaten, bei denen der Fahrer ersetzt wird, oder bei denen durch ein mit einem Fahrer besetztes Aggregat mehrere, z. B. zwei weitere Aggregate, gelenkt werden, bieten wesentliche Vorteile bei der Ausnutzung der menschlichen Arbeitskraft /1/. Sie erlauben theoretisch den fahrerlosen Einsatz mehrerer Aggregate und durch die Wahl der entsprechenden Programme den Einsatz von Aggregaten beliebiger Arbeitsbreite in einem Komplex, wenn es gelingt, die Arbeitsgeschwindigkeit der Aggregate zu synchronisieren, damit z. B. das Auffahren unterbunden wird. Die Aufwendungen für zusätzliche Ausstattungen, z. B. für die Betätigung der Kupplung, der Bremsen, der Hubvorrichtungen der Arbeitswerkzeuge, der Werkzeugeinstellung, der Informationsübertragung und -verarbeitung sowie der Sicherheits- und Überwachungssysteme sind sehr hoch. Sie werden dem Neuwert der Aggregate gleichgesetzt /2/. An Hand der Erfahrungen, die beim Einsatz von Forschungsmustern automatischer Lenksysteme für Aggregate mit Knicklenkung /3/ /4/ und Achsschenkellenkung der Vorderräder /5/ /6/ /7/ vorliegen, ist zu erwarten, daß eine theoretische Vorgabe der Bahntrajektorie des Sollfahrkurses aufgrund der Arbeitsbreite und Arbeitsgeschwindigkeit, z. B. durch ein Leitaggregat oder von Fixpunkten aus mit Hilfe der Befehlslenkung /8/ oder der Navigationslenkung /9/ unzureichend ist, da die Rückkopplung zwischen Soll- und Istfahrkurs ohne zusätzliches Messen des Istfahrkurses

nicht gegeben ist. Der Schlupf der Antriebsräder von durchschnittlich 12 - 20 % beim Fahren auf dem Acker und die sich in Abhängigkeit vom Weg ändernden Seitenkräfte infolge unterschiedlicher Bodenwiderstände, z. B. beim Pflügen, bedingen seitliche Verschiebungen des Istfahrkurses, die größer sind als die zulässigen Fahrkursabweichungen /3/ /9/ /10/. Hinzu kommen noch Abweichungen durch die gekrümmte Bodenoberfläche. Diese zufälligen Störgrößen machen es erforderlich, daß zur Befehls- oder Navigationslenkung noch Einrichtungen zur Messung der Fahrkursabweichung bezüglich des vorherigen Arbeitsganges eingesetzt werden.

Bei der Automatisierung der Lenkung nach den Konzeptionen I und II ergeben sich übergreifende und jede Konzeption betreffende spezifische Aufgaben (Tab. 2).

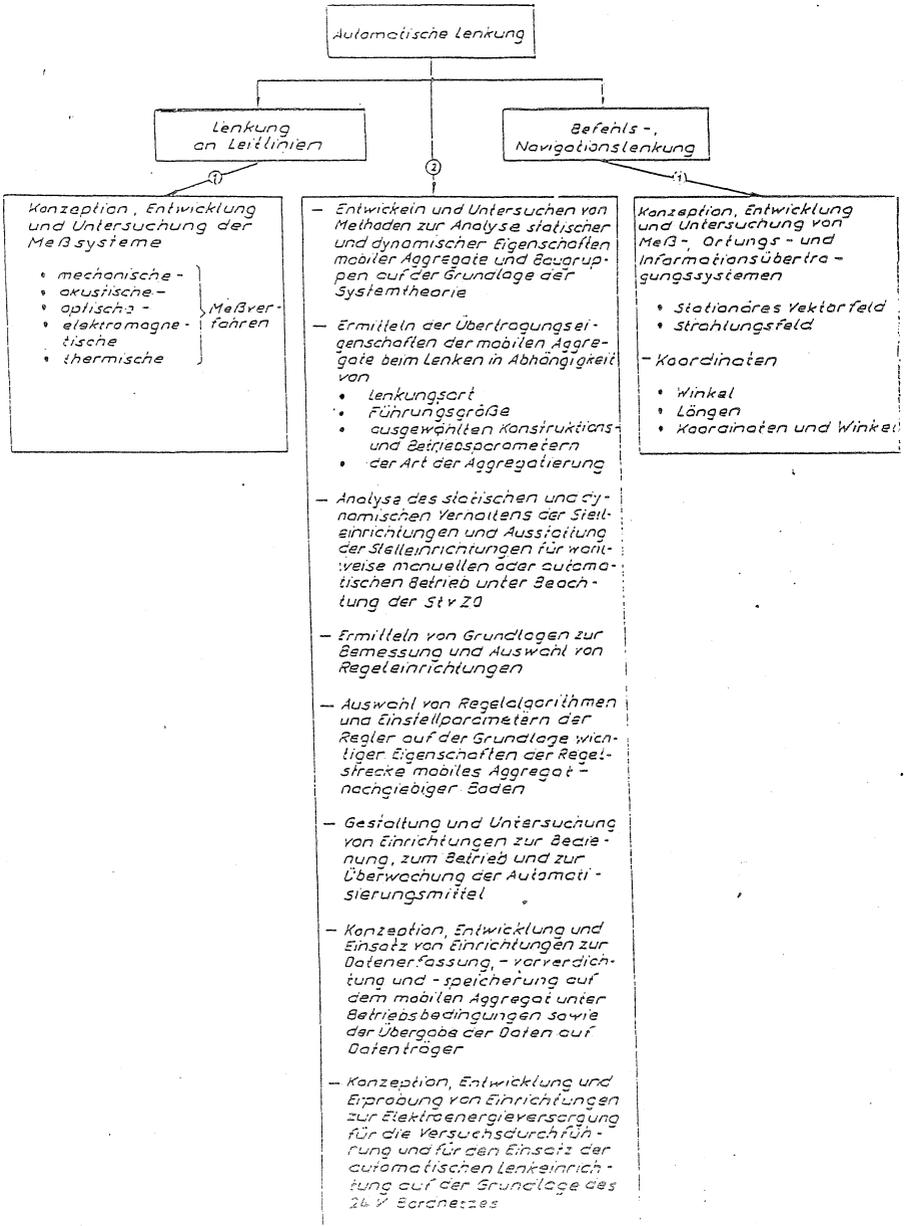
Die übergreifenden Aufgaben erstrecken sich auf

- die Analyse des statischen und dynamischen Verhaltens der Regelstrecke Aggregat - nachgiebiger Boden,
- die Beeinflussung der Regelbarkeit des Aggregats beim Lenken durch Konstruktionsparameter und Betriebsgrößen,
- die Synthese der Regelstrecke aus Konstruktionsparametern und Betriebsgrößen mit dem Ziel, geforderte Eigenschaften der Regelstrecke zur Optimierung des Lenkvorganges zu erhalten, um Konstruktionsrichtlinien daraus abzuleiten,
- die Analyse der Stelleinrichtung auf stationäre und dynamische Kennwerte der Lenkung,
- die Anwendbarkeit und Gültigkeit der Methoden zur Signal- und Systemidentifikation für die Untersuchung gelenkter mobiler Aggregate unter Einsatzbedingungen.

Die spezifischen Aufgaben beinhalten in beiden Fällen die Führungssysteme. Sie schließen ein die Art der Führungsgröße (Leitlinie), ihre meßtechnische Erfassung und Aufbereitung bis zur Ermittlung der Fahrkursabweichung und/oder Gierwinkelabweichung. Zusätzlich sind für Systeme entsprechend der Konzeption II die Aufgaben der Inbetriebnahme, des Betriebes, des Verhaltens bei Havarien und Möglichkeiten der manuellen Umsetzung von Einsatzort zu Einsatzort zu lösen.

In den vorliegenden Ausführungen werden Fragen der Führungssysteme für Lenkeinrichtungen entsprechend der Konzeption I näher un-

Tab. 2 Lenkungsarten und zu lösende spezifische ① und übergreifende ② Aufgaben



tersucht.

### 3 Meßeinrichtungen zum Lenken an Leitlinien

#### 3.1 Leitlinien als Führungsgrößen

Die während der Arbeit mit mobilen Aggregaten durch die Arbeitswerkzeuge entstehenden Bearbeitungsgrenzen, Furchen und Dämme, die als Leitlinien genutzt werden, erfordern zu ihrer Realisierung allgemein keine zusätzliche Aggregatausrüstung und damit den geringsten technischen Aufwand.

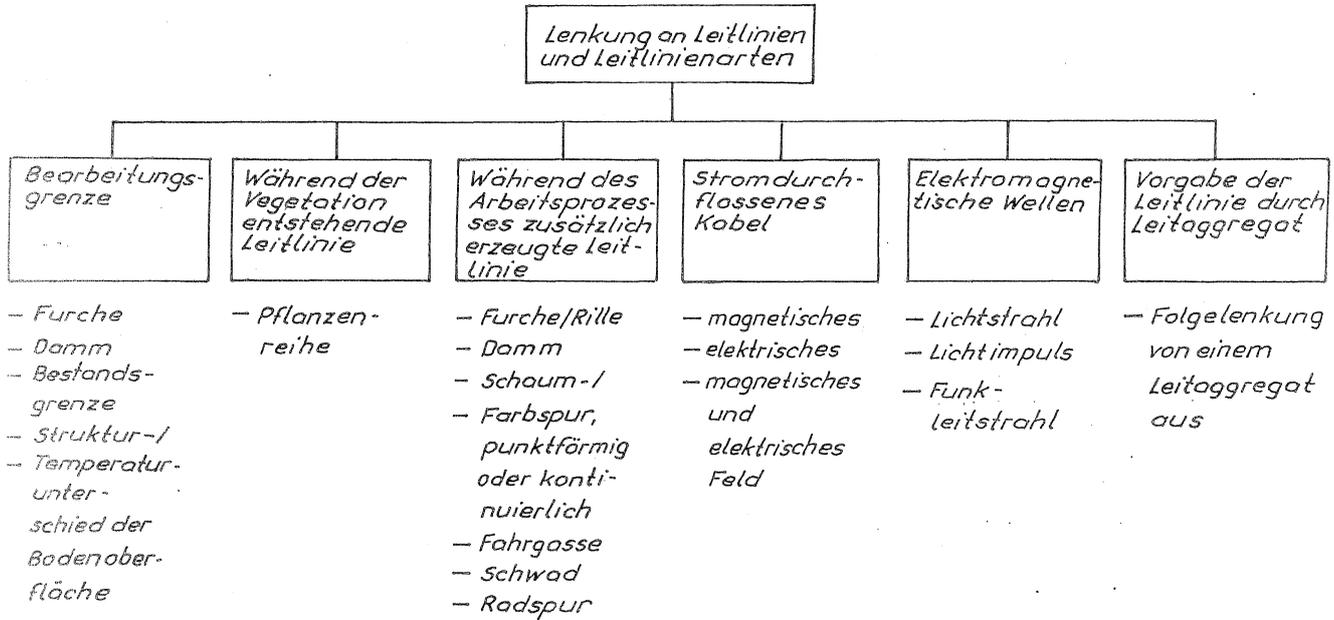
Für die durch Hilfsmittel erzeugten Leitlinien ist dagegen ein zusätzlicher Aufwand von zum Teil beachtlichen Kosten erforderlich /11/ /12/. Diese Einrichtungen bedingen in vielen Fällen nicht zu vernachlässigende Betriebsstörungen und Arbeitsbehinderungen im Bereich der Vorgewende und bei bewachsenen Flächen /13/ /8/.

Aus diesen Gründen ist anzustreben, die bei der Bearbeitung ohne zusätzlichen Aufwand oder die während der Vegetation entstandenen Leitlinien als Führungsgrößen zum Lenken zu nutzen (Tab. 3). Ihre Anwendung bei größeren Fahrgeschwindigkeiten ist eingeschränkt. Sie sind ab rd. 8 km/h gegenwärtig weder durch mechanische noch optische Meßfühler erfaßbar /14/. Mechanischen Meßeinrichtungen werden besonders durch die geringe Festigkeit der Leitlinien hinsichtlich der Führungssicherheit bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten nicht zu überwindende Grenzen gesetzt /15/.

Von den mittels Hilfsstoffen erzeugten Leitlinien wurde das Ausbringen von Schaumspuren im Rahmen von Forschungsarbeiten untersucht /8/ /16/. Schaum läßt sich verhältnismäßig einfach mit Hilfe der Abgase des an Aggregaten vorhandenen Verbrennungsmotors erzeugen sowie ausbringen. Die Grundsubstanz zur Schaumbildung ist gering. Bei einer Arbeitsbreite des Aggregats von 10 m wird für eine durchgehende Schaumspur mit dreieckförmigem Querschnitt (Grundlinie 40 mm, Höhe 5 mm) ein Schaumvolumen von 0,08 m<sup>3</sup>/ha für die Leitlinie benötigt. Nachteilig ist, daß Schaumspuren oder Schaumtupfen nur kurze Zeit erkennbar sind /8/. Außerdem ist die Schaumdichte so gering, daß derartige Leitlinien durch Wind weggeblasen werden. Das sind die hauptsächlichsten Gründe, weshalb dieses Verfahren bisher keine Praxisreife erreichte.

Im innerbetrieblichen Transportwesen werden Flurförderer und Fahr-

Tab. 3 Leitlinien für das Lenken mobiler Aggregate



zeuge häufig an elektromagnetischen und elektrischen Feldern von wechselstromdurchflossenen Kabeln entlang vorgegebener Fahrwege geführt /18/ /19/. Eine Anwendung dieses Prinzips zur Lenkung mobiler Aggregate in der Feldwirtschaft ist bisher jedoch nicht bekannt. Außer den hohen Kosten für die Verkabelung der Ackerflächen sind noch beachtliche technische Probleme zu lösen /11/, so daß auch in den nächsten Jahren nicht mit der Anwendung derartiger Leitlinien in der Feldwirtschaft zu rechnen sein wird. Auch beim Einsatz eines Bordrechners, der in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite des Aggregats und aus der elektromagnetischen Feldstärke die Führungsbahn berechnet, werden die Kosten für das Leitsystem bei einem Kabelabstand von 10 m noch auf 450 - 500 DM/ha kalkuliert /11/. Die dabei zu erwartenden theoretischen Fehler liegen im Bereich von + 0,1 m für Arbeitsbreiten bis zu 6 m bei Fahrgeschwindigkeiten um 4 - 6 km/h /11/. Das Verlegen der Leitkabel ist schwierig, da sie in einer Tiefe von mindestens 600 - 800 mm liegen müßten, damit z. B. Meliorationsmaßnahmen durchgeführt werden können, ohne die Kabel zu beschädigen. Infolge dieser Tiefe ergeben sich Schwankungen der Homogenität des das Kabel umgebenden elektromagnetischen Feldes, die sich auf den Meßfehler auswirken und nicht vorher bestimmbar sind, weil sich die Bodenparameter im allgemeinen entlang des Fahrweges ändern.

Diese Erkenntnisse führten zu Arbeiten mit dem Ziel, Laserstrahlen und Funkleitstrahlen auf ihre Eignung als Leitlinien zu untersuchen /19/ /20/. Die bei ihrem Einsatz erwarteten Vorteile

- Unabhängigkeit von der Tageszeit, von den sich im Tagesverlauf ändernden Lichtverhältnissen und Witterungsbedingungen, von der Bodenart und dem Bodenzustand,
- kleine Fahrkursfehler über große Entfernungen,
- theoretisch vernachlässigbare Fehlerfortpflanzung,
- Unabhängigkeit von der Arbeitsbreite, Arbeitsgeschwindigkeit und der Art der Aggregate sowie
- gleiches Meßprinzip für alle in Frage kommenden Einsatzfälle

sind gute Gründe, derartige Untersuchungen durchzuführen. Dem entgegen stehen gegenwärtig jedoch die Nachteile /21/

- große Strahlungsleistung des Lasers,
- Bereitstellen der elektrischen Energie für den Laserbetrieb,
- umfangreiche, für die Landwirtschaft untypische Arbeitsschutz-

- maßnahmen,
- schrittweiser Transport des Senders und erforderlichenfalls auch dessen Einrichtung zur Energieversorgung in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite, woraus ein hoher Arbeitsaufwand zu erwarten ist,
  - großer meßtechnischer Aufwand zum Ausrichten des Laserstrahls und -senders in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite und dem sehr kleinen zulässigen Fehler. Der zulässige Justierfehler darf beispielsweise bei einer Abweichung des Sollstrahls von + 0,1 m auf 1000 m Feldlänge 0,01 % nicht überschreiten.

Die technischen und die daraus resultierenden ökonomischen Kriterien lassen die Anwendung von Leiteinrichtungen auf der Grundlage der Lasertechnik in der Landwirtschaft gegenwärtig nicht erwarten.

Ähnlich verhält es sich mit der Navigationslenkung. Für Funkleitstrahlen mit einer Sendefrequenz von 10 MHz sind zur Positionsbestimmung Meßzeiten im Bereich von  $10^{-9}$  s erforderlich. Derartige Zeitmessungen machen vor jedem Einsatz eines Aggregats einen Abgleich der Geräte der Funkzentrale mit denen im Aggregat installierten erforderlich. Die dazu benötigten Meßeinrichtungen sollten im Interesse eines guten Abgleichs um eine Zehnerpotenz genauer sein.

Infolge der aus der Positionsbestimmung sich ergebenden technischen Schwierigkeiten ist vorerst eine Anwendung der Navigationslenkung in der Landwirtschaft ohne eine zusätzliche Erfassung des Fahrkurses schwierig, da agrotechnische Forderungen (Tab. 1) bei vielen Arbeiten geringere Fahrkursabweichungen erfordern, als das eine Navigationslenkung gegenwärtig zuläßt.

Seit Jahren werden Versuche unternommen, von einem manuell gelenkten Traktor aus die Leitlinien als Führungsgröße für bis zu zwei weiteren automatisch gelenkten Traktoren vorzugeben /22/. Die Kopplung an den Leittraktor erfolgt über Funk oder durch mechanische Verbindungen /23/. Derartige Lösungen werden im Zusammenhang mit dem Einsatz von Robotern in der Landwirtschaft gegenwärtig auf breiter Ebene untersucht /9/ /19/ /23/. Die dabei erwarteten arbeitswirtschaftlichen Vorteile sind beachtlich und resultieren aus der Freisetzung von Arbeitskräften /24/. Eine Anwendung derartiger Systeme wird z. Z. aus der Sicht der bisherigen Erkenntnisse durch

eine Vielzahl noch ungelöster Aufgaben (Tab. 2 und 4) erschwert.

### **3.2 Wirkungsweise von Meßeinrichtungen zur Erfassung bei der Bearbeitung entstehender Leitlinien**

Die Meßeinrichtungen erfassen den Verlauf der Leitlinien in Form der für jede Meßeinrichtung festgelegten Informationsparameter. Informationsparameter können Größen sein, die

- den seitlichen Abstand des Aggregats zur Leitlinie,
- den Stellungswinkel der Aggregatlängsachse zur Leitlinie oder
- beide Größen enthalten.

Der Verlauf von Pflanzenreihen, Furchen und Strukturgrenzen wird ebenfalls auf diese Größen zurückgeführt, weil sich dadurch verhältnismäßig einfache Einrichtungen zur Ermittlung der Fahrkursabweichung ergeben.

Zum Lenken an Leitlinien eingesetzte Meßeinrichtungen bestehen zu-  
meist aus Meßfühler, Umformer, Wandler, Verstärker und Halteein-  
richtung. Die verwendeten Meßfühler und die sich im Meßkanal an-  
schließenden Umformer werden hauptsächlich durch Eigenschaften der  
Leitlinie bestimmt, da deren Verlauf unter allen in Frage kommen-  
den Einsatzbedingungen zuverlässig ohne Phasenverschiebung des Meß-  
signals erfaßt werden muß. An dieser Stelle des Regelkreises einer  
automatischen Lenkung auftretende Unzulänglichkeiten lassen sich  
durch nachgeordnete Maßnahmen nicht kompensieren. Deshalb ist eine  
zuverlässige Erfassung der Leitlinie von besonderer Bedeutung.

Eingesetzt werden

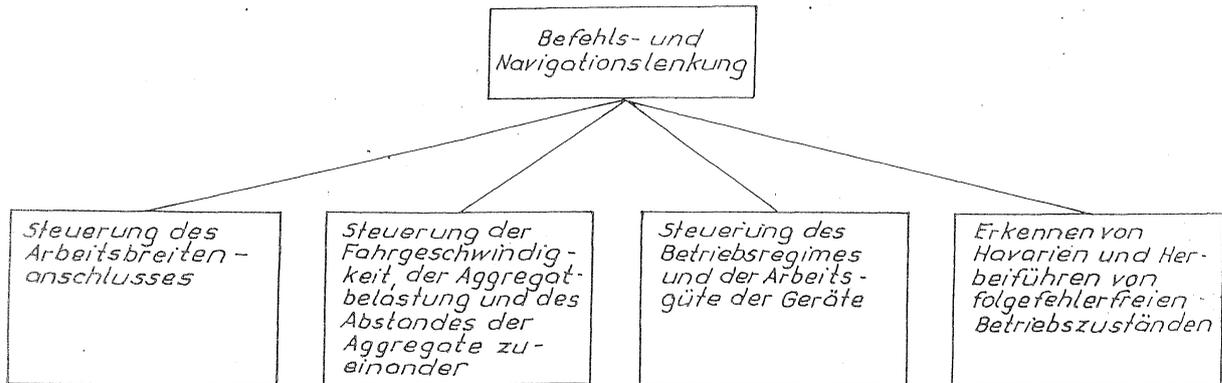
- mechanische Meßfühler in Verbindung mit Umformern,
- mechanische Meßfühler in Verbindung mit Wandlern,
- akustische Meßfühler und
- optische Meßfühler.

## **4 Meßfühlersysteme**

### **4.1 Mechanische Meßfühler in Verbindung mit Umformern**

Die Meßwertgewinnung und -übertragung erfolgt zweckmäßig mecha-  
nisch, wenn genügend mechanische Energie mit der Meßgröße aufgenom-  
men werden kann und ein einfacher Aufbau möglich ist. Reicht die

Tab.4 Aufgaben der Befehls- und Navigationslenkung



aufgenommene Energie nicht aus, und ist die räumliche Trennung von Meßwertgeber und Verstärker ein Hindernis für den Einsatz einfacher mechanischer Glieder, dann muß das Meßsignal in eine besser nutzbare Energieart gewandelt werden. Außerdem haben nicht alle Leitlinien ausreichende Festigkeit und sind auch nicht immer so geformt, daß die mit der Meßgröße aufgenommene Energie ausreicht, Meßfühler und nachfolgende Stelleinrichtung zu versorgen. Mechanische Meßfühler genügen der Übertragungsfunktion:

$$G_M(p) = \frac{\mathcal{L}(p)}{y(p)} = K_M \quad (1)$$

mit  $y$  Aussteuerung der Meßeinrichtung in m  
 $\mathcal{L}$  Auslenkung des Meßfühlers in rad  
 $K_M$  Übertragungsfaktor der Meßeinrichtung in rad/m

Der Hauptvorteil mechanischer Meßfühler besteht in ihrem einfachen und robusten Aufbau sowie in der gut erkennbaren Funktionsweise, was für ihre Instandhaltung von großer Bedeutung ist.

Nachteile sind:

- Die Notwendigkeit einer Kräfte sicher aufnehmenden kopierfähigen Leitlinie.
- Relativ komplizierte mechanische Umformung der gemessenen Fahrkursabweichung in ein weiter verwendbares Signal.
- Nichtlinearitäten infolge Reibung und Lose in den Gliedern.

## 4.2 Mechanische Meßfühler in Verbindung mit Wandlern

### 4.2.1 Mechanisch-hydrostatische Meßfühler

Der Einsatz dieser Meßfühler erfordert Leitlinien von hoher mechanischer Festigkeit. Bei allen bisher bekanntgewordenen Systemen dieser Art /25/ wird die Abweichung von der Führungsgröße mittels mechanischer Meßfühler erfaßt, um damit ein hydrostatisches Wegeventil auszulenken. Das ausgelenkte Wegeventil gibt einen leistungsstarken Ölstrom frei, wodurch die Lenkeinrichtung zur Fahrkurskorrektur gesteuert wird.

Durch die Rückführung ergibt sich für hydrostatische Meßeinrichtungen nachfolgende Übertragungsfunktion:

$$G_M(p) = \frac{\mathcal{L}(p)}{y(p)} = \frac{K_M}{1 + p T_M} \quad (2)$$

- y Aussteuerung des Steuerkolbens in m
- $\mathcal{L}$  Auslenkung des Meßfühlers in rad
- $K_M$  Übertragungsfaktor in rad/m
- $T_M$  Zeitkonstante in s.

Obwohl die Meßfühler einfach aufgebaut sind und hinsichtlich der Einstellung, Wartung und Instandhaltung an die Qualifikation des Fahrers keine besonderen Anforderungen stellen, werden sie zu- meist nur beim Lenken von Rübenerntemaschinen angewendet.

#### 4.2.2 Mechanisch-elektrische Meßfühlersysteme

Der Abstand zwischen der Leitlinie und einem Bezugspunkt des Ag- gregats kann durch einen oder mehrere mechanische Meßfühler erfaßt werden. Mehrere nacheinander angeordnete Meßfühler dienen der Ver- besserung der Betriebssicherheit und gleichfalls zur Glättung der Meßwerte. Meßgröße hierbei kann der Abstand oder ein Winkel sein, wie z. B. bei der automatischen Lenkung von Mähdreschern, Rüben-, Reis-, Tee- und Maiserntemaschinen.

Dieses Prinzip wird auch für das Lenken beim Pflügen und bei Pflie- gearbeiten in Kartoffelbeständen erfolgreich angewendet /15/. Da- zu sind spezielle Meßfühler erforderlich. Die Auslenkung des Meß- fühlers wird durch Differentialtransformatoren, Kondensatoren oder ohmsche Widerstände in eine Spannungsänderung als Abbildgröße der Fahrkursabweichung umgeformt und dem Regler zugeführt. Der sich dabei ergebende Zusammenhang zwischen Auslenkung des Meßfühlers und der Spannungsänderung ist annähernd linear und kann als P- Glied dargestellt werden.

Auch bei frequenzanaloger Umformung der Signale der Fahrkursabwei- chung zwecks weiterer digitaler Verarbeitung mit einem Mikropro- zessorregler reicht die Linearität der statischen Kennlinie aus, wie es Versuchsergebnisse unter Praxisbedingungen zeigten /26/.

#### 4.3 Akustische Meßfühlersysteme

Akustische Meßfühler lassen einen tageslichtunabhängigen, berüh- rungslosen Einsatz beim Erfassen von Leitlinien zu und sind nahe- zu wartungsfrei. Hauptsächlich deshalb wurden Verfahren mit Ultra-

schall-Meßeinrichtungen seit langem zur Erfassung von Leitlinien für das Lenken mobiler Aggregate untersucht /17/. Von den verschiedenen Möglichkeiten, den Leitlinienverlauf mittels Ultraschall zu erfassen, konnte nur das Impuls-Echolot-Verfahren den dynamischen und statischen Anforderungen, wie sie sich aus dem Lenkprozeß ergeben, annähernd genügen (Abb. 1). Bedingt durch die Eigenschaften der derzeit zur Verfügung stehenden elektro-akustischen Wandler und den an Leitlinien sich ergebenden Schallreflexionsbedingungen gelang es noch nicht, praxisreife Maßeinrichtungen zu entwickeln.

Der für den Übertragungskanal Sender - Luft - Ackerboden - Luft - Empfänger durch Experimente ermittelte günstigste Frequenzbereich liegt zwischen 20- 60 kHz /13/. Der Einsatz dieser Maßeinrichtung ist gegenwärtig auf scharfkantige Furchen und Dämme, wie sie z. B. beim Pflügen oder Kartoffelhäufeln entstehen, mit einer bestimmten Höhendifferenz  $\Delta h$  begrenzt. Die Höhendifferenz ergibt sich für kontinuierlichen Sende- und Empfangsbetrieb bei ungestörten Umgebungsbedingungen aus der Gleichung:

$$\Delta h = \frac{1}{2} f \bar{\lambda} t \quad (3)$$

- h Höhendifferenz zwischen den reflektierenden Flächen in m
- f Frequenz der gesendeten Schallwellen in Hz
- $\bar{\lambda}$  Wellenlänge der gesendeten Schallwellen in m
- t Schalllaufzeit in s,

#### 4.4 Optische Meßfühler

Informationsträger bei optischen Meßfühlern sind elektromagnetische Wellen (Wellenlänge von rd. 380 - 1100 nm) in Form des Lichts. Das Prinzip der Meßfühler wird bestimmt von den reflektierenden Substanzen (z. B. Boden, Steine, Pflanzen), die die Leitlinie bilden, von den Eigenschaften der verwendeten Lichtquelle und den Umgebungsbedingungen. Die Umgebungsbedingungen charakterisieren das Einsatzgebiet und die im Meßfühler eingesetzten Linsen- und Blendsysteme /27/. Ausnutzbare lichttechnische Größen sind der Lichtstrom  $\Phi_F$  und die Lichtstärke  $I_F$ . Sie werden beeinflusst von der lichtreflektierenden Substanz, was in deren lichttechnischen Stoffkennzahlen, wie Reflexionsgrad  $\rho_F$ , Absorptions-

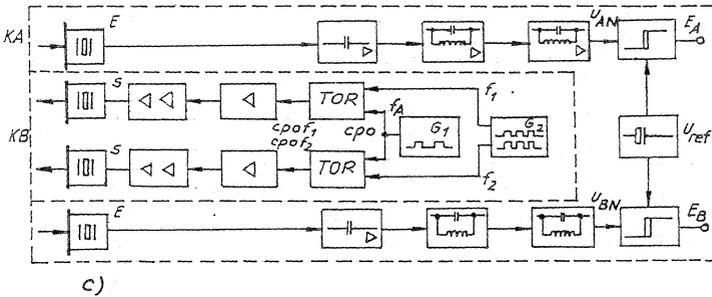
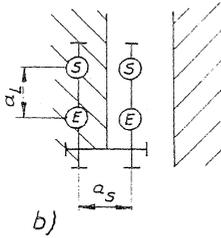
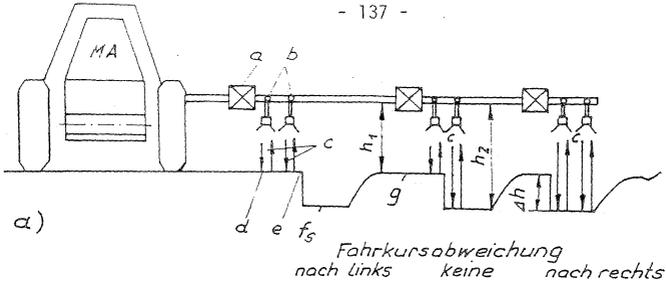


Abb. 1 Ultraschall-Meßeinrichtung 1131

- a) Meßprinzip  
 MA mobiles Aggregat; a Ausleger; b Meßfühler;  
 c Schallfeld; d un bearbeiteter Boden; e Furchen-  
 kante;  $f_s$  Furchensohle; g bearbeiteter Boden;  $\Delta h = h_2 - h_1$
- b) Meßfühler am Versuchstraktor über der Furche  
 S Sender; E Empfänger;  $a_s$  Seitenabstand;  
 $a_L$  Längsabstand;
- c) Übersichtsschaltplan  
 KA, KB Meßkanäle A und B;  $f_1, f_2$  Sende-  
 frequenzen;  $f_A$  Abtastfrequenz; cpo Grundtakt;  
 $cpo_{f_1}, cpo_{f_2}$  Sendetakte;  $E_A, E_B$  Echoimpulse;  
 $U_{ref}$  Referenzspannung

grad  $\epsilon$  zum Ausdruck kommt. Von Einfluß auf diese Kennzahlen ist außerdem die Wellenlänge der Strahlung /28/.

In Abhängigkeit des Weges mobiler Aggregate verändern sich entlang von Leitlinien Bodenart, -zusammensetzung sowie Bodenoberflächenfeinstruktur und Bodenfeuchte sehr stark. Das Auflockern und Durchmischen des Bodens führt zur Veränderung der Bodenoberflächenstruktur und kurzzeitig auch zur Veränderung der Oberflächentemperatur. Daraus resultieren ständig wechselnde Reflexions- und Beugungseffekte des Lichts an der Bodenoberfläche und ergeben im Vergleich zum unbearbeiteten Boden andere Remissionsgrade. Bei allen bisher bekanntgewordenen optischen Meßfühlern werden durch fotoelektrische Aufnehmer Teile der unbearbeiteten und der bearbeiteten Bodenoberfläche erfaßt. Die einfachste Art zur Erkennung der Bearbeitungsgrenze als Leitlinie ergibt sich aus der Messung der unterschiedlichen Lichtströme, da die unbearbeitete Bodenoberfläche zumeist einen größeren Lichtstrom abstrahlt /27/ /28/.

Die auf den Meßfühler einwirkenden Störgrößen werden verursacht durch

- Schwankungen der Lichtstärke in Abhängigkeit von der Tageszeit und der im allgemeinen wechselnden Bewölkung im Tagesverlauf,
- stoffliche Ungleichmäßigkeit der Bodenoberfläche und deren Bewuchs sowie
- Arbeitspunktdrift der fotoelektrischen Wandler (z. B. nicht zu vermeidende Alterung, Verschmutzung).

Obwohl aus Meßdaten des Informationsträgers im Infrarotbereich Pflanzen- und Bodenstrukturen sicher zu unterscheiden sind, und die pyrotechnischen Eigenschaften der Bodenoberfläche bei der Bearbeitung des Bodens sich verändern, gelang es bisher noch nicht, diesen Effekt zum Erkennen von Bearbeitungsgrenzen auszunutzen. Zu erwarten ist, daß mit der Entwicklung spezieller Bauelemente der Infrarottechnik neue Impulse eingeleitet werden, da für Meßeinrichtungen im Infrarotbereich die zu ortenden Gegenstände nicht angestrahlt zu werden brauchen, wenn sie sich in ihrer Temperatur oder ihrem Emissionsgrad unterscheiden. Daraus ergeben sich Möglichkeiten zur Meßwerterfassung von Bearbeitungsgrenzen, die unabhängig von Lichtquellen sind.

Die Eignung von Meßeinrichtungen zur Erfassung des Leitlinienver-

laufs mit Licht im Infrarotbereich ist noch Gegenstand von Grundlagenuntersuchungen. Erste Untersuchungsergebnisse des optischen Meßprinzips werden für Wellenbereiche des sichtbaren Lichts (380 - 780 nm) angegeben /28/.

#### 4.5 Optische Bilderkennungseinrichtungen

Optische Bilderkennungseinrichtungen erfassen von Systemen ausgehende elektromagnetische Wellen, wobei Oberflächen und deren Strukturierung auf einem Detektor abgebildet werden. Die angewendeten Meßfühler bestehen aus punktförmigen Detektoren, die als Einzelelement, in einer Linie oder auf einer Fläche verteilt als Funktionseinheit, ausgebildet sind. Sie können zur Unterscheidung von Hell - Dunkel - Grenzen oder auch durch entsprechende Bemessung der Halbleitermaterialien zur Farberkennung für bestimmte Wellenlängen ausgelegt sein.

Ziel aller bisher bekanntgewordenen Meßfühler zur Bilderkennung ist es, ähnlich dem menschlichen Auge Struktur- und Farbmerkmale ausgewählter betrachteter Abschnitte der Umwelt zu erfassen. Die dabei zu lösende technische Aufgabe ist meistens mit einer Bewegungssteuerung verbunden. Dazu ist die Verarbeitung einer Vielzahl von Merkmalen in sehr kurzer Zeit (meistens Mikrosekunden-Bereich) unumgänglich, was erst mit der Entwicklung billiger und leistungsfähiger Mikroprozessoren möglich wurde.

Die Nutzung der Daten zur Bildverarbeitung erfolgt nach zwei Grundmodellen (Abb. 2) und wurde entsprechend dem Bearbeitungsumfang bis hin zu zellularen Modellen weiterentwickelt. Die Unterteilung der Informationsverarbeitung zur Bilderkennung in Reihenstrukturen (Abb. 2a) läßt eine bessere Trennung der Hardware und Software einschließlich der Standardisierung zu, weil die zu lösenden Einzelaufgaben eindeutig begrenzt werden können. Dieses Modell widerspiegelt aber die Vorgänge bei der Bilderkennung unzureichend, weil zwischen der Merkmalextraktion und der daraus resultierenden Mustererkennung Rückwirkungen bestehen. Aus diesem Grunde wurde das Rückführmodell entwickelt (Abb. 2b).

Bei der Datenverarbeitung zur Bilderkennung mit herkömmlichen sequentiellen Rechnern ergibt sich ein uneffizienter Betrieb. Deshalb werden dafür zellulare Automaten gefordert /29/. Bei diesen



Automaten werden Bildpunktspeicher und Verarbeitungseinheit in einem Funktionselement zusammengefaßt (Abb. 2c). Durch die zellularen Automaten wird der das Verfahren verzögernde Datenzugriff nahezu unwirksam, weil Daten der jeweiligen Verarbeitungseinheit und Nachbardaten über die Verbindung der Funktionselemente der Verarbeitungseinheit zur Verfügung stehen. Hierzu sind noch teure Rechnersysteme für die Bilderkennung erforderlich (Signalprozessoren). Das scheint der Hauptgrund dafür zu sein, daß trotz der Vorteile, die optische Bilderkennungseinrichtungen haben, ihre forschungsmäßige Bearbeitung zum Lenken mobiler Aggregate erst beginnt. Weitere Gründe dafür, daß derartige Einrichtungen noch nicht angewendet werden, dürften in der unzureichenden Kenntnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten über die Wechselwirkungen zwischen Stoffparametern und erkennbarem Abbild liegen.

## 5 Zusammenfassung

Ausgehend von den Anforderungen an die Lenkung, werden Aufgaben für die gegenwärtig in der Forschung erkennbaren Konzepte zur Spurführung mobiler Aggregate dargestellt. Die bei der Spurführung zulässigen Fahrkursabweichungen machen die Anwendung von Meßverfahren zur Positionsermittlung bezüglich der vorherigen Fahrspur auch bei Verfahren der Navigationslenkung erforderlich. Aus diesem Grunde werden ausgewählte Eigenschaften der bekanntgewordenen Meßverfahren zusammengestellt und durch Untersuchungsergebnisse ergänzt.

## 6 Literatur

- /1/ Roboter steuert Traktor  
agrartechnik. - Berlin 33(1983)10. - S. 473
- /2/ Kästner, E.: Einsatzmöglichkeiten automatisch spurgeführter Landfahrzeuge  
Wiss. Zeitschr. d. Hochschule für Verkehrswesen. - Dresden 18(1971)4. - S. 961 - 971
- /3/ Jofinov, S.A.: Novoe v éksploatacii mašinno-traktornogo-parka. - Moskva : Znanie, 1980. - S. 41 - 55  
Neues über den Einsatz des Maschinen-Traktor-Parkes
- /4/ Entwicklung von Meß-, Regel- und Stelleinrichtungen zur automatischen Lenkung von Traktoren : Bericht A 1 /  
Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg. - Berlin, 1982. - 108 S.
- /5/ Heidel, K.: Analyse des Stellvorgangs beim Lenken mobiler landwirtschaftlicher Aggregate mit ausgewählten Lenkeinrichtungen. - 1980. - 77 S.  
Berlin, Ingenieurhochschule, Sekt. MP, Diplomarb.
- /6/ Bergmann, J.: Analyse des Verhaltens mobiler landwirtschaftlicher Aggregate beim Fahren parallel zur Schichtlinie. - 1980. - 55 S.  
Berlin, Ingenieurhochschule, Sekt. MP, Diplomarb.
- /7/ Young, St.C. ; Schafer, R.L. ; Johnson, C.E.: A microcomputer - based vehicle guidance controller  
St. Joseph, Mich.: ASAE, 1980. - 7 S.  
(Paper/ASAE; 80 - 1557)  
Ein Kontrollinstrument zur Fahrzeuglenkung auf Microcomputerbasis
- /8/ Bredschneider, B.: Spuranschlußfahren : Ausarbeitung der Aufgabenstellung, Anwendungsempfehlungen zum Fahrspurprinzip / VEB Bodenbearbeitungsgeräte Leipzig. - Leipzig, 1979. - 22, 4 S.
- /9/ Gerrish, J.B. ; Surbrook, T.C.: Mobile Robots in Agriculture. - In: Robotics and intelligent machines in Agriculture : Proeeding; Tampa - Florida, 2. - 4. Oct. 1983 / ASAE. - St. Joseph, Michigan, 1983. - S. 30 - 41  
Bewegliche Roboter in der Landwirtschaft
- /10/ Kalk, W.-D.: Zur rationellen Nutzung von Energie bei der Bodenbearbeitung  
agrartechnik. - Berlin 31(1981)8. - S. 370 - 373
- /11/ Jahns, G. ; Walter, K.: Ökonomische und technische Aspekte des Einsatzes fahrerloser Schlepper in landwirtschaftlichen Betrieben  
Landbauforschung. - Völkenrode 23(1973)1. - S. 57 - 70

- /12/ Folkerts, H. ; Kouwenhoven, J.K. ; Perdok, U.D.:  
Mogelijkheden voor de rijbanenteelt  
Landbouwmecanisatie. - Wageningen 32(1981)5. - S. 499 -  
503  
Möglichkeiten für das Spurbahnbanbauverfahren
- /13/ Ahrens, F.: Aufbau und Erprobung einer Pflugfurchen erfas-  
senden akustischen Meßeinrichtung zur automatischen Len-  
kung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate. - 1982. -  
107 S.  
Berlin, Ingenieurhochschule, Sekt. MP, Diss. A
- /14/ Harries, G. ; Ambler, B.: Automatic ploughing : A tractor  
guidance System using optoelectronic remote sensing  
techniques and microprocessor based controller  
Journal of agricultural engineering research. - London  
26(1981)1. - S. 33 - 53  
Automatisches Pflügen : Ein Traktorlenksystem, welches  
fernbediente optisch-elektronische Meßtechniken und ein  
auf Mikroprozessor basierendes Regelorgan nutzt
- /15/ Kollar, L.: Beitrag zur Automatisierung der Lenkung zwei-  
gliedriger allradangetriebener Aggregate auf nachgiebigem  
Boden. - 1976. - 106, 98S.  
Magdeburg, TH, Sekt. Kybernetik und Elektrotechnik, Diss. A
- /16/ Walter, F.: Meßtechnische Erfassung von Leitlinien für das  
automatische Lenken mobiler Aggregate bei großen Arbeits-  
breiten  
agrartechnik. - Berlin 30(1980)3. - S. 98 - 101
- /17/ Der Roboter auf dem Feld  
Freie Welt. - Berlin (1980)115. - S. 24 - 25
- /18/ Jahns, F.: Einsatz induktiver Leitkabelsysteme zur Bear-  
beitung einer Fläche mit fahrerlosen Fahrzeugen. - 1976. -  
87 S.  
Braunschweig, TU, Fak. für Maschinenbau u. Elektrotechnik,  
Diss. A
- /19/ Elliott, E.: Soviet land navigation  
Journal of terramechanics. - Oxford 19(1982)4. - S. 217 -  
223  
Landnavigation in der UdSSR
- /20/ Frumovič, V.L.: Učēt vlijanija preverhnosti zemli v radio-  
sistemah upravlenija mašinno-traktornymi agregatami  
Traktory i sel'hozmašiny. - Moskva (1980)3. - S. 19 - 20  
Berechnung des Einflusses der Bodenoberfläche auf die  
Radiosysteme der Steuerung von Maschinen- und Traktoren-  
agregaten
- /21/ Černicer, A.V.: Optimal'noe upravlenie dviženiem mašinno-  
Traktornogo agregate pri nezavisimom sledoobrazovanii  
Mehanizacija i elektrifikacija sel'skogo hozjajstva. -  
Moskva (1981)11. - S. 37 - 40  
Optimale Lenkung von Maschinen-Traktoren-Aggregaten durch  
unabhängige Nachführung

- /22/ Litinskij, S.A.: Avtomatizacija voždenija samohodnyh mašin. - Moskva - Leningrad : Verl. Energija, 1966. - S. 16 - 40  
Automatisierung der Lenkung selbstfahrender Maschinen
- /23/ Genike, A.A. ; Malorackij, L.G. ; Frumovik, V.: Postroenie fuzovyh radiodal'номеров dlja upravlenija masinno-traktornymi agregatami  
Traktory i sel'hozmašiny. - Moskva (1982)5. - S. 26 - 27  
Aufbau eines Funknetzes zur Leitung von Maschinen-Traktorenagregaten
- /24/ Poljak, A. Ja. ; Rusanov, V.A. ....: Kombinirovannaja sistema upravlenija na traktore T - 150 K  
Mehanizacija i ělektifikacija sel'skogo hozjajstva. - Moskva (1981)11. - S. 31 - 34  
Kombiniertes System der Lenkung für den Traktor T - 150 K
- /25/ Kirste, A. ; Kollar, L. ; Mathesius, E.: Elektrohydraulische Lenkeinrichtungen für mobile Aggregate : Vortrag; Magdeburg, 5. - 6. 11. 1985 / TH Magdeburg, Sekt. Maschinenbau; VEB Kombinat Orsta-Hydraulik Leipzig; Fachausschuß Hydraulik u. Pneumatik im Fachverband Maschinenbau der KDT
- /26/ Entwicklung von Meß-, Regel- und Stelleinrichtungen zur automatischen Lenkung von Traktoren : Bericht A 4 / Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg. - Berlin, 1984. - 163 S.
- /27/ WP A 01 b / 167 830 DD. Vorrichtung zum berührungslosen Abtasten der Bearbeitungsgrenze bei Traktoren, fahrbaren Landmaschinen und Aggregaten zur Gewährleistung des Anschlußfahrens und der Spurhaltung. - 3 S.
- /28/ Automatische Steuerung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate : Bericht G 1 / Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg. - Berlin, 1978. - 77 S.
- /29/ Gemmar, P.: Prozessoren und Systeme für die Bildverarbeitung. - In: Mustererkennung 1983 : Vorträge; Karlsruhe, 11. - 13. Okt. 1983. - 5. DAGM-Symposium. - Berlin; Offenbach : VDE-Verl., 1983. - S. 179 - 196  
(VDE-Fachberichte, 35)

AUTOMATISCHE STEUERUNG VON LANDWIRTSCHAFTLICHEN GERÄTEN

R.P. van Zuydam  
Institut für Landtechnik IMAG-DLO  
Postfach 43, NL-6700 AA Wageningen  
Niederlande

*Abstract:*

*Automatic and very accurate guidance of row-type seedbed preparators, nutrient applicators, drilling or planting machines, hoeing implements and spraying equipment can reduce input of both energy and nutrients, water and agrochemicals, as contribute to the protection of the environment and increase product quality.*

*Stationary laser technology is used to guide implements in an automatic way over the field to carry out crop growing actions in very narrow areas (bands) only, and to reduce the tilled and nursed surface to less than one third of the traditional. The system is applicable in row type crops only, like sugarbeet, potatoes, corn and most vegetables.*

*Increased efficacy of alternative weed control by mechanical means and nutriment of crop rows only are the arguments for this research. Inputs on herbicide and nutrients were decreased by 60% and 25% respectively at the 1991 trials in sugarbeet, resulting in a yield of 98.1 % of the traditional growing method.*

0. Einführung

Hier wird ein System zur automatischen Steuerung von landwirtschaftlichen Geräten vorgestellt, das auf dem Versuchsbetrieb "Oostwardhoeve" des niederländischen Forschungsinstituts IMAG-DLO seit drei Jahren im Einsatz ist. Es handelt sich um ein eindimensionales System für Reihenkulturen, das die Feinsteuerung der Geräte in die Richtung quer zur Fahrtrichtung mit einer sehr hohen Genauigkeit automatisch versorgt. Dadurch wird der Fahrer entlastet; kann die Fahrgeschwindigkeit erhöht werden und wird die Qualität der geleisteten Arbeit gesteigert.

Weil das System mit von Anfang an definierten Streifen Grund arbeitet, wo die Kultur stattfindet ("Kulturstreifen"), müssen diese Streifen oder Reihen jedes Mal wieder für eine nächste Bearbeitung mit dieser hohen Genauigkeit zurückgefunden werden. Hier ist das Steuerungssystem auch zur Hilfe.

## 1. Vorführung des technischen Systems

### 1.1 Die verwendeten Komponenten

#### 1.1.1 Lasersender

Im vom IMAG-DLO gewählten Ausführungsbeispiel wird eine kleine Halterungsplatte für ein Stativ mit darauf montiertem Lasersender jede 24,40 m am Feldrand eingegraben. Die Halterungsplatte ist scheibenförmig mit einem Durchmesser von etwa 0,25 m und ist auf einem Rohr von etwa 0,5 m Länge montiert, daß in den Boden eingrammt wird. Die Oberseite der Scheibe befindet sich auf der Höhe der Feldoberfläche. Das Stativ ist aus nichtrostendem Material hergestellt und etwa 1,5 m groß. Es wird mit einem Schnellverschluß einwandfrei auf der genannten Halterungsplatte befestigt.

Der Lasersender ist von einem im Bauwesen öfters zur Errichtung vertikaler Wände oder Pfosten verwendeten Typ und strahlt einen Laserstrahl ab, der sich um eine horizontale Achse rotiert. Der rotierende Laserstrahl bildet also eine Vertikalfläche die sich über das Feld in die genaue Fahrtrichtung ausdehnt.

Die Speisung des Senders erfolgt über eine Autobatterie von 12 V, welche für 14 Stunden ununterbrochene Arbeit reicht. Sie ist mit einem Ladegerät in einem Koffer zusammengebaut und wird nachts geladen.

### 1.1.2 Laserempfänger

Der am Führungsgestell montierte Laserempfänger wird 12 Mal pro Sekunde vom Laserstrahl getroffen, denn das ist die Rotationsgeschwindigkeit des Lasersenders. Wenn das nicht genau in der Mitte der Empfänger passiert, wird ein elektrisches Signal erzeugt, das benutzt werden kann um eine Korrektur der Position zu starten. Der Laserempfänger ist auf dem Laserstrahl eingestellt.

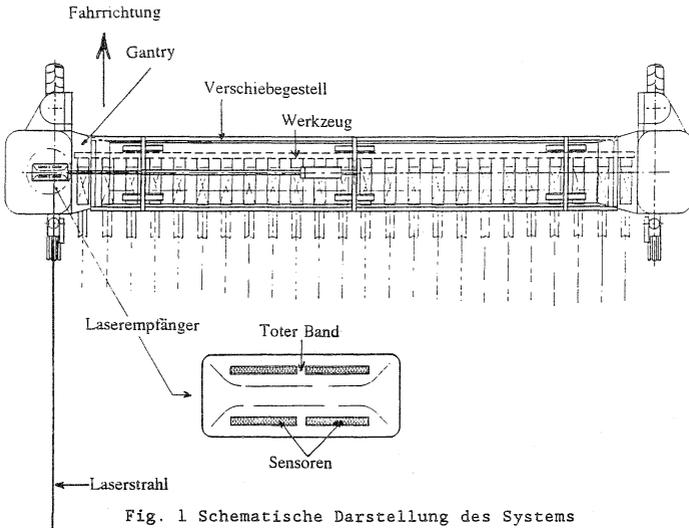


Fig. 1 Schematische Darstellung des Systems

### 1.1.3 Steuerhydraulik

Zwischen Fahrzeug und Gerät ist ein hydraulisch betätigtes Verschiebegestell angeordnet. Dies macht es möglich, die Position des Geräts gegenüber dem Fahrzeug zu ändern. Der Verstellbereich ist etwa 0.14 m in beiden Richtungen und stimmt mit dem Fangbereich des Laserempfängers überein. Die Verstellung wird von einem Hydraulikzylinder bewirkt, und dieser wird vom Laserempfänger gesteuert.

## 1.2 Funktionsbeschreibung

### 1.2.1 Senderaufstellung

Beim Arbeitsanfang wird das Stativ mit Lasersender auf eine Halterungsplatte montiert und auf eine Zielfläche am gegenüberliegenden Feldende eingestellt. Hier gibt es noch eine nicht praxisgerechte Schwierigkeit: Zur Ausrichtung des Senders werden zwei Personen gebraucht, die vorzugsweise über Funk miteinander in Verbindung stehen sollen. In unserem Falle haben die Felder eine Länge von 220 m: die Reichweite des Laserstrahls ist aber mehr als das dreifache. In der Entfernung von 220 m wird der Laserstrahl innerhalb von 0,01 m ausgerichtet, was mit einer Verstellung über Feingewinde an der Senderhalterung innerhalb von einer Minute möglich ist.

Die Position des Senders wird so gewählt, daß an einer Position des Lasersenders am Laserstrahl entlang jeweils einmal hin und zurück gefahren werden kann.

### 1.2.2 Empfängeraufstellung

Die Empfängeraufstellung am Zwischengestell, an dem jeweils die unterschiedlichen Werkzeuge montiert werden, wird so gewählt daß die Mitte des Empfängers sich gerade über der Anschlußlinie von zwei aufeinander folgenden Arbeitsgängen befindet, also gerade auf der Begrenzung der Arbeitsbreite des Geräts. Dadurch ist es im Zusammenhang mit der Senderposition möglich, an der einen Seite des Laserstrahls wegzufahren und im nächsten Arbeitsgang an der anderen Seite des Strahls zurückzukommen. Der Empfänger ist über das Dach des verwendeten Spezialschleppers auf einem seitlich verschiebbaren Schlitten montiert, der am seitlich verschiebbaren Zwischengestell gekuppelt ist.

Der Empfänger ist um 360° für den Laserstrahl empfindlich, so daß ein Empfänger für zwei Fahrrichtungen verwendet werden kann.

### 1.2.3 Felddauslegung

Das Versuchsfeld besteht aus zwei Teilen von je 220 x 366 m. Jedes Feld ist in fünf Parzellen von je 220 x 73.2 m aufgeteilt. Die beiden Felder liegen gegenüber einander und werden von einem Graben und einem Weg getrennt. An diesem Weg entlang sind die jeweiligen Laserfundamente angeordnet, so daß eine Position des Lasersenders auf zwei Feldern wirksam ist. Auf den Parzellen werden in einer Rotation von 1:5 Getreide, Zuckerrüben, Kartoffeln und Gemüse (2 x) angebaut. Auf Bodenentseuchung wird verzichtet.

Die gesamte Versuchsfläche ist etwa 20 ha. Die landwirtschaftlichen Messungen haben sich bisher auf das Gewächs Zuckerrübe beschränkt.

### 1.3 Steuerungsmöglichkeiten und Genauigkeit

#### 1.3.1 Empfindlichkeit und Reichweite

Der Hersteller gibt für den verwendeten Lasersender eine Reichweite von über 500 m an. Für die Feldlänge von 220 m reicht dies also aus. Für größere Feldlängen gibt es stärkere Lasersender. Die Ausgangsleistung unseres Exemplars war 2 mW.

Es wurde trotz des höheren Preises für einen He-Ne-Laser entschieden, statt für den viel billigeren IR-Laser, weil der He-Ne-Laser im sichtbaren Bereich arbeitet und deswegen leicht zu kontrollieren ist. Auch Vorfürungen überzeugen mehr, wenn der Laserstrahl sichtbar ist. Das System sollte aber mit der billigeren IR-Lasertechnik gleich gut funktionieren.

Die richtige Wirkung könnte eventuell durch Abhängigkeit und Empfindlichkeit von Regen, direkte Sonneneinstrahlung usw. beeinträchtigt werden. Weil diese Geräte aber für die Anwendung im Freien entworfen wurden, haben sich in diesem Bereich keine Probleme ergeben.

#### 1.3.2 Genauigkeit und totes Band

Die Genauigkeit des Steuerungssystems ist von mehreren, teils von den Komponenten bestimmten Faktoren abhängig. In Feldversuchen aber zeigte sich die Maximalabweichung von der idealen, geraden Linie auf die Bodenoberfläche nie als größer als 0.014 m.

Das tote Band, oder Hysterese, am Empfänger beträgt wahlweise 0,0025 m oder 0,006 m. Alle Versuche sind mit dem großen toten Band gefahren, weil eine schmalbandige Einstellung nur zur Schwingungen des ganzen Systems führen würde. Ursachen dafür sind die Elastizität und die Abmessungen (Gewicht) des Systems.

#### 1.3.3 Positionierung auf dem Felde

Die Halterungsplatten für das Laserstativ befinden sich am Feldrand, an einer Stelle, wo normalerweise nichts angebaut wird. Sie könnten beispielsweise auch in der Mitte eines am Feldrand entlang laufenden Feldweges plaziert werden: die Oberseite ragt ja nicht über die Wegoberfläche hinaus. Der Abstand zwischen zwei nachfolgenden Halterungsplatten beträgt zweimal die gewählte Arbeitsbreite der Geräte.

#### 1.3.4 Positionierung am Gerät

Der Laserempfänger ist am Verschiebestell montiert, genau über der theoretischen Grenze der Arbeitsbreite des angebauten Werkzeugs. Der Empfänger soll auf der Hin- und Rückfahrt demselben Laserstrahl folgen, wobei das Gerät sich einmal links und einmal rechts vom Strahl befindet und die beiden Arbeitsgänge nahtlos aufeinander anschließen.

## 2. Verwirklichung an Fahrzeug und Geräte

### 2.1 Gantry

In die vom IMAG-DLO gewählte Ausführung ist für die Zugkraft und als Träger der Geräte ein 12 m breiter Schlepper gewählt worden, ein sgn. Gantry. Dieser Maschine stammt aus England und ist dort kommerziell verfügbar. Sie besteht aus zwei identisch gebildeten Triebköpfen, mit einem Hexagonalrohr dazwischen. Einer der Triebköpfe umfaßt den Motor und die Kabine; der andere besteht aus einem Spritzmittelbehälter mit Spritzpumpe und Regelorgane usw. Die ganze Maschine wiegt etwa 5 t.

#### 2.1.1 Zwischengestell

Am Gantry ist ein verschiebbares Gestell konstruiert, an dem die Werkzeuge wahlweise montiert werden können. Die Verschiebung ist möglich wegen der Anwendung von sechs Führungsgleisen zwischen Gantry und Gestell, wodurch eine Verschiebemöglichkeit von 0,14 m nach beiden Seiten entsteht. Diese Verschiebung findet mit Hilfe eines Hydraulikzylinders statt.

### 2.2 Saatbettbereitung

Weil jetzt eine automatische Weise zur Bestimmung und zum Zurückfinden von bestimmte Stellen (Streifen) zur Verfügung steht, schien es nicht länger sinnvoll, die ganze Feldbreite zu bestellen. (Unkrautbekämpfung könnte ein Grund dafür sein, das Saatbett trotzdem über die ganze Breite zu bereiten). Für eine Reihenbestellung wird in diesem Fall eine Reihenbestellungsmaschine der Firma Stanhay Webb benutzt. Jedes der 24 Elemente ist in einem Parallelogramm aufgehängt, so daß die richtige Bodenführung gewährleistet ist. Ein Element besteht aus drei Festzinken und einer Gußeisen-Rolle mit Verzahnung. Mit dieser Maschine kann in zwei Arbeitsgängen ein befriedigendes Saatbett für Zuckerrüben erzeugt werden. Die Arbeitsbreite der Elemente ist 0,12 m, die Tiefe des Saatbettes variiert dabei von 0,02 bis 0,05 m.

### 2.3 Banddüngung

Banddüngung ist nicht neu. Praktische Probleme aber haben dem Einsatz bis jetzt entgegengewirkt. Mit dem automatischen Führungssystem ist es aber möglich einen Teil der zu gebenen Düngemenge zu jedem Zeitpunkt vollautomatisch zu dosieren. In diesem Fall wurde 75 % der aufgrund der Bodenanalyse empfohlenen Menge Stikstoffdüngemittel in einem Banddüngungsverfahren gegeben, und zwar wird die Hälfte während der Saatbettbereitung in Streifen eingearbeitet, während die zweite Hälfte im Sechsstadium der Rüben etwa zehn Zentimeter neben den Reihen auf die Oberfläche gestreut wird. Benutzt wurde ein pneumatischer Düngerstreuer der Marke Nodet Gougis mit angepaßten Abfließöffnungen. Der erste Düngungsvorgang wurde mit dem zweiten Saatbettbereitungsdurchgang kombiniert, wobei das Düngemittel gleichzeitig in den Streifen des Saatbetts eingearbeitet wurde.

### 2.4 Einsaat

Zur Einsaat stand eine 24-reihige Maschine der Firma Accord-Fähse zur Verfügung. Ohne weitere Probleme war es möglich, hiermit in der Mitte der vorbereiteten Streifen zu sähen.

### 2.5 Bandspritzung

In den Streifen wurde, manchmal mit der Einsaat kombiniert, manchmal als zusätzlicher Arbeitsgang, über eine Arbeitsbreite von etwa 0,15 m ein Bodenherbizid gespritzt. Dazu werden nur etwa 33 % der für eine Vollfeldbehandlung benötigten Menge gebraucht! Als Werkzeug wurde der normalen Spritzbalken verwendet, nur wurde es bis etwa 0,12 m über die Bodenoberfläche abgesenkt, wobei er wegen des gewählten Fahrzeugs sehr stabil ist. Die Lasersteuerung sorgt für eine sehr genaue Führung des Spritzgestänges im horizontalen Bereich.

## 2.6 Unkrauthacken

Wenn in den Streifen zwischen den Pflanzenreihen eine Unkrautbekämpfung stattfinden soll, wird das Hackgerät an das Verschiebegestell des Gantry montiert. Zur Verfügung steht ein Hackgerät der Firma Kongskilde, Typ Vibra Beta, mit 23 Elementen. Auch diese Elemente sind in Parallelogrammen aufgehängt und je aus drei Federzinken mit Meißel oder Gansefußscharen unterschiedlicher Arbeitsbreite aufgebaut. Dadurch kann die Arbeitsbreite pro Element eingestellt werden von 0,05 bis 0,45 m.

Die sehr genaue Führung macht es möglich, bei Fahrgeschwindigkeiten über 8 km/h beim Hacken mit einer Arbeitsbreite von 0,425 m zu arbeiten. Das bedeutet, daß 85 % der Oberfläche bei optimaler Geschwindigkeit gehackt werden.

## 3. Beschreibung der Experimente der Jahre 1990 und 1991

### 3.1 Vergleich zwischen Vollfeld- und Banddüngung

Nach orientierenden Versuchen im Jahre 1990 wurde 1991 ein Vergleich zwischen Vollfeld- und Banddüngung bei Zuckerrüben angestellt. Dazu wurde in der oben beschriebenen Weise ein Versuchsfeld von 220 x 73,2 m bestellt. Auf dem Feld wurden Ertragsmessungen durch die Handerte an 150 Stellen von jeweils 1 m<sup>2</sup> durchgeführt.

Die Ergebnisse sind folgende:

1991	Vollfelddüngung		Banddüngung	
	100 % = 130 kgN/ha		2 x 37,5 % = 75 %	
Brutto Ertrag	89 850	kg/ha	90 917	kg/ha
Netto Ertrag	68 050	kg/ha	66 683	kg/ha
% Zucker	16,47	%	16,51	%
Zuckerertrag	11 199	kg/ha	10 985	kg/ha

Tabelle 1. Vergleich zwischen Vollfeld- und Banddüngung

### 3.2 Vergleich zwischen Vollfeld- und Bandbearbeitung bei der Unkrautbekämpfung

Hinsichtlich der Unkrautbekämpfung wurde ein sehr ausführlicher Versuch durchgeführt, dessen detaillierte Beschreibung aber nicht in den Rahmen dieser Tagung fällt. Ein Vergleich wurde nach der Unkrautmenge und Keimungsgeschwindigkeit bei Vollfeld- und Bandbestellung angestellt, beides bei Tages- und Nachtbearbeitung. Die automatische Steuerung macht es ja relativ einfach, auch in der Dunkelheit sehr genau zu arbeiten!

Gemessen wurde die Anzahl Unkräuter, unterschieden nach 30 Arten, auf 150 Stellen von je 1 m<sup>2</sup>, während neun Wochen nach der Einsaat (jede Woche eine Messung). Abschließend wurde eine Biomassemessung der anwesenden Unkräuter gemacht.

### 3.3 Vergleich der Bodenbearbeitung zwischen hell und dunkel

Wie schon erwähnt, wurde die ganze Reihe der Bearbeitungen (Saattbettbereitung, Düngung, Einsaat und Hacken) auch in völliger Dunkelheit durchgeführt. Auch die entsprechenden Kombinationen von Tages- und Nachtarbeiten waren mit einbezogen.

Anregung hierfür waren die Ergebnisse deutscher Forschung [1], wobei wesentlich weniger Keimung von Unkräutern stattfand, wenn die Bodenbearbeitung in der Dunkelheit gemacht wurde. Eine bestimmte Lichtmenge wäre notwendig, um viele Typen Unkrautsamen zur Keimung anzuregen: Fehlt diese Lichtmenge, dann keimen die Samen nicht.

#### 4. Ergebnisse

##### 4.1 Düngerausnutzung

Aus der Literatur [2] ist bekannt, daß die Benutzung von Stickstoffdüngemitteln gesteigert werden kann, indem nur die Streifen Boden, denen die Pflanzen wirklich ihre Nährstoffe entnehmen, gedüngt werden.

Aus den Ertragsmessungen kann berechnet werden, daß in diesem Fall die Ausnutzung tatsächlich besser ist und daß mit 75 % der üblichen Düngemenge nahezu der gleiche Ertrag erreicht wird, nur weil sie in Streifen ausgebracht werden.

##### 4.2 Unkrautbekämpfung

Die Methode, nach der die Streifen Boden zwischen den Pflanzenreihen nicht berührt werden, damit kein Keimbett für die Unkrautsamen geschaffen und demzufolge die Keimung dieser Samen nicht gesteigert wird, hat sich in der Saison 1991 nicht bewährt. Die Anzahlen der Unkrautpflanzen 3 Wochen nach der Einsaat in berührtem und in unberührtem Boden ist wie folgt:

1991	Anzahl Unkrautpflanzen / m <sup>2</sup>		
	Bestellung		Unberührter
	bei Tag	bei Nacht	Boden
In der Pflanzenreihe	5,42	6,66	***
Zwischen den Pflanzenreihen	7,15	6,18	7,63

Tabelle 2. Vergleich der Unkrautflora

## 5. Für 1992 geplante Versuche und Erweiterungen

### 5.1 Vollfeld- im vergleich zu Banddüngung

Die 1991 ausgeführten Versuche werden 1992 wiederholt. Banddüngung wird in der gleichen Weise, wie oben beschrieben, mit Vollfelddüngung verglichen werden. Die Abfließöffnungen des Düngerstreuers für die zweite, oberflächliche Gabe werden derart geändert werden, daß das Wegrollen von Düngerkörnern auf ein Mindestmaß beschränkt wird.

### 5.2 Unkrautbekämpfung

Die Versuche, die Keimung von Unkrautsamen zu verringern, indem der Boden zwischen den Pflanzenreihen nicht berührt und das Saatbett in Dunkelheit bereitet wird, werden fortgeführt. Die automatische Steuerung der unterschiedlichen Geräte ist hier von großem Vorteil.

6. Literatuur

[1] Hartmann, K.M. *et.al.*, 1990. Photobiologische Unkrautbekämpfung. Bio-land 1990, 6 (Juni): S. 15-17.

[2] Wit, C.T. de. A physical theory on placement of fertilizer. Wageningen, doctoral thesis 1953.

Zuydam, R.P. van, 1990. Lasergestuurd zaaien met de gantry. Landbouwmecanisatie 41 (1990), 6 (Juni). S. 12-13.

Zuydam, R.P. van, 1990. Lasergestuurd schoffelen met de gantry. Landbouwmecanisatie 41 (1990), 8 (August). S. 31.

Zuydam, R.P. van, 1991. Lasergestuurd rijenbemesten met de gantry. Landbouwmecanisatie 42 (1991), 7 (Juli). S. 42-43.



## ANSCHLUSSFAHREN VON FELDMASCHINEN MIT DIFFERENTIAL - GPS

Peter Jürschik, Horst Beuche

INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK BORNIM  
Max-Eyth-Allee 1, O-1572 Potsdam

### 1. Systembetrachtungen

Das Problem der Ortung und Navigation von Feldarbeitsmaschinen ist schon seit vielen Jahren ein Schwerpunkt der landtechnischen Forschung. Die umfassende Lösung dieses Problems stellt für die Feldwirtschaft einen entscheidenden Schritt zur Einführung neuer Technologien dar.

In der Vergangenheit gab es immer wieder Versuche, Systeme zur Ortung und Navigation aus nichtlandwirtschaftlichen Bereichen für die Feldwirtschaft zu nutzen [1], [4]. Jedoch fanden die entwickelten Verfahren kaum Verbreitung.

Welche Gründe dafür ausschlaggebend sind, ist für den Umgang mit Systemen zur Ortung und Navigation von großem Interesse. Mit Blick auf die Bedeutung, die das Satellitennavigationssystem GPS (Global Positioning System) auch für die Landwirtschaft erlangen kann, sollen diese Negativgründe im ersten Teil dieses Beitrages kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit diskutiert werden.

Bild 1 zeigt eine mögliche Systemkonfiguration für die Nutzung von Ortung und Navigation in der Feldwirtschaft. Aus dem Bild wird deutlich, daß das System zur Ortung und Navigation nur Bestandteil eines komplexen Gesamtsystems ist. Somit wird auch nur ein Teil der erwähnten Negativgründe auf das System zur Ortung und Navigation entfallen. Derartige Gründe können sein:

- zu hohe Kosten für das System zur Ortung und Navigation,
- eine zu geringe Positions- und/oder Bewegungsgenauigkeit,

- nicht erfüllbare Echtzeitanforderungen,
- beschränkte Verfügbarkeit in Raum und/oder Zeit.

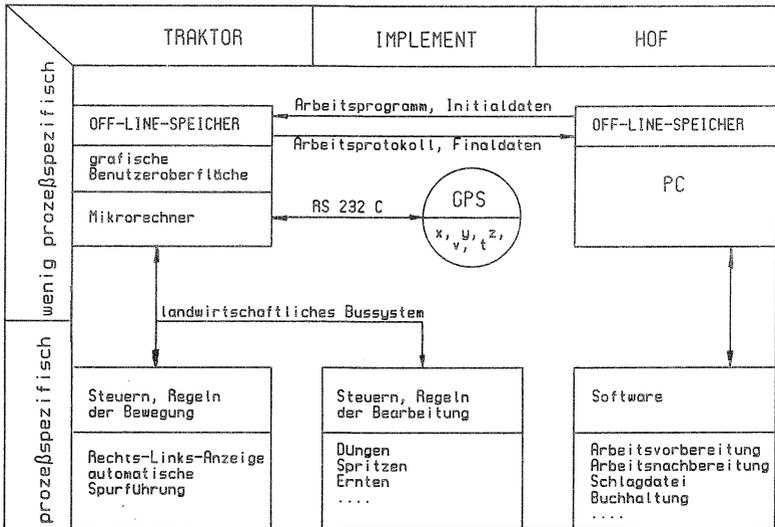


Bild 1: Eine Systemkonfiguration für Ortung und Navigation

Eine zweite Gruppe möglicher Negativgründe entfällt auf den prozessspezifischen Bereich:

- die Nutzung elektronischer Systeme zur Ortung und Navigation für die Feldwirtschaft ist verfahrenstechnisch sowohl hinsichtlich der Bewegungs- als auch hinsichtlich der Bearbeitungsalgorithmen insbesondere wegen der oben benannten Gründe noch nicht hinreichend erforscht,
- die verfügbare Technik zur Steuerung der Bewegung und zur Steuerung der Bearbeitung ist teilweise zu ungenau oder noch zu teuer,

- für die prozeßnahe Arbeitsvor- und -nachbereitung sowie für die Datenverwaltung fehlt eine ausreichende Softwareunterstützung,
- das Gesamtverfahren ist in seiner Konzeption zu teuer.

Eine dritte Gruppe möglicher Negativgründe bilden die nicht prozeßspezifischen Gründe:

- die Ausstattung der bäuerlichen Betriebe mit Elektronik (Betriebsrechner, Bordrechner, ... ) ist für den Einsatz elektronischer Systeme zur Ortung und Navigation noch zu wenig entwickelt,
- Der Umgang mit Elektronik wird dem Landwirt durch komplizierte Handhabung und oder geringe Zuverlässigkeit sowie durch fehlende Schulung erschwert,
- dem vielseitigen Einsatz elektronischer Systeme zur Ortung und Navigation in der Feldwirtschaft sind durch die mangelnde Kompatibilität verschiedener Arbeitsgeräte enge Grenzen gesetzt (fehlende Standardisierung),
- weitere Gründe, wie etwa politische Vorbehalte oder ein Festhalten an traditionellen Bearbeitungsmethoden, sind denkbar.

Der Landwirt als potentieller Nutzer wird Navigationssysteme erst dann akzeptieren, wenn sie ihm einen kalkulierbaren Nutzen oder eine spürbare Arbeitserleichterung ermöglichen, wenn sie zuverlässig arbeiten und leicht handzuhaben sind. Er erwartet eine komplette technologische Lösung für seine konkrete Wirtschaft.

Diesem hohen Anspruch des Landwirts konnte bisher kein Verfahren auf der Basis eines elektronischen Navigationssystems gerecht werden.

Für die Bedürfnisse des Landwirts wurden deshalb Navigationshilfen entwickelt.

Diese Navigationshilfen können oft mit folgenden Prädikaten versehen werden: einfach, funktional, preiswert, praktisch. Mit Navigationshilfen verbinden sich jedoch auch Nachteile, wie ein beschränkter Einsatzbereich und eine zum Teil aufwendige Handhabung.

In den letzten Jahren hat sich das Bild zumindest teilweise gewandelt. Neuere elektronische Systeme zur Ortung und Navigation verwenden elektromagnetische Wellen und Laserstrahlen zur Positionsbestimmung. Sie erfüllen die Anforderungen der Landtechnik an die Positionsgenauigkeit.

In einigen Ländern, darunter in den USA (SCHUELLER et. al. [2], LARSEN et. al. [3], CHOI et. al. [4]), in Kanada (PALMER et. al. [5]), in Großbritannien (STAFFORD et. al. [6], McLEOD [7]), in Frankreich (MONOD et. al. [8]) und in der BRD (SCHNUG et. al. [9], AUERNHAMMER et. al. [10], [11]) wurden in jüngster Vergangenheit intensive verfahrenstechnische Arbeiten unter Anwendung elektronischer Systeme zur Ortung und Navigation durchgeführt.

Parallel dazu hält in den hochentwickelten Ländern der Welt die Elektronik Einzug in die Feldwirtschaft [12], [16]. Damit einher gingen Arbeiten zur Standardisierung, die den Weg zu mehr Kompatibilität zwischen verschiedenen landtechnischen Arbeitsgeräten öffnen könnten [13]. Gleichzeitig wurden Fragen der Mensch - Maschine Schnittstelle untersucht und vielversprechende Ansätze für praktische Systeme der Bedienerführung und Handhabung gefunden [16].

Insgesamt hat sich die Situation bezogen auf die oben benannten Negativargumente deutlich und in positiver Richtung geändert.

Systeme zur Ortung und Navigation auf der Basis von GPS werden zunehmend im Automobil- und Freizeitbereich eingesetzt. Auf Grund des Massencharakters dieser Märkte wird erwartet, daß diese Systeme in Zukunft preiswert zur Verfügung stehen werden.

Elektronische Systeme zur Ortung und Navigation - allen voran das Satellitennavigationssystem GPS - können für die praktische

Feldwirtschaft Bedeutung erlangen. Bei ihrer Einführung in die Feldwirtschaft wirken viele Faktoren. Es ist kein schneller Siegeszug dieser Techniken zu erwarten.

## 2. Anwendungsbereiche elektronischer Systeme zur Ortung und Navigation in der Feldwirtschaft

Mögliche Anwendungen von Ortung und Navigation in der Feldwirtschaft und die dazu erforderlichen Genauigkeiten sind Gegenstand der ständigen Diskussion. Tabelle 1 basiert auf Angaben von AUERNHAMMER [10].

Ziel	Anwendungsbeispiele	Genauigkeit
Erkennen von Feldern	Erfassung von Arbeitszeiten, Erfassung von Maschinenzeiten,	+/- 20 m
Erkennen von Teilschlägen	Lokal optimale Verteilung, Ertragskartierung,	+/- 1 m
Lenken des Fahrzeuges	Anschlußfahren,	+/- 5 cm
Führen des Arbeitsgerätes	Bearbeitungsvorgänge an der Pflanze,	+/- 1 cm

Tabelle 1: Ortung und Navigation in der Feldwirtschaft nach AUERNHAMMER [10]

## 3. Genauigkeiten von GPS

Zu den vielseitig verwendbaren elektronischen Systemen zur Ortung und Navigation gehört das Satellitennavigationssystem (NAVSTAR-) GPS, NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System. In diesem Abschnitt werden nur GPS-Genauigkeiten betrachtet. Auf eine ausführliche Darstellung von GPS muß hier verzichtet werden.

Technische Einzelheiten sowie Hinweise auf weitere Literaturquellen zu GPS sind in [14] zu finden.

Die folgende Tabelle 2 basiert auf einer Darstellung von McDONALD auf dem 1. Internationalen Symposium für Echtzeitanwendungen von DGPS in Braunschweig im September 1991 [15]. Sie stellt eine Momentaufnahme der 1991 auch kommerziell verfügbaren GPS-Genauigkeiten dar.

<b>Absolutpositionsmessung mit GPS</b>			
Beobachtungsgrößen	Genauigkeit ( $2\sigma$ )	Trend	Kommentar
(A) C/A - Codephasen	100 m	0	<b>SPS</b> mit SA (Selektiv Availability)
(B) C/A - Codephasen	30 m	-	<b>SPS</b> ohne SA
(C) P - Codephasen	20 m	+	<b>PPS, AS</b> (AntiSpoofing)

<b>Relativpositionsmessung mit DGPS</b>			
Beobachtungsgrößen	Genauigkeit ( $2\sigma$ )	Trend	Kommentar
(D) C/A-Codephasen (Pseudoentfernungen)	5 m	+	Echtzeit (2 Hz)
(E) Trägerphasen dynamisch	50 cm	+	Echtzeit (1 Hz)
(F) Trägerphasen kinematisch	5 cm	+	postprocessing
(G) Trägerphasen statisch	1 cm	+	postprocessing

Tabelle 2: GPS - Genauigkeiten 1991 nach Mc DONALD in [15]

Trend:

- + -> höhere Genauigkeit,
- 0 -> gleichbleibende Genauigkeit,
- -> geringere Genauigkeit.

Entsprechend der derzeitigen Politik des GPS - Betreibers DoD (Verteidigungsministerium der USA) muß der zivile Nutzer von GPS davon ausgehen, daß für singuläre Empfänger die Positionsgenauigkeit auf 100 m (2 $\sigma$ ) begrenzt ist (SPS mit SA).

Die Entwicklung der GPS - Empfängertechnik ist keineswegs abgeschlossen. Die Genauigkeitsangaben von McDONALD sind eher konservativ. Anfragen bei GPS-Herstellern, Fachgespräche und Literaturstudien ergaben zum Teil bessere Genauigkeiten. So können heute z.B. mit PPS (C) und mit DGPS auf der Basis der Codephasenmessung (D) Genauigkeiten im Submeterbereich erreicht werden. Mit dynamischen Trägerphasenmessungen (E) wurden Genauigkeiten im Zentimeterbereich nachgewiesen (EULER, HEIN, LANDAU in [15]).

Aus dem Vergleich der Tabellen 1 und 2 resultiert, daß sich das Satellitennavigationssystem GPS **technisch** auf Grund der mit diesem System erreichbaren **Genauigkeiten in der Position** für die Ortung und Navigation in der Landwirtschaft eignet.

Weitere technische Überlegungen sind notwendig, so zum Echtzeitverhalten von GPS und zur Systemintegrität. Darüberhinaus muß untersucht werden, in welchem Maße sich verfügbare GPS - Genauigkeit prozeßwirksam z.B. in eine exakte Spurführung umsetzen läßt.

Besonders bedeutsam für die Anwendung von GPS in der Landwirtschaft ist die Frage nach der Preisentwicklung der GPS-Empfänger. Ökonomische Fragen des Einsatzes von GPS werden hier nicht betrachtet, sie sind Schwerpunkt des Beitrages von JAHNS und KÖGL.

GPS ist ein aus militärischen Gründen konzipiertes System. Auch wenn gegenwärtig vieles dafür spricht, daß eine zivile Nutzung von GPS möglich sein wird, muß die GPS-Politik beobachtet werden. Wesentliche Fragen bleiben hier zur Zeit noch unbeantwortet.

GPS ist ein differenziert zu betrachtendes elektronisches System zur Ortung und Navigation. Die einzelnen Meßprinzipien entsprechen verschiedenen Anforderungsprofilen. Überlegungen zum landtechnischen Einsatz von GPS müssen dem Rechnung tragen.

Eine Zuordnung einzelner Empfängertypen zu Anwendungsbereichen ist möglich. Verschiebungen in dieser Zuordnung durch den weiteren technischen und politischen (?) Fortschritt sind denkbar. Folgende Gruppierungen sind auf der Basis der derzeitigen Genauigkeiten der GPS-Empfänger erkennbar:

A) <b>C/A-Code Empfänger</b> (SPS):	Erkennen von Feldern und großen Schlägen,
B) <b>DGPS-Empfänger:</b> (C/A - Codephasen)	Erkennen von Schlägen, Teilschlägen und Rasterelementen,
C) <b>PDGPS-Empfänger:</b> (Trägerphasen)	Fahrzeugführung, Geräteführung (grob), Vermessung.

Tabelle 3: Anwendungspotential von GPS für die Feldwirtschaft

Positionsbestimmung mit GPS basiert auf der Anwendung eines starren Koordinatensystems. Die Position einer Pflanze ist praktisch jedoch keine feste Punktkoordinate. Zutreffender ist die Darstellung, daß sich eine Pflanze mit einer definierten Wahrscheinlichkeit  $P$  auf einer Fläche  $A$  um die Koordinate  $(x,y)$  befindet.

Besonders im Hochgenauigkeitsbereich liegen an dieser Stelle die Grenzen der Einsetzbarkeit von GPS. Weitere Sensoren sind erforderlich, um einen Bezug zur realen Umwelt herzustellen.

#### 4. Differential-GPS (DGPS)

##### 4.1. Prinzip von DGPS

Bild 2 zeigt das Grundprinzip von Differential-GPS. Bei DGPS werden die Signale der Satelliten ( $S_i$ ) zusätzlich von einem zweiten GPS-Empfänger, dem sogenannten Referenzempfänger ( $E_1$ ) empfangen. Dieser ist stationär auf einem vermessenen Punkt aufgestellt.

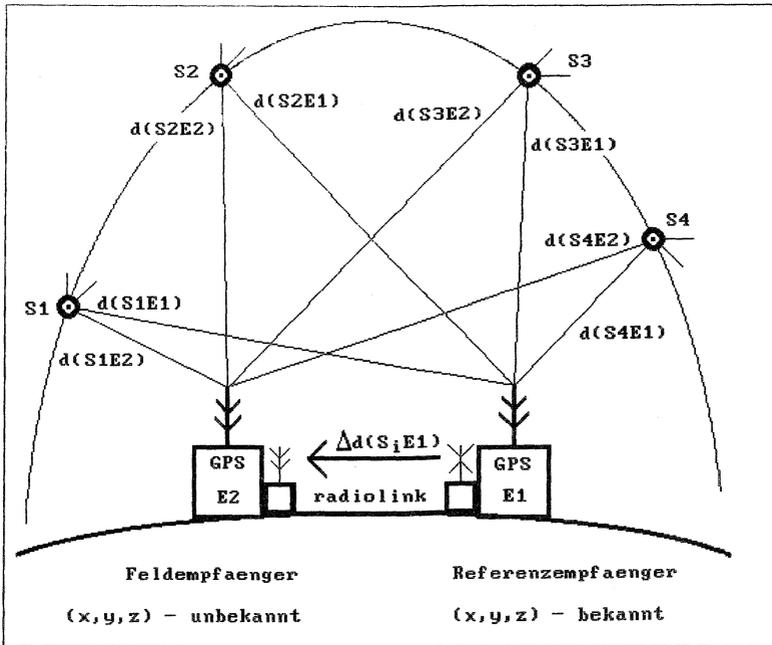


Bild 2: Prinzip von DGPS (vereinfachte Darstellung)

Der Feldempfänger E2 und der Referenzempfänger E1 unterliegen gleichzeitig einer Reihe von gemeinsamen Fehlereinflüssen. Diese Fehleranteile können durch verschiedene Differenzbildungen eliminiert oder zumindest drastisch reduziert werden. Auch die künstliche Verschlechterung der C/A-Code-Genauigkeit durch Selektiv Availability wird mit Differential-GPS weitgehend aufgehoben.

Praktisch sind die Positionen des Referenzempfängers E1 und der Satelliten  $S_i$  bekannt. Die Entfernungen  $d(S_iE1)$  der Satelliten  $S_i$  zur Referenzstation E1 können also berechnet werden. Die Entfernungen  $d(S_iE1)$  werden jedoch gleichzeitig durch den Referenzempfänger gemessen. Im einfachsten Fall werden durch Differenzbildung zwischen den gemessenen und den berechneten Entfernungen  $d(S_iE1)$  Korrekturwerte gebildet. Diese können an den Feldempfänger E2 übertragen und dort zur Fehlerkorrektur verwendet werden.

Über Soil Teq Düngerstreuer, die mit einem GPS-Empfänger ausgestattet waren, gibt es einige Berichte und mindestens eine öffentliche Vorführung. Die bedeutenden GPS-Empfängerhersteller, wie Trimble oder Ashtech, haben ein besonderes Interesse für den landwirtschaftlichen Markt und sie nahmen an Konferenzen und Tagungen für Pflanzenbauer und landwirtschaftliche Maschinenbauer teil.

### Zukünftige Entwicklungen

Im Augenblick dominiert Koppelortung auf dem Markt für Ortung in der Landwirtschaft der USA, aber das kann sich zu Gunsten anderer Verfahren ändern. Zusätzlich wird der momentan kleine kommerzielle Markt und der Forschungsbereich in Zukunft stark wachsen.

Eine zukünftige Entwicklung wäre, daß örtliche Kooperativen oder Landhandelsfirmen die notwendige Infrastruktur für Ortung in der Landwirtschaft schaffen. Dabei kann es sich um Sender von Positionssignalen für Triangulationssysteme oder um Referenzstationen für differentielles GPS handeln. Ein Großteil des Mineraldüngers und der Pflanzenschutzmittel in den USA wird von diesen Kooperativen und Firmen ausgebracht. Sie haben einen ausreichend großen Umsatz, um die Ausgaben für Ortungsgeräte über eine große Fläche amortisieren zu können. Dadurch werden auch die Kosten per Einheit reduziert. Den ersten Gebrauch von fortschrittlichen Ortungssystemen wird wahrscheinlich an Pflanzenschutzgeräten dieser Firmen gemacht werden. Später werden dann auch Landwirte Empfänger für ihre Mähdrescher und andere Landmaschinen erwerben.

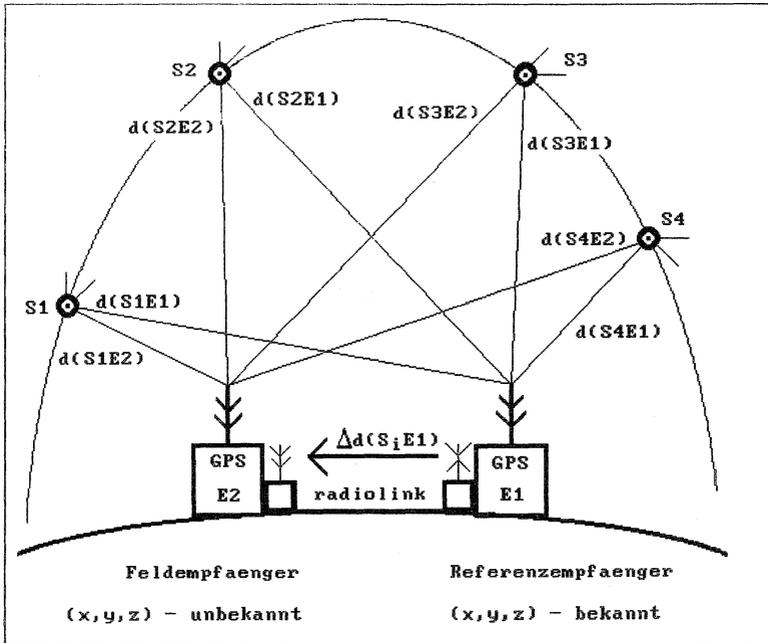


Bild 2: Prinzip von DGPS (vereinfachte Darstellung)

Der Feldempfänger E2 und der Referenzempfänger E1 unterliegen gleichzeitig einer Reihe von gemeinsamen Fehlereinflüssen. Diese Fehleranteile können durch verschiedene Differenzbildungen eliminiert oder zumindest drastisch reduziert werden. Auch die künstliche Verschlechterung der C/A-Code-Genauigkeit durch Selektiv Availability wird mit Differential-GPS weitgehend aufgehoben.

Praktisch sind die Positionen des Referenzempfängers E1 und der Satelliten  $S_i$  bekannt. Die Entfernungen  $d(S_iE1)$  der Satelliten  $S_i$  zur Referenzstation E1 können also berechnet werden. Die Entfernungen  $d(S_iE1)$  werden jedoch gleichzeitig durch den Referenzempfänger gemessen. Im einfachsten Fall werden durch Differenzbildung zwischen den gemessenen und den berechneten Entfernungen  $d(S_iE1)$  Korrekturwerte gebildet. Diese können an den Feldempfänger E2 übertragen und dort zur Fehlerkorrektur verwendet werden.

Die Verwendung von Korrektursignalen, die mit Hilfe des Referenzempfängers gewonnen werden, ist kennzeichnend für DGPS. Soll mit dem Feldempfänger in Echtzeit gearbeitet werden, so müssen die Korrektursignale im Feldempfänger in Echtzeit zur Verfügung stehen. Der hierfür geeignete Übertragungskanal wird wegen der Beweglichkeit des Feldempfängers oft eine Funkstrecke (Telemetrie, radio link) sein.

Zur Zeit wird national und international an einer Standardisierung der für den Übertragungskanal zu verwendenden Datenformate und Übertragungsprotokolle gearbeitet. Zwei in diesem Zusammenhang wichtige Formate sind RTCM<sup>(1)</sup> SC 104 Version 2.0 als Quasistandard für DGPS auf der Basis von Codephasenmessungen und das DGON<sup>(2)</sup> -Format als Standardentwurf für DGPS auf Basis der Trägerphasenmessung (PDGPS).

Von entscheidender Bedeutung für die derzeit mit DGPS erreichbare Genauigkeit ist die Frage, ob zur Messung die Codephasen oder die Trägerphasen benutzt werden. Die für die Spurführung von Feldarbeitsmaschinen notwendigen Genauigkeiten im Zentimeterbereich sind allein auf der Basis von DGPS mit Trägerphasenmessung möglich.

#### 4.2. DGPS auf der Basis der Trägerphasenmessung (PDGPS)

Das Genauigkeitspotential von Differential-GPS liegt für statische Anwendungen im Millimeter- und für dynamische Anwendungen im Zentimeterbereich [14], [15]. Dazu ist DGPS auf der Basis der Trägerphasenmessung notwendig, das wir im weiteren PDGPS (Precise DGPS) nennen werden. PDGPS wird in drei Arbeitsregimen benutzt:

Das **statische PDGPS** ermöglicht die Vermessung eines festen Punktes. Zur Messung werden die Satellitensignale durch mindestens einen Referenzempfänger und durch den GPS-Empfänger am Meßpunkt zeitgleich aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten werden durch Software (postprocessing software) zum Meßergebnis, den unbekanntenen Koordinaten des Meßpunktes, weiterverarbeitet.

(1) - RTCM = Radio Technical Commission for Maritime Services, USA

(2) - DGON = Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, BRD

Das **kinematische PDGPS** ermöglicht die Vermessung von Punkten, Linien und Kurven im Raum. Die Verfahrensweise gleicht der beim statischen PDGPS (postprocessing). Der Feldempfänger darf hier jedoch bewegt werden.

Von Interesse für die Spurführung von Feldarbeitsmaschinen ist das **dynamische<sup>(3)</sup> PDGPS**. Das dynamische PDGPS ging aus dem kinematischen PDGPS hervor. Die Verarbeitungsalgorithmen von kinematischem DGPS wurden soweit verbessert, daß Messungen in Echtzeit möglich wurden. Echtzeit heißt zur Zeit etwa 1 Meßwert pro Sekunde. Dynamisches PDGPS ist erst seit 1991 kommerziell verfügbar. Deutsche Wissenschaftler haben an der Entwicklung des dynamischen PDGPS entscheidenden Anteil.

#### 4.3. Besonderheiten von dynamischem PDGPS

Eine ganze Reihe von Besonderheiten sind beim Einsatz von dynamischen PDGPS zu beachten.

Zentimetergenauigkeit in Echtzeit ist noch sehr **teuer**. Ein Feldempfänger kostet 1992 z.B. zwischen 10.000,- und 20.000,- DM. Er muß zur Zeit mit einem leistungsfähigen IBM-kompatiblen PC (32 bit, 25 MHz, Koprozessor, z.B. 5000,- DM) gekoppelt werden. Die Software für diesen Rechner - das Programm, das die Zentimetergenauigkeit erst ermöglicht - muß zusätzlich bezahlt werden (Preisbeispiel Ende 1991: 24.500,- DM). Darüber hinaus muß sich der Empfänger im Einzugsbereich einer Referenzstation befinden, die derzeit Ihrerseits z.B. zwischen 20.000,- und 50.000,- DM kosten kann.

Alles in allem kommt man heute für ein komplettes System Referenzempfänger und Feldempfänger problemlos auf eine gleichermaßen für Forschung und Praxis niederschmetternde Summe von über 100.000,- DM. Es ist bei dieser jungen Technik derzeit außerordentlich schwer und risikoreich abzuschätzen, wie sich der Preis in Zukunft entwickeln wird. Sicher ist lediglich, daß es zu einem weiteren Preisverfall kommen wird.

(3) - in der Literatur ist hierfür auch der Begriff kinematische zu finden

Der **Aktionsradius** einer Referenzstation für dynamisches PDGPS ist mit 15 - 25 km im Vergleich zum Aktionsradius einer Referenzstation auf der Basis von Codephasenmessungen (500 - 1000 km) deutlich **geringer**. Es ist nicht zu erwarten, daß sich dieser Wert in Zukunft deutlich verbessern wird. Generell nimmt bei DGPS die erreichbare Genauigkeit mit der Entfernung zur Referenzstation ab. Die Anwendung von dynamischen PDGPS erfordert deshalb eine lokale Referenzstation.

Beim dynamischen PDGPS müssen die zur Positionsermittlung verwendeten **Satellitensignale kontinuierlich beobachten** werden. In die Lösung der Positionsgleichungen werden gegenwärtig die Signale eines zusätzlichen (fünften) Satelliten einbezogen. Das hat praktische Folgen:

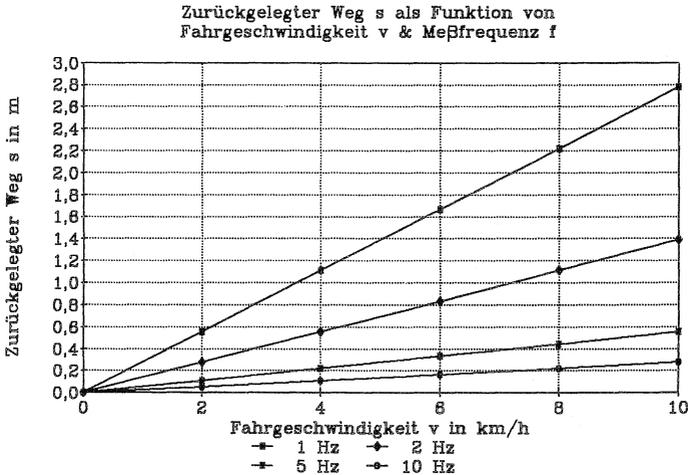
- Ein für dynamisches PDGPS geeigneter Empfänger muß über mehrere parallele Empfangskanäle verfügen, Multiplexempfänger sind nicht geeignet.
- Die Mindestanzahl der parallelen Kanäle eines Empfängers für die räumliche Positionsbestimmung mit dynamischem PDGS beträgt 5.
- Während einer Unterbrechung des Empfangs der Satellitensignale (z.B. durch Abschattung) stehen keine gültigen Positionsdaten zur Verfügung. Nach dem Ende dieser Unterbrechung muß der Empfänger einen Initialisierungszyklus durchlaufen bis er wieder gültige Positionsdaten liefern kann. Sein Echtzeitverhalten wird dadurch sehr negativ beeinflusst.

Dynamisches PDGPS ist eine **neue Technik**. Die Arbeiten in Forschung und Entwicklung zu dieser Technik sind keineswegs abgeschlossen. Weitere Fortschritte sind zu erwarten.

### 5. Echtzeitverhalten von GPS

Für viele Anwendungen ist das Echtzeitverhalten von GPS bedeutsam. Konkretes Interesse gilt der Frage nach der Meßfrequenz. Typische Werte für diese Frequenz liegen heute bei 1 - 2 Hz.

Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit einer Feldarbeitsmaschine, der Meßfrequenz des Systems zur Ortung und Navigation und dem von der Maschine zwischen 2 Messungen zurückgelegten Weg.



Parameter: Meßfrequenz in Hz

Bild 3: Zurückgelegter Weg zwischen zwei Positionsbestimmungen

Nach Aussagen von CHOI, ERBACH und SMITH [4] kann ein Traktor mit einem Fehler (RMS) kleiner als 5 cm geführt werden, wenn der Meßfehler der Positionsbestimmung kleiner als 5 cm ist und die Messung bei konstanter Geschwindigkeit mindestens alle 20 cm erfolgt.

Sollten sich diese Aussagen bestätigen, wäre das Anschlußfahren mit dynamischem PDGPS (Meßfrequenz 1 Hz) heute wenig attraktiv. Aus Bild 3 ergibt sich eine mögliche Höchstgeschwindigkeit von weniger als 1 km/h.

Zwei Gedanken sind jedoch in die Überlegungen einzubeziehen:

- GPS liefert bei jeder Messung neben der Position auch die Geschwindigkeit über Grund.
- Durch technischen Fortschritt kann sich die Meßfrequenz erhöhen.

## 6. Schlußfolgerungen

Die ökonomische und ökologische Wirksamkeit einer möglichen Nutzung von GPS in der Feldwirtschaft ist von vielfältigen Faktoren abhängig. Die Kosten, die Genauigkeit und die Systemintegrität von GPS bilden nur einen Teil dieser Faktoren. Erfolgreiche verfahrenstechnische Arbeiten, eine Verbesserung des allgemeinen Ausstattungsgrades der bäuerlichen Betriebe mit Elektronik und Erfolge bei der Einführung des landwirtschaftlichen Bussystems LBS in die Praxis sind weitere wesentliche Faktoren.

GPS ist ein differenziert zu betrachtendes System zur Ortung und Navigation. Neben den Entwicklungen von DGPS-Empfängern auf der Basis von Codephasenmessungen, müssen die Entwicklungen sowohl bei singulären GPS-Empfängern als auch beim dynamischen PDGPS aufmerksam verfolgt werden.

Dynamisches PDGPS ist eine junge Technik, die sich für das Anschlußfahren von Feldarbeitsmaschinen eignen könnte. Voraussetzungen für eine positive Kostenentwicklung dieser Technik sind nur teilweise gegeben. Derzeit ist kein Massenmarkt für die Nutzung von PDGPS zu erkennen. Ein höherer technischer Aufwand im Feldempfänger und die vergleichsweise geringe Reichweite der PDGPS - Referenzstationen sind zusätzliche preistreibende Faktoren.

Die Genauigkeit von dynamischem PDGPS ist die Genauigkeit der Position einer Antenne. Für das Anschlußfahren von Interesse ist jedoch die genaue Spur- und Geräteführung.

## 7. Ausblick

Aus den notwendigen Genauigkeiten in der Spurführung für das Anschlußfahren von Feldarbeitsmaschinen sind Anforderungen an das System zur Ortung und Navigation abzuleiten. Dazu erforderliche theoretische Überlegungen sind Teil weiterer Arbeiten in Bornim. Dynamisches PDGPS wird in diese Überlegungen einbezogen.

Abschattungen von Satellitensignalen können zum Ausfall der Positionsinformation durch GPS auf dem Feld führen. Die Konsequenzen dieses Störfalls für die Spurführung sollen untersucht, mögliche Gegenmaßnahmen sollen bewertet werden.

Das Satellitennavigationssystem GPS ermöglicht es auch, die Geschwindigkeit der GPS-Antenne über Grund zu messen. Dieses Potential sollte hinsichtlich einer landtechnischen Anwendung bewertet werden.

### 8. Literaturverzeichnis

- [1] R.E.YOUNG, J.OLSEN, G.JAHNS; Automatic Guidance of Farm Vehicles - a monograph; Agricultural Engineering Departmental Series No. 1, Auburn University 1976, 16 S.;
- [2] J.K.SCHUELLER; Machinery and systems for spatially variable crop production; ASAE-Paper No. 88-1608, Chicago 1988;
- [3] W.E.LARSON, D.A.TYLER, G.A.NIELSEN; Field navigation using the Global Positioning System; ASAE-Paper No. 88-1604, Chicago 1988;
- [4] C.H.CHOI, D.C.ERBACH, R.J.SMITH; Navigational Traktor Guidance System; Trans. ASAE, VOL. 33(3) 1990, S. 699-706, St.Joseph USA;
- [5] R.J.PALMER; Precise Navigation, Guidance and Control Services within the Agricultural Community; The Journal of Navigation, vol.42(1989) No.1, S. 1-10,
- [6] J.V.STAFFORD; Mapping weed location for spatially selective herbicide application; Presentation at the International Symposium on Locating Systems for Agricultural Machines, 4-6 June 1991, Gödöllő, Hungary;
- [7] F.MacLEOD; Agricultural Vehicle Positioning and its Integration with a Large-Scale Land Information System; The Journal of Navigation, 44(1991) No.1, S. 30-36.;
- [8] M.O.MONOD; Localization of Agricultural Machines; Presentation at the International Symposium on Locating Systems for Agricultural Machines, 4-6 June 1991, Gödöllő, Hungary;
- [9] E.SCHNUG, S.HANEKLAUS, J.LAMP; Economic and ecological optimization of farm chemical application by Computer Aided Farming CAF; Technical papers and posters abstracts from the International Conference on Agricultural Engineering AGENG 1990, S. 88-89;
- [10] H.AUERNHAMMER; Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung; Landtechnik 45(1990)7+8, S. 272-278;
- [11] H.AUERNHAMMER; Elektronik auf dem Feld und im Weltall; DLG- Mitteilungen/agrar inform 11/1991; S. 42, 44, 46;
- [12] H.SCHÖN; Landtechnik 2000, Landtechnik 46(1991)1+2, S. 8-13;
- [13] G.JAHNS, H.SPECKMANN; Requirements to Standardize Data Transfer in Computer Aided Agriculture; ASAE-Paper No. 88-1060, St. Joseph, USA 1988;
- [14] M.BAUER; Vermessung und Ortung mit Satelliten; Wichmann Verlag Karlsruhe 1989, 257 S.;
- [15] EDITOR: Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. Düsseldorf; First International Symposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System; Verlag TUV Rheinland 1991, 720 S.;
- [16] diverse Autoren; dlz spezial - Elektronik für Profis; dlz 12/90, 42 S.;



## **Entwicklung eines Pflanzenunterscheidungssystems auf bildanalytischer Basis zur Bonitierung und zukünftig zur direkten Steuerung bei der Unkrautbekämpfung**

Dipl.-Ing. agr. Heiko Georg und PD Dr. agr. Franz-Josef Bockisch  
Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität Gießen

### **Einleitung**

Die Weiterentwicklung und der breite Einsatz der digitalen Bildverarbeitung in vielen Bereichen eröffnen neue Perspektiven für eine Vielzahl von Steuerungs- und Meßvorgängen in der Landtechnik. Besonders geeignet erscheint die digitale Bildverarbeitung als optischer Sensor zur qualitativen und quantitativen Erfassung von Unkrautpflanzen. Fernziel ist die Entwicklung eines "Unkrautsensors", der am Traktor angebracht direkt eine Pflanzenschutzspritze steuert. Mit dieser selektiven Herbizidanwendung ist eine sinnvolle Reduzierung der Aufwandmengen möglich.

### **Automatische Bildanalyse und Bedeutung einer exakten Unkrautbestimmung**

Die digitale Bildverarbeitung wird seit einigen Jahren in sehr unterschiedlichen Bereichen für Meß- und Steuerungszwecke eingesetzt. Die bekanntesten sind: Medizin (Computer-Tomographie, NMR), Fernerkundung (Satellitenbilddauswertung) und die industrielle Bildverarbeitung, die beispielsweise zur Qualitätskontrolle und Robotersteuerung verwendet wird. Die universelle Anwendung und die Erfassung bisher schwer meßbarer Größen wie Oberflächenstruktur oder Formfaktoren haben zu einem zunehmenden Gebrauch der digitalen Bildverarbeitung im Bereich der landwirtschaftlichen bzw. landtechnischen Forschung geführt. Am Institut für Landtechnik in Gießen bildet die digitale Bildverarbeitung seit einigen Jahren einen besonderen Forschungsschwerpunkt und damit eine gute Voraussetzung für die Entwicklung von Grundlagen zur automatischen Unkrauterkenntung. Untersucht werden unter anderem Anwendungen der Bildverarbeitung zur Beurteilung landwirtschaftlicher Verfahrenstechnik, wie z.B. Mais-, Ganzpflanzen- und Strohhäckseltechnik, Bruchkornerkennung oder Bodenbearbeitung. Zur möglichen Nutzung dieser Beurteilungstechniken muß aber in den meisten Bereichen zusätzliche Entwicklungsarbeit geleistet werden, um die notwendigen Voraussetzungen für den Einsatz der digitalen Bildverarbeitung zu schaffen. Ausgehend von der Erkenntnis, daß aufgrund steigender Umweltauflagen und abnehmender gesellschaftlicher Akzeptanz eine

Reduzierung des Herbizideinsatzes notwendig ist, besteht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung und Nutzung der digitalen Bildverarbeitung als "Unkrautsensor". Mit der potentiellen Nutzung der digitalen Bildverarbeitung zur Steuerung einer Pflanzenschutzspritze befaßte sich zuerst GUYER (1984) in einer grundlegenden Arbeit. Darin wurden die Einsparungsmöglichkeiten für den Mais- und Sojaanbau in den USA auf ca. 11.000 t Herbizide jährlich geschätzt, wenn nur selektiv appliziert würde. In einer anderen Arbeit untersuchte PETRY (1989) im off-line Verfahren die Unterscheidung einzelner Unkrautpflanzen aufgrund morphologischer Parameter mit Hilfe einer Diskriminanzfunktion.

### Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung

Entwicklungsschwerpunkte bei der Bildverarbeitung zur Unkrauterkenntung am Institut für Landtechnik in Gießen bilden die Softwareentwicklung für die Farbverarbeitung und die Messung morphologischer Parameter. Die Textur als zusätzliche Information zur Oberflächenbeschaffenheit befindet sich zur Zeit noch im Entwicklungsstadium. Zur Gewinnung von Unkrautbildern auf dem Feld wird von uns ein in Anlehnung an PETRY und KÜHBAUCH 1988 speziell entwickeltes Aufnahmestativ (Abb. 1) verwendet.

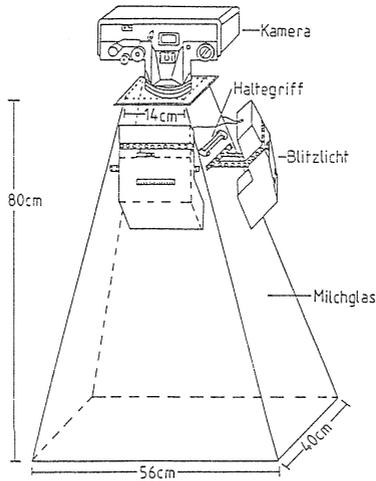


Abb. 1: Aufnahmestativ aus weißem Plexiglas nach PETRY und KÜHBAUCH (1988) für gleichmäßig belichtete Aufnahmen.

Die vier synchron ausgelösten Blitze gewährleisten zusammen mit den weißen Plexiglaswänden eine diffuse Ausleuchtung der 40 x 50 cm großen Aufnahmefläche. Bisher wurde als Kamera eine handelsübliche Spiegelreflexkamera benutzt. Zur Zeit wird als Verbesserungsschritt ein Still-Video-System erprobt, daß den Vorteil einer direkten Digitalisierung und schnelleren Verarbeitung der Aufnahmen bietet, da herkömmlich gewonnene Bilder und Dias erst in einem zusätzlichen Arbeitsschritt digitalisiert werden müssen (Abb. 2). Bei dem Still-Video-System findet diese Umwandlung in der Kamera statt. Man kann sich die Digitalisierung als eine Rasterung des analogen Bildes in x- und y-Richtung (Zeilen und Spalten) vorstellen, wobei der Helligkeitswert am Punkt x,y dem sogenannten Grauwert entspricht. Jeder Bildpunkt, abgeleitet von Picture element "Pixel" genannt, kann einen von 0 - 255 möglichen Grauwerten annehmen (Abb. 2). Zum Vergleich: Das menschliche Auge ist nur in der Lage zwischen maximal 16 Grauwerten zu unterscheiden! Die Größe des Rasters beträgt zumeist 512 Zeilen mal 512 Spalten und mehr.

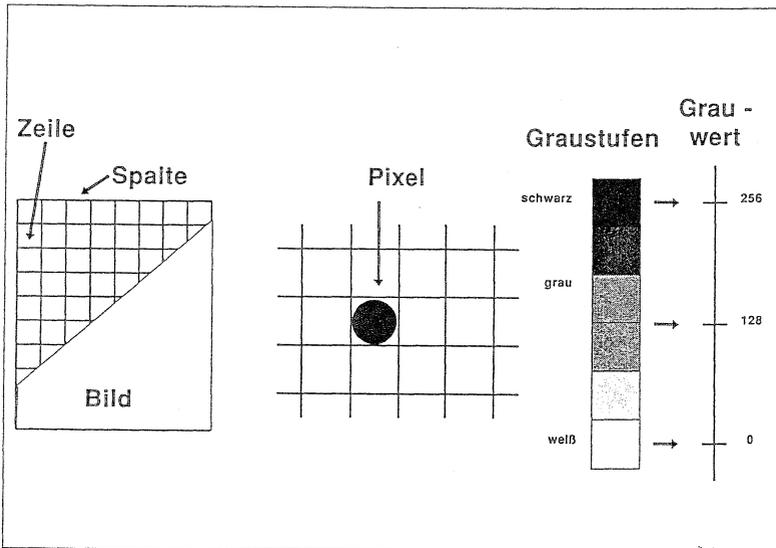


Abb. 2: Schematische Darstellung des Digitalisierungsvorgangs bis zum Grauwertbild.

Das Ergebnis einer solchen Digitalisierung ist ein Grauwertbild, d.h. ein Schwarz/Weißbild. Sollen zusätzlich auch Farbunterschiede zur besseren Differenzierung gemessen werden, müssen die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) getrennt digitalisiert werden (Abb. 3). Man erhält dadurch für jedes Pixel drei Grauwerte, je einen für Rot, Grün und Blau. Der Informationsgehalt eines digitalen Farbbildes ist daher größer als der eines Grauwertbildes, allerdings steigt auch der Anspruch an die Software zur Auswertung.

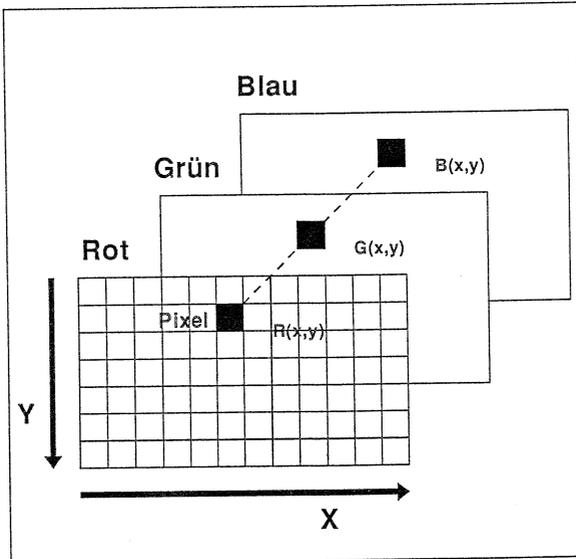


Abb. 3: Prinzip der digitalen Farbbildverarbeitung (RGB).

### Entwicklung von Unterscheidungskriterien

Besonders bei der komplexen Pflanzenerkennung sind viele Informationen notwendig, um eindeutig zwischen Unkräutern und Nutzpflanzen unterscheiden zu können. Für die Trennung von Bodenoberfläche und Pflanzen im Bild ist die Echtfarbinformation daher unverzichtbar. In einem einfachen Grauwertbild könnten organische Substanzreste an der Bodenoberfläche den gleichen Grauwert wie Pflanzenteile besitzen und dadurch die Trennung erschweren. Die einfachste Möglichkeit der Echtfarbbildverarbeitung besteht in der Farbdifferenzbildung. Für die

Auswertung von Pflanzenaufnahmen bedeutet dies, den roten und grünen Farbkanal voneinander abzuziehen und aus dem entstehenden Differenzbild nach einer Schwellwertoperation ein Binärbild (zweistufiges Graubild) zu erzeugen.

Ein anderer Weg der Farbverarbeitung ist die Bildung eines zweidimensionalen Merkmalsraums zwischen Rot und Grün (Abb. 4). Dabei bilden sich für die vorliegenden Unkrautaufnahmen zwei (Farb-)Cluster, die sich mit Hilfe von Algorithmen (HABERÄCKER 1987) mathematisch beschreiben lassen.

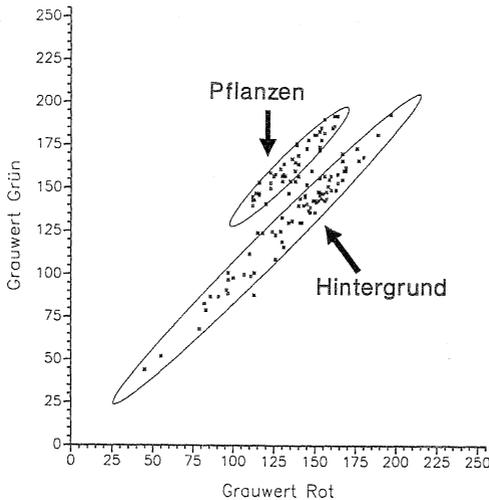


Abb. 4: Zweidimensionales Histogramm der Grauwerte für jedes Pixel der Kanäle Rot und Grün - damit läßt sich der Bildhintergrund (z.B. Boden, Strohreste) von den Pflanzen unterscheiden.

Ein weiteres Verfahren zur Farbbildverarbeitung ist die Darstellung der Farben im HSI-Raum. Der HSI-Raum setzt sich zusammen aus den drei Komponenten Hue (Farbton), Saturation (Sättigung) und Intensity (Helligkeit). Die Berechnung der Werte für H, S und I erfolgt durch eine nichtlineare Transformation der bereits erwähnten Farbwerte für R, G und B nach der Gleichung:

$$H = (90 - \arctan(F/3) + C)/360$$

mit  $F = (2R - G - B)/(G - B)$   
und  $C = 0$ , wenn  $G > B$  bzw.  $C = 180$ , wenn  $G < B$ ;

$$S = 1 - \min(R, G, B)/I;$$

$$I = (R + G + B)/3;$$

Die HSI - Farbdarstellung hat den Vorteil, daß z. B. für Pixel gleicher Helligkeit (Intensity) noch Farbunterschiede bestimmt werden können. Im RGB Farbraum ist diese Farbtrennung schwieriger, da die Helligkeit in allen drei Komponenten enthalten ist und damit zu einer hohen Korrelation der Farben führt. Die HSI - Farbdarstellung kommt dem menschlichen Farbempfinden am nächsten und ermöglicht auch die Quantifizierung von Farbabstufungen, wie die Unterscheidung zwischen verschiedenen Grüntönen.

Am Institut für Landtechnik in Gießen wird die HSI - Farbverarbeitung technisch mit einem Bildverarbeitungsboard in einem IBM-kompatiblen AT-Rechner realisiert. Die Umwandlung der RGB- in HSI-Signale und umgekehrt geschieht hardwareseitig in Echtzeit (< 40 ms).

Aufgrund der gewonnenen Informationen läßt sich direkt ein Binärbild errechnen, das nur Pflanzen enthält. Damit kann für Reihenkulturen wie Mais oder Zuckerrüben bereits auf dieser Entwicklungsstufe des Unkrauterkennungssystems der allgemeine Unkrautdeckungsgrad ermittelt werden. Zur Unterscheidung einzelner Unkrautarten und zur Trennung der Unkräuter von den Nutzpflanzen sind zusätzliche Entwicklungsschritte notwendig. Dazu gehört die Bestimmung morphologischer Parameter aus den bereits beschriebenen Binärbildern, für die ein automatischer Konturverfolger nach einem Algorithmus von PAVLIDIS (1982) in der Sprache "C" programmiert wurde. Dieser Konturverfolger "findet" automatisch die Objekte (Pflanzenteile) im Binärbild und beginnt an einem bestimmten Punkt des äußeren Umrisses mit der Verfolgung der Kontur. Dabei werden ausgehend vom Anfangspunkt als Mittelpunkt die acht Nachbarpixel (3x3 Matrix) auf ihre Zugehörigkeit zu Kontur hin untersucht und der nächste Mittelpunkt der Verfolgermatrix bestimmt. Dadurch ist es möglich, sowohl Winkeländerungen als auch die Koordinaten des Umrisses auszuwerten und als morphologische Parameter einzusetzen. Der Algorithmus wurde zunächst auf einem IBAS Bildverarbeitungssystem implementiert, ist aber grundsätzlich auf alle anderen Bildverarbeitungssysteme übertragbar. Die freie Programmierung des Konturverfolgers ermöglicht außerdem die Kombination der Umrißinformation mit der Farbinformation des Bildes. Ziel ist eine Art Farbverfolgung (Farbtracing), d.h. die Konturbestimmung von Flächen mit gleicher Farbe. Denkbar ist eine Verbesserung der Farberken-

nung auch durch die Bestimmung sogenannter "Fuzzy Sets", einer von ZADEH (1965) entwickelten Entscheidungslogik, die dem menschlichen Denk- und Entscheidungsprozeß sehr nahe kommt.

Die Textur, die als dritte angestrebte Bildinformation die Oberflächenbeschaffenheit der Pflanzen beschreibt, kann durch die statistische Verarbeitung von Grauwerten oder anderer Strukturmerkmale, wie z.B. durch Fraktale, untersucht werden.

### Ausblick

Die drei bereits beschriebenen "Informationsstränge" Textur, Farbe und Morphologie können als einzelne Bestandteile (Neuronen) eines neuronalen Netzes aufgefaßt werden, das aufgrund digitaler Pflanzenbestandsaufnahmen einer oder mehrerer am Traktor angebrachter CCD-Kameras entscheidet, ob die Bekämpfungsschwelle für bestimmte Unkrautarten überschritten wird (Abb. 5).

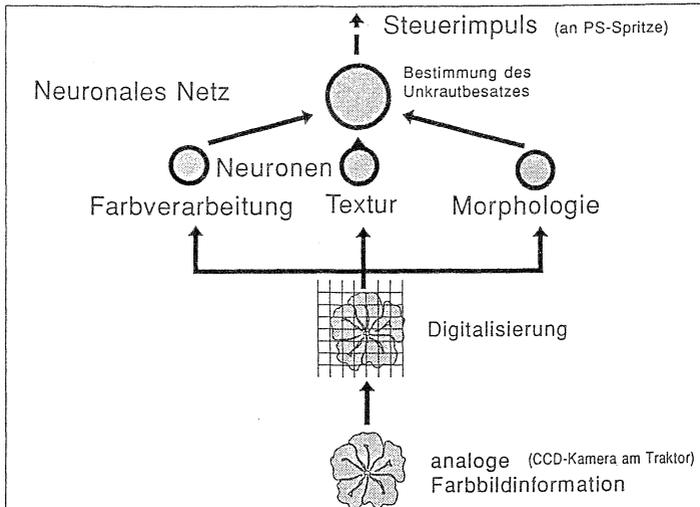


Abb. 5: Funktionsprinzip der Informationsgewinnung aus digitalisierten Pflanzenaufnahmen und mögliche Weiterverarbeitung mit neuronalen Netzen.

Der entsprechende Steuerimpuls erlaubt eine angepasste Mitteldosierung in der Pflanzenschutzspritze. Wird die Bekämpfungsschwelle nicht erreicht, werden keine

Herbizide ausgebracht und dadurch sinnvoll Mittel eingespart. Neuronale Netze werden heute bereits in der industriellen Prozeßsteuerung eingesetzt (REILLY und SCOFIELD 1989), die mit bis zu zehn Neuronen noch akzeptable Verarbeitungsgeschwindigkeiten besitzen. Mit einem solchen Modell eines neuronalen Netzes wird die Realisierung des angestrebten "Unkrautsensors" mit der Entwicklung jedes weiteren Informationsverarbeitungsstrangs wahrscheinlicher.

Die Entwicklung eines solchen Systems macht Herbizide allerdings nicht überflüssig, sie bildet vielmehr einen Kompromiß zwischen dem notwendigen minimalen Aufwand an Herbiziden und dem Schutz der Umweltressourcen. Sollte es gelingen einen "Unkrautsensor" zu entwickeln, so lassen sich damit mittel- bis langfristig auch mechanische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen steuern. Denkbar ist auch die Integration eines GPS-Systems, um die Informationen über den Unkrautbesatz direkt mit der Position auf dem Schlag verbinden zu können. Dadurch wäre eine automatische Unkrautkartierung möglich. Sehr wichtig erscheint jedoch beim Verfolgen des Entwicklungszieles "automatischer Unkrautsensor", daß jeder Entwicklungsschritt für die off-line Bestimmung des Unkrautbesatzes schon Vorteile für die objektive Entscheidung nach dem Schadschwellenprinzip bringt.

#### Literaturverzeichnis:

Guyer, D.E.; Miles, G.E.; Schreiber, M.M.: Computer vision and image processing for plant identification. ASAE-Paper No. 84-1632, ASAE, St. Joseph (USA), 1984

Haberäcker, Peter: Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen. Hanser München - Wien 1987

Pavlidis, T.: Algorithms for Graphics and Image Processing. Springer, Berlin, 1982

Petry, W. und W. Kühbauch: Messung des Unkrautdeckungsgrades durch echtfarbentüchtige quantitative Bildanalyse auf Personalcomputern. KALI - Briefe (Büntehof) 18 (4) 1988, S. 311-323

Petry, W.: Unkrautkontrolle im landwirtschaftlichen Pflanzenbau mit Hilfe der quantitativen Bildanalyse. Dissertation, Universität Bonn, 1989

Reilly, D.L.; Scofield, C.: Visuelle Qualitätsinspektion mit mehrstufigen neuronalen Netzen. Elektronik, 1989, S.69-76

Zadeh, L.: Fuzzy sets. Information and Control, 8,1965, S.338-353

## Ortung und Navigation in der Landwirtschaft der USA - Stand und Ausblick

von

J. K. Schueller, S. Borgelt und K. Wild

### Einleitung

Dieser Bericht soll einige Informationen über den Gebrauch von Navigations- und Ortungsgeräten in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion der USA für deutsche Leser vermitteln. Er ist nicht erschöpfend, soll aber etliche abgeschlossene und gegenwärtig laufende Aktivitäten auf diesem Gebiet erläutern.

Schon vor längerer Zeit wurden erste Versuche im Bereich landwirtschaftlicher Ortung und Navigation durchgeführt. Besonders erwähnenswert ist hier das National Tillage Laboratory des US-Landwirtschaftsministeriums und der Auburn Universität. In ihrem System folgten Maschinen einem Draht, der im Boden eingegraben war. Weitere Untersuchungen im Bereich der Steuerung wurden mit Zwangsführungen von Maschinen in Fahrgassen durchgeführt. Heute gibt es kommerzielle Produkte zur automatischen Steuerung von Sä- und Pflegegeräten quer zur Fahrtrichtung oder zur Steuerung des Traktors, an dem diese Geräte angebaut sind.

Im Bezug zur Erdoberfläche hat eine Maschine sechs Freiheitsgrade. Dabei handelt es sich um geographische Länge und Breite, Höhe über dem Meeresspiegel, Neigung, Gierung und Roll. Eine zweidimensionale Betrachtungsweise ist für landwirtschaftliche Anwendungen in der Regel ausreichend.

## **Einteilung von Ortungs- und Navigationsgeräten**

In den weiteren Erläuterungen wird zwischen Ortung und Navigation keine strikte Trennung mehr gemacht, da die Bestimmung der augenblicklichen Position der wahrscheinlich schwierigste Aspekt von Navigation ist. Die verschiedenen Typen von Ortungsgeräten werden von uns in drei Kategorien eingeteilt: Koppelortung (dead-reckoning), Triangulation und Satelliten. Diese werden als nächstes ausführlicher diskutiert.

### **Koppelortung**

Der Ort oder die Position wird beim Einsatz von Koppelortung anhand der Bewegungsrichtung und der zurückgelegten Distanz bestimmt. Im Bereich der Landwirtschaft wird die Bewegungsrichtung durch einen vorgegebenen Weg (z.B. Fahrgassen) oder durch die bekannte Arbeitsspur einer Maschine ersetzt. Mit Koppelortung wird die Positionsunsicherheit auf eine Richtung beschränkt, die Fahrtrichtung. Mit Hilfe des Geschwindigkeits-signales, das zum Tachometer des Traktors geht, kann der zurückgelegte Weg bestimmt werden. Zur Geschwindigkeitsmessung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Am verbreitetsten sind zur Zeit Systeme, die auf der Zählung der Radumdrehungen basieren. Sie sind einfach und kostengünstig, berücksichtigen aber nicht Abweichungen, die durch Radschlupf hervorgerufen werden. Radar ermöglicht eine höhere Genauigkeit durch Eliminierung des Schlupffehlers, ist dafür aber teurer.

Gegenwärtig sind Koppelortungssysteme auf Grund niedriger Kosten und hoher Zuverlässigkeit am beliebtesten. An den Maschinen müssen nur wenig zusätzliche Bauteile angebracht werden. Weitere Komponenten an anderen Orten werden nicht benötigt. Diese Systeme neigen nicht zum Versagen und sind leicht zu pflegen. Das Grundproblem dieser Techniken liegt darin, daß sie Positionen relativ angeben und deshalb Fehler zur Anhäufung neigen. Je länger ein derartiges System ohne Erstellung eines neuen Startpunktes gebraucht wird, desto ungenauer wird die

Positionsbestimmung. Es ist offensichtlich, daß ein Landwirt seinen normalen Arbeitsgang zur Erstellung eines neuen Startpunktes nicht unterbrechen will. Durch den Wendevorgang am Feldende könnte die Wegmessung automatisch neu begonnen werden. Die Bestimmung der Arbeitsspur kann beim Arbeitsbeginn auf jedem Feld erfolgen. Wenn diese Maßnahmen ausreichend oft durchgeführt werden, dann können die Fehler für einige Feldarbeiten auf einem akzeptablem Niveau gehalten werden.

Schumacher und Froehlich (1989) beschreiben ein erfolgreiches Koppelortungssystem zur Ausbringung von Dünger. Sie verwenden Fahrgassen und gebrauchen ein fünftes Rad zur Wegmessung. Lor-Al arbeitet in Lizenz für Soil Teq an "Variable Rate Technology", die von Soil Teq entwickelt und patentiert wurde. Geräte, die von Lor-Al zur Ausbringung flächenspezifischer Dosierungen an Dünger und Pestiziden verkauft werden, können Koppelortung in Verbindung mit festgelegten Fahrgassen anwenden. Ag Chem Incorporated, die nun einen jährlichen Umsatz von ca. 100 Millionen US-Dollar hat, zeigt jetzt ein großes finanzielles Interesse an beiden Firmen.

#### **Erdgestützte Triangulation**

Eine andere Methode zur Bestimmung der Position ist der Gebrauch von Triangulation ausgehend von Orten, deren Position bekannt ist. Es gibt einige Systeme, die auf diesem Verfahren beruhen. Diese Systeme beinhalten fertig verfügbare Technologien und Komponenten. Der Nachteil dieser Technologien ist, daß Baken oder Responder auf der Erde positioniert werden müssen. Außerdem dürfen keine Sichthindernisse, die die Signalübertragung beeinträchtigen, vorhanden sein. Die Genauigkeit der erdgestützten Triangulation hängt von dem jeweiligen Arbeitsgang und von den eingesetzten Geräten ab.

Für Versuche über Ertragskartierung an der Texas A&M Universität wurde ein kommerzielles Ortungssystem von Del Norte Technology eingesetzt, das für nautische Anwendungen gebaut ist

(Searcy et al., 1990; Schueller und Bae, 1987). Choi et al., (1990), benutzten zwei Triangulationseinheiten zur Steuerung eines Traktors. An der Ohio State Universität entwickelten Gordon und Holmes (1988) ein System, das auf einem rotierendem Laser und einem Polarkoordinaten System beruht.

Ortungssysteme dieses Typs wurden unter dem Namen AgNav und AgNavII verkauft. Sie wurden auf einigen Soil Teq - Geräten und für andere Zwecke verwendet. Im Jahre 1988 wurden ca. 25% der verkauften Einheiten zur Positionsdatengewinnung und zur Navigation in Forschungsarbeiten und Sonderaufgaben eingesetzt (Harmening, 1988). Sie waren kein kommerzieller Erfolg und werden nicht länger zum Verkauf angeboten. Vermutliche Gründe für den kommerziellen Fehlschlag sind fehlende Marktreife, schwieriger Gebrauch, unausgereifte Technologie und ungenügende Genauigkeit.

Palmer (1991) hat auch ein Ortungssystem für die Landwirtschaft entwickelt. Es basiert auf "Spread Spectrum"-Technologie mit Frequenz-"Hopping" zwischen 47 Frequenzen. Die Genauigkeit der unter 5 kg schweren Einheit soll besser als 15 cm sein. Sie benutzt ein anpassungsfähiges "FIR"-Programm zur Mehrfachwegauswahl des Signales und eine 1200 baud RS-232C Datenverbindung. Tyler, ein Düngergerätehersteller, hat einige Geschäftsvereinbarungen mit Palmers Organisation. Bis jetzt wurden aber noch keine Einheiten zum Verkauf angeboten.

Eine andere Möglichkeit zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge ist der Einsatz von bereits existierenden Navigationshilfen der Luft- und Schifffahrt. Wagner und Schrock (1986) von der Kansas State Universität gebrauchten LORAN-C zur Ertragskartierung. Sie stellten eine Genauigkeit von 20 m unter den Einsatzbedingungen des Mittleren Westen der USA fest. Kommerziell wurde LORAN-C zur Kartierung von Pestizideinsätzen mit Sprühflugzeugen angewendet. Der Hauptvorteil dieses Systems ist, daß nur ein einziger kostengünstiger Empfänger erforderlich ist. Aber auf Grund seiner geringen Genauigkeit kann LORAN-C für viele landwirtschaftliche Feldarbeiten nicht eingesetzt werden.

## Satelliten

Das technologisch aufwendigste Verfahren ist die Positionsbestimmung mit Hilfe von Satellitensystemen. Das am häufigsten ins Auge gefaßte System ist das Global Positioning System (GPS) des amerikanischen Verteidigungsministeriums. Da diese Satelliten und die dazugehörenden Bodenanlagen für viele Arten militärischer und ziviler Anwendungen eingesetzt werden, ist eine breitangelegte Aufteilung der Kosten möglich. Zusätzlich können Hersteller von GPS-Empfänger von zunehmenden Stückzahlen und den damit verbundenen Vorteilen ausgehen. Die Kosten für GPS-Empfänger sind trotz der fortschrittlichen Technologien, die eingesetzt werden, zurückgegangen. Da nun eine weltweite Satellitenabdeckung gegeben ist, braucht man an hardware nur noch einen GPS-Empfänger für ein landwirtschaftliches Fahrzeug.

Zu den Nachteilen zählt die nur teilweise Verfügbarkeit der Signale. Eine vollständige zeitliche Abdeckung ist auf Grund von Schwierigkeiten mit der Inumlaufringung von Satelliten noch nicht möglich. Zusätzlich gibt es Probleme mit der Genauigkeit, vor allem seitdem das amerikanische Verteidigungsministerium die Signale absichtlich verfälscht. Die Genauigkeit kann durch differentiell GPS, das zwei Empfänger (einer davon an einem Ort mit bekannter Position) und eine Funkverbindung benutzt, verbessert werden.

GPS wurde von Wissenschaftlern an der Montana State Universität, an der Universität von Missouri und an den Forschungsanstalten des amerikanischen Landwirtschaftsministerium in Ames, Iowa, eingesetzt. Borgelt von der Universität von Missouri benutzt Geräte von Ashtech (Borgelt, 1992). Colvin et al, (1991) verwenden eine Referenzstation und einen 10X Navigation Receiver von Trimble. Die Forschungsarbeiten an den verschiedenen Instituten beschäftigen sich überwiegend mit Ertragskartierung und der Ausbringung von Mineraldünger und Pestiziden. Neale (1991) von der Utah State Universität setzte einen Trimble Pathfinder zur Positionsermittlung im Flugzeug während Videoaufnahmen ein.

Über Soil Teq Düngerstreuer, die mit einem GPS-Empfänger ausgestattet waren, gibt es einige Berichte und mindestens eine öffentliche Vorführung. Die bedeutenden GPS-Empfängerhersteller, wie Trimble oder Ashtech, haben ein besonderes Interesse für den landwirtschaftlichen Markt und sie nahmen an Konferenzen und Tagungen für Pflanzenbauer und landwirtschaftliche Maschinenbauer teil.

### **Zukünftige Entwicklungen**

Im Augenblick dominiert Koppelortung auf dem Markt für Ortung in der Landwirtschaft der USA, aber das kann sich zu Gunsten anderer Verfahren ändern. Zusätzlich wird der momentan kleine kommerzielle Markt und der Forschungsbereich in Zukunft stark wachsen.

Eine zukünftige Entwicklung wäre, daß örtliche Kooperativen oder Landhandelsfirmen die notwendige Infrastruktur für Ortung in der Landwirtschaft schaffen. Dabei kann es sich um Sender von Positionssignalen für Triangulationssysteme oder um Referenzstationen für differentielles GPS handeln. Ein Großteil des Mineräldüngers und der Pflanzenschutzmittel in den USA wird von diesen Kooperativen und Firmen ausgebracht. Sie haben einen ausreichend großen Umsatz, um die Ausgaben für Ortungsgeräte über eine große Fläche amortisieren zu können. Dadurch werden auch die Kosten per Einheit reduziert. Den ersten Gebrauch von fortschrittlichen Ortungssystemen wird wahrscheinlich an Pflanzenschutzgeräten dieser Firmen gemacht werden. Später werden dann auch Landwirte Empfänger für ihre Mähdrescher und andere Landmaschinen erwerben.

## Literatur\*

Alsip C. und Ellingson J. (1991) Computer correlation of soil color sensing with positioning for application of fertilizer and chemicals. AUTO-AG, S. 317-325

Anon. (1988) Aerial Computer tracks chemical changes. Agricultural Engineering. März/April. S. 27

Choi C.H., Erbach D.C. und Smith R.F. (1990) Navigational tractor guidance system. Transactions ASAE. 33(3):699-706

Colvin T.S., Karlen D.L. und Fischer N. (1991) Yield variability within fields in central Iowa. AUTO-AG, S. 366-372

Gordon G.P. und Holmes R.G. (1988) Laser positioning system for off-road vehicles. ASAE Paper No. 88-1603

Harmening E. (1988) Persönliches Gespräch. D&N Micro Products, Fort Wayne, Indiana. (Fortbestand der Firma D&N Micro Products ist ungewiß)

Monod M.O. und Mechineau D. (1988) Absolute field location. AgEng '88 Paper No. 88.393. Paris

Nybrant T. (1988) Persönliches Gespräch. ARNEX, Sweden

Palmer R.J. (1991) Progress report of a local positioning system. AUTO-AG, S. 403-408

Schumacher J.A. und Froehlich D.P. (1990) Spatially control and field operations via laptop. SAE Paper No. 901590

Schueller J.K. und Bae Y.H. (1987) Spatially-attributed automated combine data acquisition. Computers and Electronics in Agriculture. 2:119-127

Searcy S.W., Schueller J.K., Bae Y.H. und Stout B.A. (1990) Measurement of field location using microwave frequency triangulation. Computers and Electronics in Agriculture. 4:209-223

Wagner L.E. und Schrock M.D. (1986) Field experiences with LORAN-C for positioning agricultural machinery. ASAE Paper No. MCR 86-113

\* Literaturangaben, die mit "AUTO-AG" gekennzeichnet sind, wurden dem Tagungsband der Konferenz für "Automated Agriculture for the 21st Century" im Dezember 1991 in Chicago entnommen. Der Tagungsband kann bei der American Society of Agricultural Engineers (Publikation 11-91) bestellt werden.



## Lokale Unterschiede von Wachstum und Ertrag bei Winterweizen anhand von Boden- und Bodennährstoffkarten

Delcourt, H., J. de Baerdemacker und J. Deckers  
Katholieke Universiteit Leuven, Belgien

### 1. Einführung

Die Variabilität von Boden-Nährstoff-Gehalten und Pflanzenwachstum innerhalb von Ackerflächen ist seit langer Zeit bekannt. PECK und MELSTED (1973) erstellten pH-, P- und K-Karten von zwei 16 ha Feldern in Illinois, die auf detaillierten Bodenuntersuchungen in einem 25 m-Raster aus dem Jahre 1960 aufbauten. Die Variationskoeffizienten bewegten sich zwischen 7 % (pH) und 76 % (P). Erst in den letzten Jahren wurde spezielle Aufmerksamkeit auf die Entwicklung von Informationssystemen gelegt, die sich mit diesen Variabilitäten innerhalb der Ackerflächen beschäftigen. Eine "Feinabstimmung" der Pflanzenproduktion durch eine lokal variierende Applikation von Agrochemikalien sollte als Ergebnis eine betriebswirtschaftliche Optimierung bei verschärften ökologische Rahmenbedingungen erbringen.

Dieses Referat berichtet über die lokale Verteilung des Pflanzenwachstums und des Ertrages von Winterweizen in Beziehung zum Nährstoffgehalt des Bodens bei zwei Ackerschlägen in Belgien, die typische Ackerböden repräsentieren.

### 2. Material und Methode

Zwei Versuchsfelder mit Lehmboden bzw. sandigem Lehmboden wurden als Untersuchungsstandorte ausgewählt. Die untersuchte Frucht auf diesen Feldern war Winterweizen (60 % Camp Remy (CRm) und 40 % Capitaine (Cpt) in Leefdaal, 100 % CRm in Assent). Eine detailliertere Beschreibung der Versuchsfelder wird im folgenden gegeben.

#### a) Leefdaal (Lehmboden)

Der 12,75 ha große, unregelmäßig geformte Schlag befindet sich in Leefdaal, ungefähr 7 km südwestlich von Leuven (50°50'37" N, 4°36'30" O). Eine Hangneigung von 9 % bedingt leichte bis starke Erosion des Oberbodens. Ein Oberbodenaufbau, der typisch ist für hängige Felder auf Lehmboden, ist ausgebildet. Ein wenig bis leicht erodiertes Oberbodenprofil AbaO (°) kann im oberen Teil des Feldes vorgefunden werden. Etwas weiter hangabwärts ist das Profil stärker erodiert und wechselt von Aba1 (°) nach Abx (°), letzteres mit einer Krume, bestehend aus kalkhaltigem Lößmaterial. Die Bodenprofile im Tal, Abp (°), bestehen hauptsächlich aus heterogenem

---

(°) Die Klassifikation erfolgte entsprechend der belgischen Bodenkartierung, dem FAO-UNESCO System bzw. der USDA Boden Taxonomie.

kolluvialem Material. An wenigen Stellen befindet sich kein Lehm, es wird tertiäres Material vorgefunden (Edx (°)).

b) Assent (sandiger Lehmboden)

Der 5 ha große, mehr regulär geformte Schlag befindet sich in Assent, etwa 6 km südlich von Diest (50°56'3" N, 5°1'48" O). Die Hauptunterschiede in der Bodenentwicklung beruhen auf der unterschiedlichen Mächtigkeit zwischen 20 cm und mehr als 120 cm des tertiären pliocene Materiales, das mit sandigem Lehm überdeckt ist. Die Profile sind definiert als Lca und wLca (°).

Für die Pflanzen- und Bodenuntersuchungen während der Vegetationszeit wurde ein strenges 20 m-Raster über die beiden Felder gelegt. Detaillierte Bodenuntersuchungen wurden durch Bohrungen bis 125 cm Tiefe an den Knoten aller Raster getätigt. Stechzylinderproben des Oberbodens (12 Proben mit 25 cm Länge und 10 mm Radius, verteilt in einem Kreis von 4 m Durchmesser um jeden Rasterknotenpunkt) wurden im März 1990 genommen. Der Kohlenstoffgehalt des Bodens wurde bestimmt mittels der WALKLAY-BLACK-Methode; Boden-P, -K, -Na, -Mg und -Ca wurden bestimmt mittels A.L.- Extrakt und ausgedrückt als mg Nährstoff/100 mg trockener Boden. Alle Bodenanalysen wurden vom Belgischen Bodendienst in Heverlee durchgeführt.

Die Durchwurzelungstiefe der Pflanzen wurde dreimal in Leefdaal gemessen (13. März, 2. und 30. April) und zweimal in Assent (15. März und 2. Mai). Die Pflanzenreflexion wurde mittels zweier Exotech Radiometern (Modell 100 A, 10 DXA) mit identischen Bandpassfiltern gemessen. Ein fixiertes Radiometer war auf den Himmel gerichtet, um alle 5 Min. die Solareinstrahlung zu messen, während das zweite (Blickwinkel: 15 °) im Feld benutzt wurde, um die Oberflächenreflexion an einigen der Rasterknotenpunkte zu ermitteln. Basis-Farbbilder des Getreides wurden für Kalibrierzwecke aufgenommen. Die Reflexionsmessungen wurden überführt in Oberflächenbedeckungsgrade unter Benutzung des Oberflächenreflexionsmodelles SAIL (VERHOEF, 1981).

Die Winterweizenerträge wurden kontinuierlich am Mähdescher erfaßt. Die Maschine war ausgerüstet mit einem Radargeschwindigkeitssensor, einem Sensor für die Schnittbreitenerfassung und einem Ertragsmeßgerät (VANSICHEN, 1991). Die Erträge wurden auf einer Fläche von 100 qm um die Rasterknotenpunkte herum berechnet und gemittelt.

Für die beschreibende statistische Analyse wurde SAS eingesetzt. Unter der Annahme unabhängiger Beobachtungen wurden damit die hauptsächlichsten statistischen Einflüsse auf die gemessenen Variablen abgeschätzt. Eine Einweg-Analyse der Varianzen wurde ausgeführt, um die Auswirkungen der Bodenprofilentwicklung und der Schlaghistorie zu untersuchen. Um die Null-Hypothese mit einer Signifikanz von 0,1 % ( $\alpha = 0,001$ ) zurückweisen zu können, wurde ein t-Test zum Vergleich der Mittelwerte ( $\alpha = 0,05$ ) durchgeführt.

Geostatistische Konzepte wurden angewandt, um die lokale Strukturierung der Boden-

nährstoffe und des Ertrages zu charakterisieren. Wie von JOURNAL und HUIJBRE-GTS (1985) vorgeschlagen, wurden 'Semivariogramme' den experimentell ermittelten Werten unter Benutzung von GEO-EAS zugeordnet. Die Kenntnis der Semivariogramme ist aus drei Gründen wichtig:

1. Der Vergleich der lokalen Strukturen der unterschiedlich gemessenen Variablen kann bei deren Interpretation hilfreich sein.
2. Die Entfernung, auf welcher gesammelte Proben lokal miteinander korrelieren, kann abgeschätzt werden und für die nächste Probennahme Verwendung finden.
3. Das Variogramm wird bei Kriging- und Kokrigingtechniken (Interpolationen) zur Parameterkartierung eingesetzt, um Parameter nicht beprobter Punkte im Feld abschätzen zu können.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Traditionelle statistische Analysen

In den Tabellen 1 und 2 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse der erfassten pflanzenbezogenen Variablen aufgeführt. Hieraus ist zu entnehmen, daß die Variabilität der Durchwurzelung zu Beginn der Vegetationsperiode deutlich höher ist. Diese Unterschiede sind gegen Ende der Wachstumsperiode teilweise abgeschwächt, obwohl die Erträge beider Schläge bei gleicher Düngergabe Variationskoeffizienten von 10 bis 12 % zeigen.

Für die statistische Untersuchung der Ertragsvariationen war das Feld in Leefdaal aufgrund des Vorhandenseins zweier Sorten in zwei Teilschläge unterteilt.

<u>Leefdaal</u>								
Date	Variety	n	X [%]	s [%]	C.V. [%]	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	range [%]
13.03	Camp Remy	102	14	4.5	33	1.2	2.4	23
	Capitaine	31	17	5.2	31	0.2	-1.0	18
02.04	Camp Remy	50	36	9.5	26	-0.3	-0.4	42
	Capitaine	23	60	11.8	19	-1.2	1.6	50
30.04	Camp Remy	94	79	8.2	10	0.3	0.2	38
	Capitaine	30	88	6.4	7	-1.2	0.6	23
<u>Assent</u>								
15.03	Camp Remy	39	30	6.2	21	-0.3	-0.4	27
02.05	Camp Remy	34	87	10.3	12	-0.4	-0.2	41

Tabelle 1: Statistische Kenngrößen der Durchwurzelung von Winterweizen bei verschiedenen Beobachtungen auf den beiden Testfeldern (n = Anzahl der Beobachtungen, x = Mittelwert, s = Standardabweichung, C.V. = Variationskoeffizient, m<sub>3</sub> = Schiefe, m<sub>4</sub> = Exzeß)

<u>Leefdaal</u>						
Variety	Y [kg/m <sup>2</sup> ]	s [kg/m <sup>2</sup> ]	C.V. [%]	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	range <sub>1</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]
Camp Remy	6.42	0.74	11	0.6	0.2	4.1
Capitaine	7.19	0.71	10	-0.7	1.2	4.0
<u>Assent</u>						
Camp Remy	7	0.8	12	-0.2	-0.2	4.2

Tabelle 2: Statistische Kenngrößen für den Ertrag von Winterweizen bei verschiedenen Beobachtungen auf den beiden Testfeldern (Spaltenbezeichnungen wie in Tabelle 1).

Die Ausprägung des Pflanzenwachstums änderte sich während der Wachstumsperiode. Dies spiegelt sich in steigenden Korrelationskoeffizienten zwischen der Bodenbedeckung und größerer zeitlicher Überlappung wider (Tabelle 3). Die Korrelationen zwischen der Bodenbedeckung und dem Ernteertrag für die Sorte "Camp Remy" in Leefdaal und in Assent sind nicht sehr eng. In einigen Fällen blieb diese Ausprägung allerdings erhalten, was aus visuellen Vergleichen der Bodenbedeckung am 15. März und des Ernteertrages im Leefdaal-Schlag gefolgert werden kann (Abb. 1).

<u>Leefdaal</u>								
Camp Remy				Capitaine				
	sc1	sc2	sc3	yield	sc1	sc2	sc3	yield
sc1	-	80***	53***	n.s.	sc1	72***	61***	59***
sc2	-	-	67***	28*	sc2	-	77***	79***
sc3	-	-	-	n.s.	sc3	-	-	72***
<u>Assent</u>								
Camp Remy								
	sc1	sc3	yield					
sc1	-	51**	n.s.					
sc3	-	-	n.s.					

Tabelle 3: Korrelationen zwischen den gemessenen Variablen auf beiden Testfeldern (sc1, sc2 und sc3 ist Bodenbedeckung am 13./15. März, 2. April und am 30. April / 2. Mai; n.s.: nicht signifikant, \*, \*\*, \*\*\*: signifikant bei 5%, 1% und 0.1%)

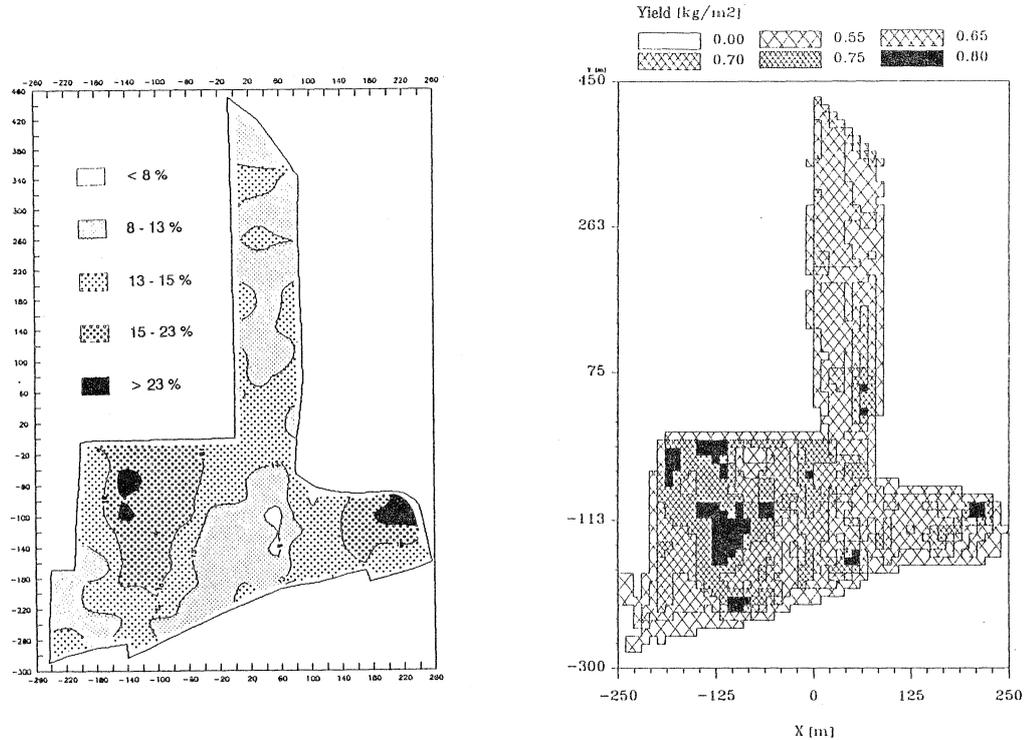


Abbildung 1: Ausprägung der Bodenbedeckung am 15. März (links) und des Ertrages von Winterweizen (rechts) auf dem Feld 'Leefdaal'. Die geringen Erträge an den Schlaggrenzen sind Interpolationseffekte.

Nährstoffe "leicht" erniedrigt vorkommt, so besitzen dennoch 8 ha oder 64 % des Feldes eine gute Nährstoffversorgung. Für den Schlag "Assent" beträgt dieser Wert nur 2 %.

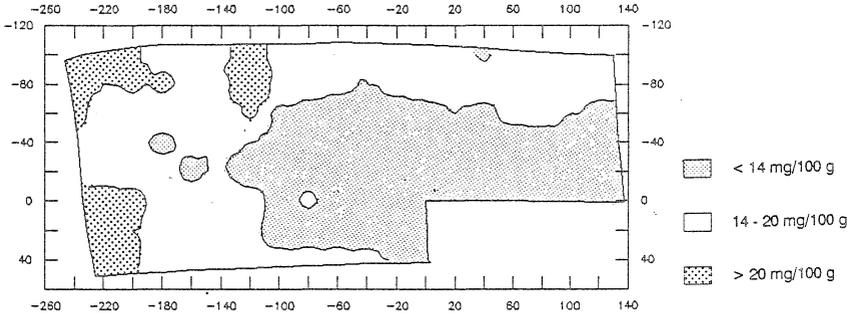


Abbildung 2: Die lokale Verteilung von K-Versorgungsklassen in 'Assent' (mg/100 g Boden). Die weißen Flächen liegen im Versorgungsgrad innerhalb der Vorgaben des 'Belgischen Bodendienstes'.

Für beide Felder wurden, wie in Abbildung 1 schon dargestellt, auch Ertragskarten erstellt. Die Auswirkung des Bodenprofilaufbaues (Leefdaal) wird auf Tabelle 6 sehr deutlich. Bei beiden Weizensorten ist der Ertrag auf Löss erniedrigt, wahrscheinlich aufgrund der Empfindlichkeit auf Trockenheitsstress während des Sommers.

Die Bodenprofile auf denen der Weizen die höchsten Erträge erbrachte sind für beide Weizensorten unterschiedlich. Diese Tatsache unterstreicht die Wichtigkeit der Einbeziehung der lokalen Variation des Bodens. Es konnten keine Auswirkungen unterschiedlicher Nährstoffgehalte oder -versorgungsgrade festgestellt werden. Das sehr niedrige Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) für den Schlag "Leefdaal" läßt vermuten, daß noch andere bodenbürtige Eigenschaften einen Einfluß auf den Ertrag ausüben.

Die Auswirkungen eines kleinen Waldstückes an der Südseite des Schrages auf den Ertrag wird durch folgende nicht lineare Regression erklärt.

$$Y = 0,05 + 0,65 * (1 - \exp(-0,052 * D)) \quad \text{EMS} = 0,0053$$

Mit Y = Ertrag [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]  
D = Entfernung zum Wald entlang der Nord-Süd Richtung  
EMS = mittleres quadratischer Fehler [ $(\text{kg}/\text{m}^2)^2$ ]

Die Ertragsdepression resultierte teilweise aus einer verringerten Photosyntheseleistung des Weizens wegen der Beschattung durch die Bäume. Es konnte ebenso ein örtlicher Wildschaden (hauptsächlich durch Feldhasen) festgestellt werden.

Auch in Assent existiert ein deutlicher Einfluß der "Acker-Vorgeschichte" der letzten zehn Jahre. Die Gruppe der Teilflächen (aus den Katasterplänen) die deutlich unterschiedliche Erträge aufweisen (Tabelle 6) ist identisch mit denen in Tabelle 5, was den sehr großen Einfluß der P-Verfügbarkeit auf den Kornertrag bestätigt. Ein starker Unkrautbesatz auf dem tertiären Material in Sektor 90b ist vornehmlich verantwortlich für die niedrigen Erträge in diesem Bereich.

		R <sup>2</sup> (%)	soil profile					m.s.d.
<u>Leefdaal:</u>	Camp Remy	5	<u>Abp</u>	<u>Aba(1)</u>	<u>Aba(0)</u>	<u>Abx</u>		
	[kg/ha]	*	6.70			5.98	0.51	
	Capitaine	15	<u>Aba(1)</u>	<u>Aba(0)</u>	<u>Abp</u>	<u>Abx</u>		
	[kg/ha]	***	7.41			6.76	0.66	
section code from the landregister								
<u>Assent:</u>	Camp Remy	61	<u>75</u>	<u>72a</u>	<u>73b</u>	<u>76a</u>	<u>90b</u>	
	[kg/ha]	***	8.07				6.28	
							0.56	

Tabelle 6: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Test der Effekte auf die Profilentwicklung und der 'Acker-Vorgeschichte' auf den Ertrag.

### 3.2 Geostatistische Analysen

Die Charakterisierung der lokalen Struktur der untersuchten Variablen erfolgte durch die visuelle Anpassung sphärischer, exponentieller oder linearer Modelle auf die experimentellen Variogramme. Die Ergebnisse in Tabelle 7 wurden durch die Anwendung des folgenden Modells auf die globalen Variogramme mit maximalen Lag-Distanzen für den Schlag "Leefdaal" erzielt:

$$y(r) = C_0 + C_1 * (3/2(r/a) - 1/2(r/a)^3), \quad Vr \in [0,a]$$

$$y(r) = C_0 + C_1 \quad Vr \geq a$$

with  $y(r)$  = semi-variance,  
 $a$  = range,  
 $C_0$  = nugget,  
 $C_1$  = sill.

Nur das Semivariogramm für den Gesamtkohlenstoffgehalt erlangt einen geringen Nugget-Effekt was zeigt, daß lokale Abhängigkeiten nicht über 20 Meter Entfernung hinausreichen. Für die Gehalte an Nährstoffen im Boden variierten die Einflußberei-

che von 45 m bis 120 m. Diese Werte decken sich mit denen aus der Literatur ( Bin He und Peterson, 1991, Lamp und Gottfried, 1991).

Die Analyse der Richtungs - Variogramme für die vier Hauptrichtungen (Abb. 3 und 4) ergab in den meisten Fälle eine Anisotropie für Sill und Range. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, wurde für den Schlag "Assent" eine bemerkenswerte Anisotropie festgestellt. Generell waren die Sill-Werte der Variogramme für die Y-Richtung sehr viel geringer als für die anderen Richtungen. Dieses Phänomen mag in der historischen Feldeinteilung entlang der Longitudinalachse seinen Ursprung haben.

	model	C <sub>0</sub> (*)	C <sub>1</sub> (*)	a [m]
Yield Cpt	spherical	0.0004	0.0026	65
CnR	spherical	0.0015	0.0032	45
pH	spherical	0.1	0.52	75
C	pure nugget	0.046	-	-
P	spherical	7	10	120
K	spherical	5	3.2	80
Na	spherical	0.2	0.27	70
Ca	spherical	15000	95000	70
Mg	spherical	11	200	70

(\*) The dimensions of C<sub>0</sub> and C<sub>1</sub> are the squared dimensions of the considered variable.

Tabelle 7: Modelle für die umfassenden Test-Variogramme für das 'Leefdaal' Feld (C<sub>0</sub>: nugget Effekt, C<sub>1</sub> : Sill-Wert, a: Spannweite).

#### 4. Schlußfolgerungen

Aufgrund detaillierter Oberbodenuntersuchungen auf Nährstoffgehalte, der Bodenbedeckung und des Ertrages von Winterweizen auf zwei Schlägen mit 12,75 ha und 5 ha wurden beträchtliche Variationen ( V.K. 10 % - 30 %) gefunden.

Zuerst beobachtete lokale Unterschiede im Pflanzenwachstum blieben während der ganzen Vegetationsperiode erhalten und beeinflussten teilweise die Ertragsausbildung. Auf dem Schlag bei Leefdaal besaßen 64 % der Ackerfläche eine gute Nährstoffversorgung. Dies traf nur auf 2 % der Ackerfläche des Schlages bei Assent zu.

Die statistischen Analysen beschrieben einige wichtige Einflußfaktoren auf den Weizenерtrag. In Leefdaal wurden signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von der Bodenprofilentwicklung festgestellt. Der Wald entlang der Südgrenze des Schlages bewirkte eine Ertragsreduktion bis zu 60 m in das Feld hinein.

	direction	model	(*)	C <sub>0</sub> (*)	C <sub>1</sub> [m]	a	slope
P [mg/100 g]	0°	spherical	8.5	4.5	60	-	
	45°	spherical	8.5	5	60	-	
	90°	spherical	1	4.8	80	-	
	135°	linear	10	-	-	0.07	
K [mg/100 g]	0°	spherical	0.04	0.07	60	-	
	45°	spherical	0.04	0.075	60	-	
	90°	linear	0.036	-	-	0.0001	
	135°	spherical	0.04	0.085	60	-	

(\*) The dimensions of C<sub>0</sub> and C<sub>1</sub> are the squared dimensions of the considered variable.

Tabelle 8: Modelle für die Richtungs Test-Variogramme für das 'Assent'-Feld (C<sub>0</sub>: nugget Effekt, C<sub>1</sub> : Sill-Wert, a: Spannweite).

In Assent erklärt die Schlag-Historie 61 % der Ertragsvariation, die hauptsächlich auf Unterschieden in der P-Verfügbarkeit basiert.

Aufgrund der geostatistischen Analysen kann geschlossen werden, daß die meisten der untersuchten Nährstoffe und der Ertrag durch eine lokale Verteilungsstruktur charakterisiert werden können. Die festgestellten Einflußbereiche der angewendeten Variogramm Modelle schwankte zwischen 45 m und 120 m. Die in den alten Flurplänen vermerkte frühere Aufteilung des Schlages "Assent" macht sich durch deutlich niedrigere "Sill-Werte" für die Richtungs-Variogramme entlang der longitudinalen Feldachse bemerkbar.

## 5. Nachwort

Wir möchten dem Belgischen Bodendienst in Haverlee sehr herzlich für die Analyse der Bodenproben danken. Ebenso möchten wir dem "Laboratory for Teledetection" für seine Unterstützung bei den Reflexionsmessungen und für die Überführung der Reflexionswerte in Bodenbedeckungswerte danken.

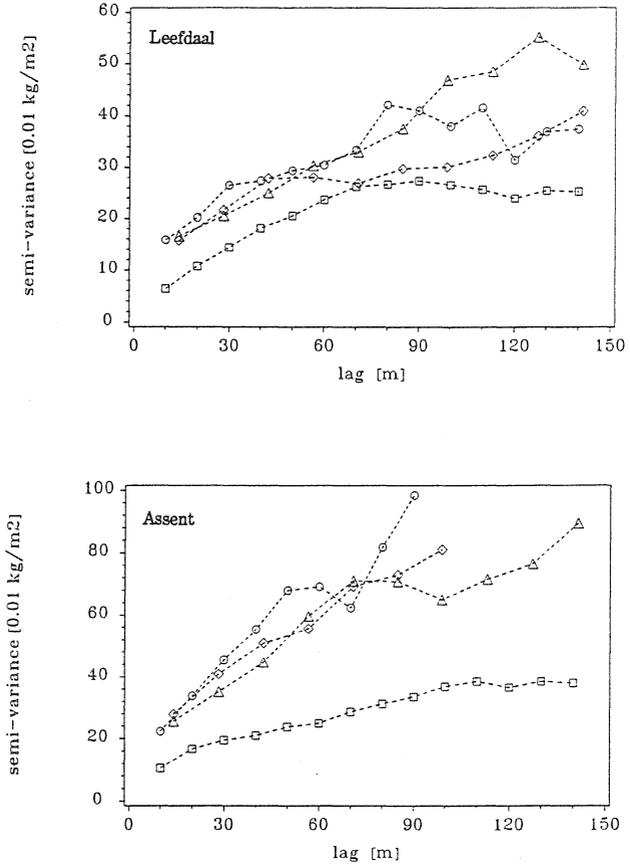


Abbildung 3: Ertrags-Variogramme für das 'Leefdaal' Feld und das 'Assent' Feld (Richtung: Kreis = 0 Grad, Dreieck = 45 Grad, Quadrat = 90 Grad, Raute = 135 Grad).

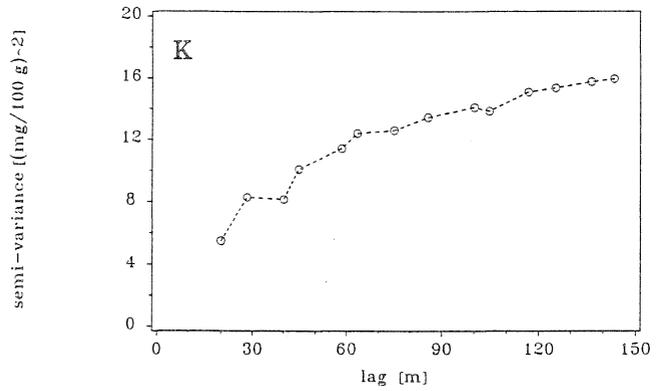
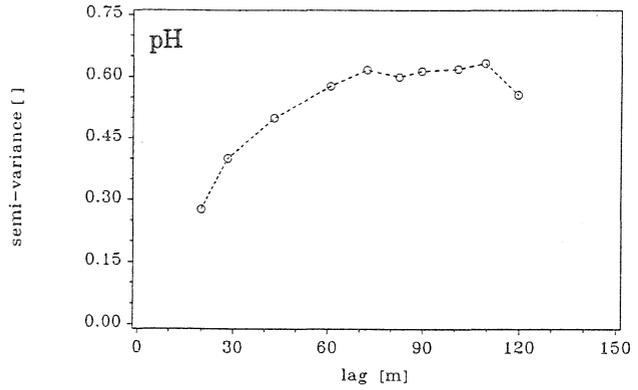


Abbildung 4: pH-Variogramm (Leefdaal) und K-Variogramm (Assent).

## 6. Literatur

*Bin He und C.L. Petersen:*

A comparison of expert systems and simulation techniques for control of a fertilizer applicator.

Proceedings of the "Symposium on Automated Agriculture for the 21st Century", 16.-17. Dez. 1991, Chicago, Illinois, S. 373-384

*England, E. und A. Sparks:*

Geostatistical environmental assessment software user's guide.

EPA 600/4-88/033. U.S. Environmental Protection Agency. Environmental Metering Systems Laboratory . Las Vegas, Nevada 89193-3478

*Journel, A.G. und Ch. J. Huijbregts:*

Mining geostatistics

Academic Press limited, London 1989

*Lamp, J. und K. Gottfried:*

Soil survey and construction of digital maps for pilot farms.

C.E.C. Soil and Groundwater Research Report II. Nitrate in Soils. In the Framework of the Fourth Environmental Research Programm (1988-1990). EUR 13501 EN 1991. Contract Nos EV4V-0098-NL and EV4V-00107-C, S. 42-54

*Peck, T.R. und S.W. Melsted:*

Field sampling for soil testing.

In: Soil Testing and Plant Analysis. L.M. Walsh and J.D. Beaton (Hrsg.), Soil Science Society America 1974, Madison 1974, Wisconsin, USA, S. 67-76

*SAS Institute:*

SAS User's guide.

SAS Institute Inc. Box 8000, Cary 1982, North Carolina 27511

*Vansichen, R. und J. De Baerdemaeker:*

Continous wheat yield measurement on a combine.

Proceedings of the "Symposium on Automated Agriculture for the 21st Century", 16.-17. Dez. 1991, Chicago, Illinois, S. 346-355.

*Verhoeff, W.:*

Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: The SAIL-model.

Remote Sensing of Environment, 16, S. 125-141.

---

übersetzt von M. Demmel, Weihenstephan (ohne Gewähr); bitte benutzen Sie für weitere Aufgaben das Original: The spatial variability of the growth and the yield of winterwheat related to soil and soil nutrient maps.

## Schlagkartei und Ortung - Voraussetzungen und Lösungen

J. Begemann, K&W Lemgo

1. Schlagbezogene Daten bisheriger Schlagkarteien
2. Aufteilung von Schlägen in Zonen  
Positionierung nach   a) Fahrgassen  
                              b) GPS
3. Erfassung der Zonendaten (statischer Art)  
a) Umrisse, Eingaben  
b) Beschreibung zonenbezogener Daten
4. Speicherung zonenbezogener Daten  
a) biologische Daten  
b) mengenmäßige Daten  
c) ökonomische Daten
5. Darstellung in Ergebnissen  
a) Graphiken  
b) Tabellen
6. Gesamtschlagauswertung trotz Zoneneinteilung
7. Schlagkartei - Kartei als Planung
8. Schlagkartei und Nachweispflicht

### Zu 1.    **Schlagbezogene Daten bisheriger Schlagkarteien**

Sowohl handgeführte als auch EDV-Schlagkarteien betrachten traditionell Schläge als homogen, d.h., Angaben über Bodenpunktzahl, Hangneigung, Bodenart, C/N-Verhältnis, Steinbesatz usw. werden einmalig für den ganzen Schlag eingegeben und der Anwender geht vereinfachend davon aus, daß diese Daten für den gesamten Schlag als Einheits- oder zumindest als Durchschnittswert gelten.

Selbst bei Verwendung der bei einigen Schlagkarteien möglichen Schlagteilung (in beliebig viele oder eine begrenzte Anzahl Teilschläge) werden dann doch



Bei der graphischen Darstellung von Schlagumrissen auf dem PC ist die Erstellung durch geeignete Software mit Maus oder Scanner sinnvoll. Die Umsetzung der entstehenden Zonendaten für Geräte ist denkbar über das Fahrgassen - oder das GPS - Modell.

#### a) Fahrgassen

Die Verwendung von Fahrgassen ist allgemeiner Stand der Technik. Vielfach werden Fahrgassen auf jedem Schlag auch jedes Jahr nach demselben Raster (Abstand, Beginn an derselben Stelle) angelegt. Dadurch ist es möglich, jeden Punkt des Schlages durch die Nummer der Fahrgasse sowie die Entfernung vom Anfang dieser Fahrgasse eindeutig zu beschreiben.

Voraussetzung ist allerdings, daß der Schlag stets in derselben Reihenfolge der Fahrgassen und stets am selben Punkt beginnend, bearbeitet wird und die Fahrgassen eindeutig numeriert und die einzelne Fahrgasse in derselben Richtung durchfahren wird. In vielen Betrieben ist dies der Fall.

Die Vorteile :

Es ist einfach, sehr exakt und kommt ohne zusätzliche Kosten aus. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist deshalb sehr hoch, weil sich Fehler allenfalls innerhalb einer Fahrgasse ergeben können. Bei Start in einer neuen Fahrgasse wird die Längenmessung stets neu bei Null begonnen.

Die Nachteile:

Das Fahrgassenverfahren setzt voraus, daß die Fahrgassen jedes Jahr gleich angelegt und bei jeder Fahrt am gleichen Punkt beginnend in derselben Richtung durchfahren werden. Das Fahrgassenverfahren eignet sich für Düngung und Pflanzenschutz, nicht aber für den Mähdrusch oder die Bodenbearbeitung, weil diese Arbeiten nicht an den Fahrgassen orientiert sind. Das Verfahren stellt hohe Ansprüche an den Fahrer und ist bei häufig wechselnden Fahrern (Lohnunternehmen, Maschinenringe) ungeeignet.

#### b) GPS

Das GPS-System ermöglicht die jederzeitige Ortung des Fahrzeugs unabhängig von der Art der Arbeit und der Fahrtrichtung.

Die Vorteile :

GPS ist für positionsbezogene Arbeiten aller Art sehr gut geeignet. Es ist unabhängig von Startpunkt, Richtungswechsel, Arbeitspausen usw.

Die Nachteile:

Neben den höheren Kosten steht momentan auch noch die mangelnde Genauigkeit und Verfügbarkeit möglicherweise in der Diskussion.

Fazit: Es wird erwartet, daß die Kosten für GPS drastisch sinken und die Genauigkeit deutlich verbessert wird. Das gilt insbesondere für die relative Genauigkeit gegenüber einem festen Startpunkt (Hof oder Feldauffahrt), die für die Praxis das entscheidende Kriterium ist. GPS wird sich deshalb schnell durchsetzen.

### **Zu 3. Erfassung der Zonendaten (statischer Art)**

a) Umrisse, Eingaben

Eine Einteilung des Schlags in Zonen ist ohne graphische Unterstützung kaum denkbar. Folgende Möglichkeiten der Erfassung sollte es geben:

Schlagumrißzeichnung aus Kataster- und/oder Flurkarten oder Fotos (Problem der Verzerrung sollte berücksichtigt werden) mit Maus oder Scanner.

Vergrößerung-, Verkleinerung des Maßstabes.

Drehung in beliebiger Richtung um beliebigen Winkel, damit ein ganzer Schlag auf dem Bildschirm dargestellt werden kann.

Freihändiges Einzeichnen von Zonen (z.B. Bodenarten, Unkrautflora, Krankheitszonen) mit Hilfe von Maus oder Scanner.

b) Beschreibung zonenbezogener Daten

Legendenbeschreibung und unterschiedliche Markierungen (z.B. Schraffur, Farbe) sollten möglich sein. Verbal können Beschreibungen , z.B. über die

Bodenart oder den Unkrautbesatz vorgenommen werden. Wünschenswert ist, daß die Schlagkarteisoftware in der Lage ist, aus der manuellen Eintragung der Zonen z.B. die Größe der Gesamtparzelle oder einzelner Zonen zu errechnen.

Unbedingt erforderlich für die Kommunikation zwischen Schlagkartei und GPS ist die unmittelbare und eindeutige Entscheidung, in welcher Zone ein angesprochenes Koordinatenpaar liegt.

#### **Zu 4. Speicherung zonenbezogener Daten**

Interessant ist die Erkenntnis, daß für die Schlagumrißzeichnung das Vorliegen von Kartenmaterial oder Fotos nicht notwendig ist. Bei funktionsfähigem GPS-System und Abspeicherung aller Koordinatenpaare einer durchgeführten Maßnahme (mit oder ohne Ausbringewert oder z.B. Dieselvebrauch) sowie Übertragung der Daten auf den PC läßt sich die Schlagumrißzeichnung vollständig aus den Koordinatenpaaren erstellen.

Ebenso lassen sich daraus Zoneneintragungen vornehmen, wenn der entsprechende Meßwert mit übertragen wird. Würde z.B. beim Pflügen die Momentangeschwindigkeit mit übertragen und ist diese ein signifikantes Merkmal für den Zugwiderstand und damit z.B. für die Bodenart, so lassen sich elegant u.a. Tonköpfe in die Schlagumrißzeichnung eintragen, ohne daß der Landwirt vorher sich mit seinem Kartenmaterial und einem Scanner beschäftigen muß.

Selbstverständlich wird der Landwirt die Ergebnisse mit seiner Erfahrung und seiner Vorstellungskraft vergleichen. Über das Eingeben entsprechend geeigneter feinerer oder gröberer Raster an die Meßwerte kann der Landwirt dann entscheiden, wie fein er eine Einteilung des Schrages in Einzelzonen wünscht. Es ist klar, daß eine zu feine Aufteilung zu Datenwirrwarr und einer unüberschaubaren Datenfülle führt.

Es macht auch keinen Sinn, eine Einteilung so fein vorzunehmen, daß z.B. eine theoretische Anpassung von Dünge- oder Pflanzenschutzmengen von der Technik nicht umgesetzt werden kann. Wenn eine Sämaschine oder ein Düngerstreuer Mengenänderungen nur in 10 % - Sprüngen vornehmen kann, sollte die Schlageinteilung in Zonen nicht zu feineren Mengensprüngen führen. Weiterhin ist wichtig, daß Zonen nicht so fein angelegt sind, daß wesentliche Unterschiede in Boden , Bestand oder Unkrautbesatz nur noch mit feinsten Untersuchungs-

methoden, nicht aber mit dem bloßen Auge erkennbar sind.

Bei der Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung positionsbezogener Daten können wir unterscheiden:

a) biologische Daten

Dazu gehören die Bestandesdichte, Unkrautbesatz (Art und Stärke), Krankheitsbefall (Art und Stärke), Bodenuntersuchungsergebnisse, Feuchtegehalte, Qualitätsmerkmale der Erntefrucht, Bodenbeschreibung.

b) mengenmäßige Daten

Hier fallen an:

- Saatmenge und Ernteertrag/Flächeneinheit,
- Verbrauch an Düngemitteln,
- Treibstoff und Pflanzenschutzmittel.

c) ökonomische Daten

Hier betrachten wir Arbeitszeit und -kosten, den Verschleiß an Maschinen und Werkzeugen sowie die sich aus den in b) erfaßten ökonomischen Auswertungen.

## **Zu 5. Darstellung von Ergebnissen**

a) Tabellen

Die in 4. erfaßten und gespeicherten Daten können zonenweise abgespeichert und als Durchschnittswerte der einzelnen Zonen übersichtlich in Tabellen dargestellt werden. Dabei ist es evtl. sinnvoll, nicht jede einzelne Zone darzustellen, wenn verschiedene Zonen ähnliche Voraussetzung haben. Hat z.B. ein Schlag mehrere Tonköpfe, die unter sich aber ziemlich einheitlich sind, so macht es Sinn, den Ertrag auf allen Tonköpfen dem Ertrag auf dem übrigen Schlag gegenüberzustellen.

b) Graphiken

Die Darstellung von Ergebnissen in Graphiken unterstützt das Vorstellungsvermögen und die Interpretationsfähigkeit. Für die Darstellung gibt es im

Prinzip 3 Möglichkeiten:

- i) Darstellung des Schlagumrisses zweidimensional, unterschiedliche Zonen und Ergebnisse durch Farben oder Schraffuren
- ii) Darstellung z.B. des Ertrages in einer dreidimensionalen Graphik. Dabei wird ein Ertragsgebirge über dem Schlaggrundriß dargestellt.
- iii) Darstellung des unterschiedlichen Ertrages durch Eintragung von Höhenlinien in den Schlaggrundriß.

Das Verfahren i) ist dabei wegen der Klarheit und Eindeutigkeit wohl gut geeignet. Nachteil des Verfahrens ii) ist die Unübersichtlichkeit, wenn man "hinter den Berg" schauen muß. Der Vorteil ist allerdings, daß man ohne Legende auskommt. Verfahren iii) ist für eine Übersicht "auf einen Blick" wohl zu kompliziert und verlangt zuviele Kenntnisse vom Betrachter.

#### **Zu 6. Gesamtschlagauswertung trotz Zoneneinteilung**

Die Aufteilung von Schlägen in Zonen und die mögliche Berücksichtigung dieser Zonen bei jeder Überfahrt (Saat, Pflege, Düngung, Pflanzenschutz, Ernte) führt zu einer unübersehbaren Datenflut.

Die Auswertung und Aufbereitung dieser Daten ist notwendig und möglich. Insbesondere das Vorbereiten von Daten für jede Maßnahme und das Nachbereiten unmittelbar nach jeder Maßnahme ist besonders wichtig.

Die Datenmenge wächst aber so extrem, daß das Einzelergebnis einer speziellen Behandlung (z.B. Verteilung eines Pflanzenschutzmittels über die Zonen) an Bedeutung verliert und nach Jahren kaum noch einzeln betrachtet werden wird. Statistische Aufbereitung über bestimmte Zonen sind dagegen aber sinnvoll. Gerade weil die Datenmenge so stark steigt, gewinnt die Globalbetrachtung des Einzelschlages an Bedeutung. Auch mit GPS wird der Einzelschlag weiter die zentrale Auswertungseinheit bleiben.

#### **Zu 7. Schlagkartei- Kartei als Planung**

Vielfach wird spätestens mit dem Einzug von GPS wie selbstverständlich erwartet, daß die Schlagkartei nicht nur Daten auswertet und eine Nachbetrachtung ermöglicht, sondern daß die Schlagkartei selbst aktiv in die Betriebsplanung und Vorbereitung von Daten eingreift.

Es wird erwartet, daß die Schlagkartei unter Berücksichtigung der bisher ermittelten Daten z.B. unter Berücksichtigung von Witterungsdaten für jede einzelne Bodenzone und jede Maßnahme selbst berechnet, welches Mittel in welcher Menge zu welchem Zeitpunkt wie auszubringen ist bzw. welche Maßnahme als nächstes durchzuführen ist.

Diese Forderung ist verständlich angesichts der Datenfülle, die vielleicht zukünftig Schlagkarteien bestimmen wird. Machen wir uns aber klar, daß die Umsetzung dieser Forderung bedeuten würde, daß man auch heute schon Patentrezepte bei der Bewirtschaftung unterschiedlicher Schläge hat. Das ist aber nicht der Fall.

#### **Zu 8. Schlagkartei und Nachweispflicht**

Von vielen Landwirten wird erwartet, daß eine Aufzeichnungspflicht unmittelbar bevorsteht. Auch die geplante Düngemittelanwendungsverordnung sieht unter bestimmten Bedingungen eine Aufzeichnungspflicht vor. Dabei wird heftig diskutiert, ob schlagbezogene Aufzeichnungen gefordert werden sollen oder ob eine gesamtbetriebsbezogene Aufzeichnung ausreicht.

Mit der Verbreitung von GPS in der Praxis stellt sich zwangsläufig die Frage, inwieweit Kontroll- und Aufzeichnungspflichten die Inhomogenität von Schlägen berücksichtigen soll.









