

Gelbes Heft 53



Bayerisches
Staatsministerium
für Ernährung,
Landwirtschaft
und Forsten



**Positionsbestimmung
landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen
für die Entwicklung ökologisch
optimierter Anbauverfahren**

IMPRESSUM:

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Postfach 22 00 12, 80535 München
RB-Nr. 08/94/56

Redaktion:
Referat Landmaschinenwesen und Energiewirtschaft
(Redaktionsschluß August 1994)

© StMELF

Die Beiträge in dieser Schriftenreihe geben die Auffassung und Erkenntnisse der abfassenden Personen wieder.

Positionsbestimmung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen für die Entwicklung ökologisch optimierter Anbauverfahren

Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
der Technischen Universität München – Weihenstephan

Direktor:	Prof. Dr. agr. Hans Schön
Projektleiter:	Dr. Dr. habil. H. Auernhammer
Sachbearbeiter:	Dipl.-Ing. agr. T. Muhr Dipl.-Ing. agr. M. Demmel Dr. H. Stanzel

Vorwort

Durch die zunehmende Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion konnte seit Kriegsende die Nahrungsversorgung aus einer Situation des Mangels in eine Situation des Überflusses umgewandelt werden. Wissenschaft, Beratung und Praxis haben kaum Vorstellbares geleistet. Und trotzdem sind sie mittlerweile in die Diskussion der öffentlichen Meinung geraten. Immer stärker tritt die Sorge um die Umwelt in das Bewußtsein des Einzelnen. Ohne größere Bedenken wird vielfach die erreichte Intensivierung vereinfachend als "negativ", eine mögliche Extensivierung als "positiv" empfunden. Doch damit lassen sich jedoch die - sicher nicht unberechtigten - Sorgen und Ängste nicht beseitigen. Vielmehr entsteht daraus eine neue Herausforderung. Die bisherige Form der Landnutzung an sich muß neu überdacht werden.

Bedingt durch technische und organisatorische Begrenzungen stellt für den Landwirt der Schlag bis heute die kleinste, zusammenhängende Einheit dar. Ihn versucht er homogen zu behandeln, wohlwissend daß damit die lokalen Gegebenheiten der Bodenfruchtbarkeit nur unzulänglich berücksichtigt werden. Gezielte Reaktionen darauf unterbleiben mehr und mehr, da zunehmend Arbeit überbetrieblich erledigt wird und damit das teilschlagspezifische Wissen verloren geht.

Insofern kann eine Verbesserung nur erreicht werden, wenn die Umwelt in ihrer räumlichen Zuordnung direkt in die Anbauverfahren Eingang findet. Voraussetzung dafür ist jedoch ein zuverlässiges, preisgünstiges und flächendeckend verfügbares Ortungs- bzw. Positionierungssystem.

Der vorliegende Forschungsbericht faßt dazu erste umfassende Untersuchungsergebnisse zusammen. Neben rein theoretischen Ableitungen nehmen Messungen in der Praxis einen breiten Raum ein. Es zeigte sich, daß vor allem die Satellitenortung die Anforderungen der Landwirtschaft schon heute weitgehend erfüllt und daß damit vollständig neue Denkansätze für die Entwicklung ökologisch optimierter Anbauverfahren möglich werden.

Zum Abschluß dieser Untersuchungen soll deshalb dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten ganz besonders für die finanzielle Unterstützung gedankt werden. In diesen Dank möchten wir auch die Industrie mit ihrer technischen Unterstützungen einbeziehen. Besonders zu nennen sind die Firmen SEL-ALCATEL, ASHTECH, CLAAS, DRONNINGBORG und DAIMLER BENZ. Aber auch der "Forschungsverbund Agrarökosysteme München (FAM)" soll genannt werden, auf dessen Versuchsflächen in Scheyern erstmals weltweit flächendeckende Ertragsermittlungen mit Satellitenortung möglich waren.

Weihenstephan im August 1994

Prof. Dr. H. Schön
(Institutsdirektor)

PD Dr. H. Auernhammer
(Projektleiter)

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	4
2 Grundlagen der Fahrzeugortung	5
2.1 Koordinatensysteme	6
2.1.1 Ebene Koordinatensysteme	7
2.1.1.1 Geradlinige Koordinatensysteme der Ebene	7
2.1.1.2 Krummlinige Koordinatensysteme der Ebene	7
2.1.2 Räumliche Koordinatensysteme.....	8
2.1.2.1 Geradlinige Koordinatensysteme des Raumes	8
2.1.3 Krummlinige Koordinatensysteme des Raumes	8
2.1.3.1 Koordinatensystem der Kugel.....	9
2.1.3.2 Koordinatensystem des Rotationsellipsoides.	9
2.1.4 Projektion nach Gauß-Krüger	10
2.1.4.1 Konforme Zylinderprojektion.....	10
2.1.4.2 Beispiel einer Positionsangabe in geografischen und projizierten Koordinaten.....	11
2.1.5 Geodätisches Datum.....	11
2.2 Systematik der Verfahren zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge	12
2.2.1 Fahrzeugautonome Systeme	13
2.2.1.1 Der „linearisierte Schlag“	13
2.2.1.2 Koppelortung	14
2.2.1.2.1 Planimetrische Ortung.....	15

2.2.1.2.2 Vektorielle Ortung	15
2.2.1.2.3 Akzellerative Ortung (Ortung durch Beschleunigungsmessung) .	16
2.2.2 Sender- /Empfänger Systeme	17
2.2.2.1 Terrestrische Trilateration mit passiven Baken.....	19
2.2.2.2 Terrestrische Trilateration mit aktiven Baken	19
2.3 Aufbau von Satellitenortungssystemen (orbital gestützte Trilateration).	19
2.3.1 Historische Entwicklung der Satellitenortung	20
2.3.2 NAVSTAR-GPS.....	22
2.3.2.1 Das Raumsegment.....	23
2.3.2.2 Das Bodenkontrollsegment.....	24
2.3.2.3 Das Nutzersegment.....	24
2.3.3 Das Verfahren der Positionsbestimmung mit GPS	25
2.3.3.1 Das GPS-Signal.....	25
2.3.3.2 Die Daten des GPS-Signals	25
2.3.3.3 Die Berechnung der Position des Empfängers.....	26
2.3.4 Differentielle GPS-Messung (DGPS)	27
2.3.5 Ortung über Kommunikationssatelliten (mit und ohne GPS).....	29
3 Darstellung der durchgeführten Versuche.....	29
3.1 Aufbau eines Versuchsfahrzeugs	30
3.1.1 Ausstattung für Satellitenortung (GPS)	30
3.1.2 Ausstattung für die Koppelortung.....	30
3.2 Versuche zur Koppelnavigation.....	32
3.2.1 Fahrversuche	32
3.2.1.1 Versuchsaufbau.....	33
3.2.1.2 Versuchsdurchführung	33
3.2.1.3 Versuchsergebnisse	33
3.2.1.3.1 Geradeausfahrt.....	34

3.2.1.3.2 Fahrt auf 8-Kurs	37
3.2.2 Prüfstandsversuche	42
3.2.2.1 Versuchsaufbau.....	42
3.2.2.2 Versuchsdurchführung.	44
3.2.2.3 Ergebnisse.....	45
3.3 Versuche zum Einsatz der Satellitenortung (orbital gestützte Trilateration)	46
3.3.1 Fahrversuche UNIMOG	46
3.3.1.1 Versuchsaufbau.....	46
3.3.1.2 Versuchsdurchführung	46
3.3.1.3 Ergebnisse.....	47
3.3.2 Fahrversuche Mährescher	48
3.3.2.1 Versuchsaufbau.....	48
3.3.2.2 Versuchsdurchführung	51
3.3.2.3 Ergebnisse.....	52
3.4 Versuche zur Bestimmung technischer Parameter der Systemgenauigkeit.....	55
3.4.1 Versuchsaufbau	55
3.4.2 Versuchsdurchführung	56
3.4.3 Versuchsergebnisse.....	56
4 Stand und Ausblick für die GPS-Nutzung	62
4.1 Ausbau des Raumsegmentes von GPS.....	63
4.2 Stand und Ausblick der DGPS-Verfahren.....	65
4.2.1 Vorgaben des Betreibers	65
4.2.2 Der Einsatz von Postprocessing-DGPS	65
4.2.3 Der Einsatz von Echtzeit-DGPS	66
4.2.4 Die Verfügbarkeit von Echtzeit-DGPS Korrekturdaten.....	67

4.3 Europäische Initiativen zum GPS.....	70
5 Ortung in der pflanzlichen Produktion	71
5.1 Lokale Erfassung von Eingabegrößen für die Planung	72
5.2 Umsetzung von Planungsdaten in der Pflanzenproduktion.....	76
5.2.1 Anwendung der Ortungsverfahren im landwirtschaftlichen Betrieb.....	77
5.2.2 Anwendung der Ortungsverfahren in der überbetrieblichen Maschinenverwendung (ÜMV)	77
5.2.2.1 Maschinenringe	78
5.2.2.2 Lohnunternehmen	78
5.3 Bodeninventur als Voraussetzung umweltschonender Pflanzenbauverfahren der Zukunft	80
6 Einordnung und Ausblick	81
7 Literatur	83
7.1 Allgemeine Literatur	83
7.2 Ortung in der Landwirtschaft	83
7.3 Eigene Veröffentlichungen	83

1 Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

"Wo bin ich?". Ortung liefert die Antwort auf diese Frage. Der Fragende benötigt die Information über seinen derzeitigen Aufenthaltsort dringend, um seine weiteren Handlungen oder Reaktionen genauer auf die augenblickliche Situation (in räumlicher oder sachlicher Hinsicht) abstimmen zu können.

"Wo bin ich?". Diese Frage stellen sich Menschen seit jeher, nachdem sie angefangen hatten, ihre nähere und weitere Umgebung zu erkunden und zu nutzen. Für die nicht sesshaften Jäger und Sammler war der augenblickliche Aufenthaltsort nur vorübergehend hinsichtlich seiner nutzbaren Flora und Fauna interessant. Erst als der Mensch anfing, Reviere, Dorfgemeinschaften und viel später größere Gemeinwesen mit mehr oder weniger festgelegten räumlichen Ausdehnungen zu nutzen, dürfte die Frage nach dem Ort und nach seinen natürlichen Gegebenheiten eine größere Bedeutung für die Planung des nun auch Landwirtschaft treibenden Menschen gewonnen haben.

"Wo bin ich?". Das war für die Menschen, die anfangen, sich mittels einfacher Transportmittel nach und nach immer weiter entfernte Regionen zu erschließen, schließlich eine lebenswichtige Frage: entschied sie doch darüber, ob man mit den verfügbaren Vorräten das erstrebte (aber oft unbekannte) Ziel erreichen und darüberhinaus wieder würde nach Hause zurückkehren können. Das Verlassen der heimischen Umgebung brachte zudem die Notwendigkeit einer überregional brauchbaren Ortsbeschreibung mit sich und bildete damit den Ausgangspunkt für alle Aktivitäten der Ortsbestimmung, die bis heute die Aufgabe der Geodäsie, des Vermessungswesens und schließlich der Ortung und der Navigation bilden.

Die intensive Nutzung der natürlichen Ressourcen durch die Errichtung von Infrastruktur, durch den Abbau natürlicher oder fossiler Industrierohstoffe und durch die Landwirtschaft macht die Verfügbarkeit der Ortsinformation zur unabdingbaren Voraussetzung für alle Maßnahmen zur Nutzungsplanung. Schon seit einiger Zeit werden auf diese Weise von der Administration der Kommunen Maßgaben zur Raumnutzung erarbeitet, die bei einem erwünschten ökonomischen Nutzen eine möglichst

geringe Beeinträchtigung der natürlichen Umwelt mit sich bringen. Die regionale Ausrichtung und die geringe zeitliche Dynamik solcher allerdings langwirkender Maßnahmen erlaubt die Nutzung auch aufwendiger Verfahren der Ortsbestimmung wie die Vermessung mit optischen Geräten bei der räumlichen Erfassung der Ausgangssituation.

Zu den wichtigsten Nutzern natürlicher Ressourcen gehört zweifellos auch die Landwirtschaft, die global betrachtet unter den verschiedensten Bedingungen Pflanzenproduktion betreibt. Die Anpassung an Klimazonen und Böden erfolgt dabei zunächst durch die Auswahl und Anwendung geeigneter Produktionsverfahren. Eine weitere Anpassung an die natürlichen Produktionsbedingungen läßt sich durch die Modifikation bestimmter Produktionsmaßnahmen innerhalb dieser Verfahren erreichen, wobei bisher das Feld die Einheit bildet, auf deren Merkmale hin diese Maßnahmen optimiert werden. Dadurch lassen sich bereits erhebliche Verbesserungen hinsichtlich der ökonomischen Effizienz und der ökologischen Verträglichkeit der Produktion erreichen. Die Ortsbestimmung (also die Antwort auf die Frage: "Wo bin ich?") erfolgt einfach durch Angabe des jeweiligen Feldes, das konsequenterweise innerhalb des Betriebes eine eindeutige Bezeichnung erhielt (z.B. "Hofacker" oder etwas prosaischer "Schlag 11/2"). Der begrenzten räumlichen Auflösung und der nur betriebsweit gegebenen Eindeutigkeit der Ortsbeschreibung bei diesem Verfahren steht die einfache Anwendung gegenüber.

Mit zunehmender Größe der Felder, die sich vor allem aus Gründen der vorteilhaften Mechanisierung ergibt, nimmt allerdings die mögliche Variabilität der natürlichen Produktionsvoraussetzungen innerhalb solcher Einheiten ebenfalls zu und damit die Effizienz einer solchen schlagorientierten Optimierung ab. Andererseits bedeutet die zunehmende politisch-administrative Erfassung landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von markt-, umwelt- und sozialpolitischen Maßnahmen für den Einzelbetrieb die Forderung nach einer auch hinsichtlich der Ortsbeschreibung eindeutigen Dokumentation. Die Antwort auf die Frage "Wo bin ich?" ist damit nicht mehr nur für den Landwirt und dessen betrieblichen Erfolg relevant, vielmehr wird er in Zukunft auch von der nicht landwirtschaftlichen Bevölkerung gefragt werden: "Wo warst du?". Die Antwort auf diese Fragen wird auf wenige Meter genau sein müssen, um als beantwortet gelten zu können.

1.2 Problemstellung

Die Entwicklung technischer Geräte zur Ortung läßt sich bis zur Erfindung des Sextanten zurückverfolgen. Aufwendige geometrisch-astronomische Berechnungen ermöglichten eine Positionsbestimmung, die im nachhinein die Überprüfung eines bis dahin gesteuerten Kurses zuließen. Die Positionsbestimmung über den Sternenhimmel war natürlich nur möglich, wenn dieser auch sichtbar war, d.h. bei guter Sicht und Dunkelheit. Die erreichbare Genauigkeit hing dabei vor allen Dingen von der Qualität des optischen Geräts, von der Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Zeitbestimmung und schließlich von der Sorgfalt des Navigators ab. Aufgrund des hohen Aufwands war eine solche Positionsbestimmung kaum öfter als einmal in 24 h möglich. Damit war die Anwendung dieses Verfahrens vorwiegend auf die Seefahrt begrenzt.

Für den Bereich des Landverkehrs ist bis heute die Ortsbestimmung über das Wiedererkennen von in Karten eingetragenen Landmarken die vorherrschende Methode. Die Erfassung der Koordinaten für diese Landmarken erfolgt dabei wiederum über optische Verfahren, die es erlauben, einen geometrischen Bezug zu bereits bekannten Punkten herzustellen.

Hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten, hohe Genauigkeit bei der Kurseinhaltung und automatische Steuerungssysteme ließen sich jedoch mit diesen Verfahren nicht erreichen. Vielmehr war eine kontinuierliche Ortsbestimmung in Echtzeit erforderlich, die schließlich durch die Einführung von Verfahren der Funkortung ermöglicht wurde.

Die Forderung nach einer kontinuierlich arbeitenden Ortsbestimmung ergibt sich mit der Realisierung neuer Verfahren der Prozeßsteuerung und Dokumentation auch in der Landwirtschaft. Während die automatische Aufzeichnung von Prozeßdaten auch mit einer zeitversetzten Ortsbestimmung möglich ist, muß die Zuordnung von geografischen Koordinaten zu Prozeßdaten für Zwecke der Prozeßsteuerung in Echtzeit erfolgen.

Für den Einsatz in Landfahrzeugen wurden zahlreiche technische Verfahren entwickelt, die allerdings bis heute keine sehr weite Verbreitung gefunden haben. Es handelt sich dabei um meßtechnische Anwendungen, um militärische Anwendungen oder um Anwendungen zur Groborientierung. Erst in jüngster Zeit ergeben sich

durch Nutzung von Satellitenverfahren Anwendungen, die auf einen Massenmarkt zielen, der sich rund um die Nutzung von PKW und LKW ergibt.

Kommerzielle Lösungen, die den universellen Einsatz auf Landmaschinen ermöglichen und dabei die Umgebungs- und Einsatzbedingungen voll berücksichtigen, existieren derzeit nicht. Neben den physikalischen und logistischen Bedingungen in der Landwirtschaft sollte ein technisches Verfahren zur Ortung insbesondere auch den ökonomischen und ökologischen Bedingungen Rechnung tragen. Untersuchungen, inwieweit diese Forderungen von bestehenden oder auch modifizierten Systemen für die Ortung erfüllt werden, liegen nicht vor. Aus der jüngsten Zeit datieren Veröffentlichungen, die allerdings über eine Systembeschreibung hinaus keinerlei vergleichende Einordnung unternehmen.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene kontinuierlich arbeitende Verfahren der Ortung von Fahrzeugen auf ihre Anwendbarkeit in der Landwirtschaft hin zu prüfen. Anhand von theoretischen Betrachtungen, von existierenden Auswertungen, von Simulationen, von praktischen Fahrversuchen und Probeeinsätzen sollen Vorschläge für ein universell einsetzbares Ortungssystem erarbeitet werden, das den besonderen Anforderungen in der Landwirtschaft gerecht wird. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen dabei insbesondere folgende Kriterien:

- Die Technik muß preiswert verfügbar sein.
- Den erhöhten Anforderungen an die Robustheit im landwirtschaftlichen Betrieb ist Rechnung zu tragen.
- Bestehende Arbeitsabläufe sollen durch die Anwendung der Ortungstechnik möglichst nicht verändert werden müssen. Insbesondere darf keine bedeutsame Erhöhung des Organisationsaufwandes erforderlich sein.
- Die Nachrüstbarkeit dieser Technik in bestehende Fahrzeuge ist ebenso zu fordern, wie die Möglichkeit des Umsetzens des größten Teils der Anlage auf weitere Fahrzeuge, damit die Geräte während des Jahres auf verschiedenen Fahrzeugen genutzt werden können.
- Als Genauigkeit ist zunächst, d.h. bis zum Vorliegen konkreter Zahlen aus laufenden Arbeiten unter bodenkundlichen und ackerbaulichen Gesichtspunkten, eine Möglichkeit der Ortung auf 1/2 Arbeitsbreite genau zu fordern (z.B. Mähdröschler mit 5 m Arbeitsbreite = $\pm 2,5$ m; Feldspritze mit 12 m Arbeitsbreite bei 4 Teilbreiten = $\pm 1,5$ m; Auslegerstreuer wie Feldspritze).

- Die Nutzung des Systems soll durch eine möglichst große Zahl von Betrieben möglich sein. Insbesondere sollen auch Grünlandbetriebe und Betriebe, die auf Maschinenringebene arbeiten, diese Technik nutzen können.

2 Grundlagen der Fahrzeugortung

Für die angestrebte vergleichende Untersuchung verschiedener technischer Verfahren zur kontinuierlichen, automatischen Ortsbestimmung auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen sind die jeweils zugrunde liegenden mathematischen und physikalischen Grundlagen entscheidend. Im folgenden Teil des Berichtes werden deshalb eingehend die wichtigsten Zusammenhänge der mathematischen Koordinatendarstellung und der physikalisch-technischen Grundlagen der einzelnen Verfahren erläutert. Dabei wird der Versuch einer systematischen Einordnung nach diesen Funktionsprinzipien unternommen.

2.1 Koordinatensysteme

Jede Ortsbestimmung liefert als Ergebnis eine Ortsangabe, die implizit oder explizit auf ein Koordinatensystem aufbaut:

Der Autofahrer, der in einer fremden Ortschaft fragt "Wo bin ich?", wird als Antwort in der Regel nur den Namen des Ortes erfahren. Aus eigenen geografischen Kenntnissen oder einer weiteren Nachfrage kann er aber einen geometrischen Bezug dieser Ortsangabe zu einem bekannten Punkt herstellen, so daß er schließlich weiß, in welcher Richtung und Entfernung zu diesem Punkt er sich befindet. Erst dadurch ist er in der Lage sich im (ebenen) Raum zu orientieren.

Der Wanderer, der an einer Landmarke angekommen diese Landmarke auf einer Karte wiederfindet, kann aufgrund des Koordinatensystems der Karte direkt seine Koordinaten bestimmen.

Bei der kontinuierlichen, automatischen Ortsbestimmung ist die explizite Verwendung von Koordinaten unabdingbar: Je nach verwendetem System und gewünschter Anwendung erhält der Benutzer Koordinaten, die sich auf ebene oder räumliche, lokale, regionale oder globale Koordinatensysteme beziehen. Dadurch erst wird die numerische Auswertung der einzelnen Positionsangaben ermöglicht.

2.1.1 Ebene Koordinatensysteme

2.1.1.1 Geradlinige Koordinatensysteme der Ebene

Geradlinige Koordinatensysteme der Ebene besteht aus zwei sich schneidenden Geraden, die diese Ebene aufspannen. Dabei bezeichnet man den Schnittpunkt dieser beiden Geraden als Ursprung des Koordinatensystems und die beiden Geraden als seine Achsen. Beide Achsen tragen eine am Ursprung orientierte Maßeinteilung, die sowohl positive als auch negative Werte umfassen kann. Die Skalierung beider Achsen ist gleich, oder steht in einem linearen Zusammenhang. Die Koordinaten eines beliebigen Punktes in der Ebene sind die Abschnitte der zu den Achsen parallelen Projektionen dieses Punktes auf die Koordinatenachsen. Der Winkel zwischen beiden Achsen wird als Koordinatenwinkel bezeichnet.

Für den Spezialfall, daß beide Achsen aufeinander senkrecht stehen, d.h. der Koordinatenwinkel 90 Grad beträgt, heißt das Koordinatensystem rechtwinklig oder kartesisch.

Kartesische Koordinatensysteme werden üblicherweise für Kartendarstellungen verwendet, da sie in besonders einfacher Weise das Ablesen von Koordinaten und damit die Bestimmung von Längen und Entfernungen ermöglichen.

2.1.1.2 Krummlinige Koordinatensysteme der Ebene

Krummlinige Koordinatensysteme der Ebene sind Verallgemeinerungen der geradlinigen und werden durch zwei einparametrische Scharen von Koordinatenlinien aufgespannt. Jeder Punkt der Ebene wird dabei eindeutig durch den Schnittpunkt nur je einer Linie jeder Schar beschrieben, d.h. die Koordinatenangabe erfolgt durch ein Paar von Parametern. Diese Art von Koordinatensystem könnte beispielsweise durch die Fahrgassen und den Feldrand eines Schlages gebildet werden.

Polarkoordinatensysteme sind Sonderfälle der krummlinigen Koordinatensysteme, bei denen der eine Parameter gleich dem Radius der konzentrischen Kreise und der andere gleich dem Winkel zur Polarachse ist. Ein beliebiger Punkt der Ebene kann dann durch die Angabe (Radius; Winkel) eindeutig charakterisiert werden. Polarkoordinatensysteme spielen bei der Positionsbestimmung über Richtfunkantennen und

Laufzeitmessungen eine gewisse Rolle, in der Regel aber erfolgt bei Ortungsanwendungen anschließend eine Transformation zu kartesischen Koordinaten.

2.1.2 Räumliche Koordinatensysteme

2.1.2.1 Geradlinige Koordinatensysteme des Raumes

Geradlinige Koordinatensysteme des Raumes werden durch drei Geraden, die sich in einem Punkt schneiden, aber nicht in derselben Ebene liegen, gebildet. Dabei spannen je zwei Geraden (die Koordinatenachsen) eine der drei Koordinatenebenen auf. Alle Achsen tragen eine am Ursprung orientierte Maßeinteilung, die sowohl positive als auch negative Werte umfassen kann. Die Skalierung der Achsen ist gleich, oder steht in einem linearen Zusammenhang zueinander. Die Koordinaten eines beliebigen Punktes des Raumes sind die Abschnitte der zu den Achsen parallelen Projektionen dieses Punktes auf die Koordinatenachsen. Der Winkel zwischen den Achsen wird als Koordinatenwinkel bezeichnet.

Für den Spezialfall, daß die Koordinatenwinkel zwischen allen drei Achsen gleich sind, d.h. die Achsen aufeinander senkrecht stehen, heißt das Koordinatensystem rechtwinklig oder kartesisch (nach [1]).

3-dimensionale kartesische Koordinatensysteme finden beispielsweise in digitalen Geländemodellen, d.h. aus ebenen Karten mithilfe von Topographiedaten entwickelten räumlichen Modellen, oder bei der Ortsbeschreibung von Satellitenbahnen Verwendung.

2.1.3 Krummlinige Koordinatensysteme des Raumes

Diese stellen analog zu den krummlinigen ebenen Koordinatensystemen die Verallgemeinerung der geradlinigen Koordinatensysteme dar. Für den Bereich der Ortung und Navigation sind vor allem zwei Spezialfälle von krummlinigen Koordinatensystemen des Raumes wichtig, die im folgenden wegen ihrer Bedeutung für die Umrechnung von beliebigen Positionsdaten auf Koordinatensysteme üblicher Kartendarstellungen detailliert besprochen werden: Die Koordinatensysteme auf Kugel und Rotationsellipsoid. Dabei wird nur die Anwendung auf den Erdkörper berücksichtigt.

2.1.3.1 Koordinatensystem der Kugel

Für viele Anwendungen kann der Erdkörper hinreichend genau als Kugel beschrieben werden. Die Rotationsachse der Erde bildet die Polachse dieser Kugel. Die kürzeste Verbindung von Pol zu Pol wird als Meridian bezeichnet. Die Äquatorialebene der Kugel steht senkrecht zur Polachse und enthält den Kugelmittelpunkt. Jeder Punkt auf der Kugeloberfläche läßt sich damit eindeutig durch die Angabe eines Winkels zwischen Äquatorialebene und Verbindungslinie zwischen Punkt und Kugelmittelpunkt, sowie eines zweiten auf die Äquatorialebene projizierten Winkels zwischen der Verbindungslinie zwischen Punkt und Kugelmittelpunkt und einem beliebigen Nullmeridian angeben. Der erste Winkel wird dabei als geografische Breite, der zweite Winkel als geografische Länge bezeichnet.

Die Ortsangabe über geografische Koordinaten baut dabei auf der Konvention auf, daß der Nullmeridian derjenige Meridian ist, der durch die frühere königliche Sternwarte in Greenwich bei London in Großbritannien verläuft und von dort aus die Winkel nach Osten und Westen gezählt werden. Die zweite Konvention betrifft die Angabe der geografischen Breite: Sie wird vom Äquator ausgehend als Winkel nach Norden oder Süden gezählt.

2.1.3.2 Koordinatensystem des Rotationsellipsoides.

Benötigt man eine noch genauere Beschreibung des Erdkörpers, wie es für die Erstellung von großmaßstäbigen Karten erforderlich ist, empfiehlt sich die Verwendung eines Modells des Erdkörpers, das durch ein Rotationsellipsoid gegeben ist. Die Rotation der zugrunde gelegten Ellipse erfolgt um die kleine Halbachse als Rotationsachse. Die Äquatorialebene wird dabei durch die Rotationsebene der großen Halbachse gebildet. Während die Definition der geografischen Länge vollständig derjenigen bei der Kugel entspricht, wird die geografische Breite nun als Winkel zwischen der Äquatorialebene und der Normalen einer Tangentialebene im gesuchten Punkt P definiert. Anders als bei der Kugel bildet die Verbindungslinie zwischen dem Punkt und dem Schnittpunkt der beiden Halbachsen ja eben keine Normale zur Tangentialebene.

2.1.4 Projektion nach Gauß-Krüger

Alle Ortungsverfahren, die dreidimensionale Positionsdaten liefern, müssen einen Verarbeitungsschritt vorsehen, in dem das dreidimensionale Datum auf ein zweidimensionales reduziert wird, beispielsweise, um den Vergleich der gemessenen Position mit einer in einer See- oder Landkarte verzeichneten Position zu ermöglichen. Dieser Vorgang wird als Projektion bezeichnet. So werden beispielsweise aus geografischen Kugelkoordinaten kartesische ebene Koordinaten errechnet. Die Ableitung der unterschiedlichen Projektionen, die je nach angestrebtem Verwendungszweck der Koordinaten zur Anwendung kommen soll hier nicht nachvollzogen werden, (siehe hierzu z.B. [5]) jedoch soll ein kurzer Abriss über die notwendigen Schritte der Umformung geografischer in kartesische Koordinaten der sog. Gauß-Krüger Projektion folgen. Diese Projektion liegt der Mehrzahl der katastermäßig erfaßten Vermessungsdaten in der Bundesrepublik Deutschland zugrunde und hat deshalb eine große Bedeutung für die Weiterverwendung in der Landwirtschaft erfaßter Positionsdaten.

2.1.4.1 Konforme Zylinderprojektion

Das generelle Problem der Abbildung ellipsoidischer Koordinaten auf rechtwinklige ebene Koordinaten besteht darin, daß dabei Ähnlichkeit im mathematischen Sinn oder gar Kongruenz nicht zu erreichen ist, da Verzerrungen mehr oder weniger stark in Kauf genommen werden müssen. Stellt man sich die Erde von einem Zylinder umgeben vor, so daß die Längsrichtung des Zylinders mit der Richtung eines Meridians übereinstimmt, hat man damit die Projektionsfläche einer transversen Zylinderprojektion konstruiert. Zur Veranschaulichung mag man nun weiter davon ausgehen, der Erdkörper sei eine Glaskugel, auf die mit schwarzer Tusche die Meridiane und die zum Äquator parallelen Breitenlinien aufgetragen sind. Bestünde jetzt die Möglichkeit in der Kugel eine Lichtquelle, die streng parallele Lichtstrahlen aussendet, zu betreiben, würden diese das Gitter auf der Kugel in erster Näherung als rechtwinkliges Gitter auf die Zylinderinnenwand abbilden. Obwohl dieses Anschauungsmodell sehr stark vereinfacht ist, hätten wir danach - man rolle den Zylinder auf und lege ihn mit der Innenseite nach oben vor sich auf den Tisch - ein Koordinatensystem, das - per definitionem - die Meridiane als Abszissenachse bzw. Parallele dazu besitzt. Die Breitengrade würden die zunächst (mit zunehmender Breite) im

Abstand enger werdenden Parallelen zur Ordinatenachse darstellen. Anders als dieses Modell bildet die konforme Abbildung die Längen auf dem Meridian 1:1 ab; dadurch bleibt die Skalierung der Abszissenachse (des Meridians) konstant. Die Konvergenz ("Annäherung") der Ordinatenachsen bzw. der Parallelen dazu wird vernachlässigt, bzw. durch eine Dehnung der Längendarstellung auf der Ordinatenachse kompensiert. Die entstehende Abbildung ist deshalb winkeltreu. Um die dadurch notwendigen Korrekturen (Reduktion gemessener Größen) der Größe nach zu begrenzen, wird die Abbildung nur auf einen Streifen von 1,5 Grad links und rechts des entsprechenden sog. Zentralmeridians angewendet.

2.1.4.2 Beispiel einer Positionsangabe in geografischen und projizierten Koordinaten

Als Zahlenbeispiel für eine Positionsangabe in geografischen und projizierten Koordinaten folgen die Koordinaten einer GPS-Empfangsantenne auf Gut Wittenfeld:

In geografischen Koordinaten:	Breite:	48° 50' 21,42"
	Länge:	11° 12' 21,08"
In Gauß-Krüger Koordinaten:	Hoch:	5411506,0 m
	Rechts:	4441711,7 m

Zur Veranschaulichung der Zahlenwerte ist folgendes zu sagen: Der Hochwert oder X-Wert entspricht der Ellipsoidbogenlänge längs eines Meridians ("kürzeste Entfernung zwischen dem Punkt und dem Äquator"). Der Rechtswert enthält als erste Ziffer die Kennung des verwendeten Zentralmeridians (ergibt sich aus der geografischen Länge des Meridians geteilt durch 3; hier bildet also der 12. Längengrad den Zentralmeridian). Per Definitionem erhalten alle Punkte auf diesem Meridian die Ordinate 500000,0 m. Dadurch werden negative Zahlenwerte vermieden, die bei Projektion von Punkten westlich des Zentralmeridians auftreten würden. Dermaßen interpretiert liest sich der Rechtswert oder Y-Wert: Der gesuchte Punkt liegt (500000,0 - 441711,7) m = 58288,3 m westlich des $(4 \cdot 3) = 12$. Längengrades.

2.1.5 Geodätisches Datum

Nur der Vollständigkeit halber soll hier erwähnt werden, daß Projektionsberechnungen nur dann in der beschriebenen Form durchgeführt werden können, wenn sich

beide Koordinatensätze (d.h. geografische und projizierte Koordinaten) auf dasselbe Bezugssystem beziehen. Bei der Verwendung von Koordinaten aus der Anwendung von Satellitenortungssystemen zum Vergleich mit Koordinaten aus Karten der Landesvermessung ist zu beachten, daß hier in der Regel verschiedene Bezugssysteme vorliegen. Z.B. werden Koordinaten der Landesvermessung meist auf das sog. Potsdamer Datum (welches sowohl die Ellipsoidparameter als auch die Orientierung des Koordinatensystems definiert) bezogen, während den Satellitenmessungen häufig das WGS 84 (World Geodetic System 84) Datum zugrunde liegt. Ist der Bezug zwischen beiden Systemen bekannt, werden die Koordinaten des einen Systems durch Transformation auf das andere System normiert, bevor die weiteren Berechnungen stattfinden.

2.2 Systematik der Verfahren zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge

Nach diesen grundsätzlichen Zusammenhängen sollen nun geeignete Verfahren zur Koordinatenbestimmung aufgezeichnet werden. Generell lassen sich die für landwirtschaftliche Fahrzeuge zur Verfügung stehenden Ortungsverfahren in fahrzeugautonome Verfahren und solche, die einer bestimmten (technischen) Infrastruktur bedürfen (Sender-/Empfängersysteme), unterscheiden. Abbildung 1 gibt einen entsprechenden Überblick.

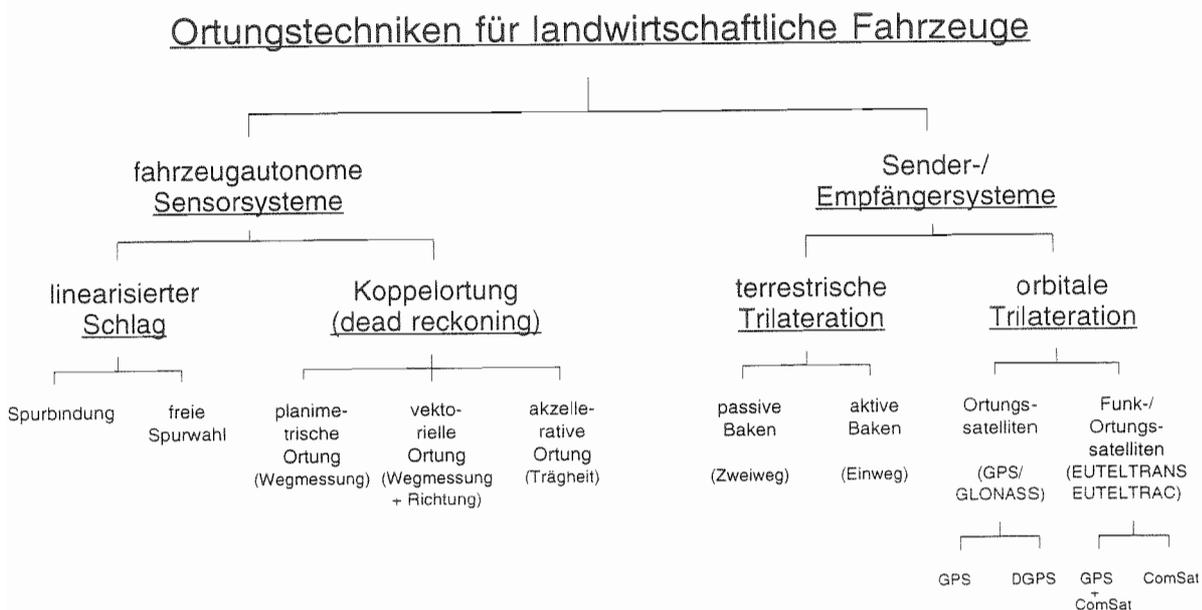


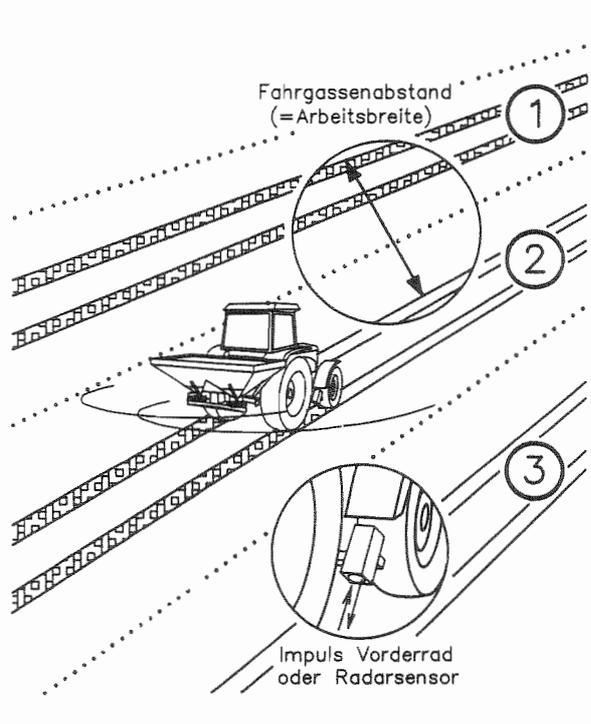
Abbildung 1: Systematik der Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge.

2.2.1 Fahrzeugautonome Systeme

2.2.1.1 Der „linearisierte Schlag“

Der „linearisierte Schlag“ ist ein Verfahren zur Ortsbestimmung, das Ortskoordinaten auf den Schlag bezogen liefert. Das Durchnummerieren der Fahrgassen entspricht dabei einer diskret geteilten Abszissenachse und die einzelne Fahrgasse selbst bildet die Ordinatenachse bzw. die Parallele zur Ordinatenachse eines (i.d.R. krummlinigen) ebenen Koordinatensystems. Wie in Abbildung 2 gezeigt, erfolgt die Bestimmung der Ordinate durch einfache Wegmessung innerhalb der Fahrgasse. Die „Nummer“ der Fahrgasse liefert aus dem Produkt „Nummer · Arbeitsbreite“ die Abszisse. Durch betriebliche Konvention muß die Lage der Fahrgasse (auch über die Jahre) und der Nullpunkt für die Wegmessung festgelegt werden. Zweckmäßigerweise geht man dabei so vor, daß die Wegmessung an jedem Schlagende auf Null gesetzt wird. Dadurch können sich Fehler aus der Wegmessung nicht akkumulieren.

Damit es zu einer eindeutigen Positionsbestimmung nach diesem Verfahren kommen kann, muß für den gesamten Schlag die Reihenfolge und der Durchfahrungsinn der Fahrgassen festgelegt werden. Dem daraus resultierenden hohen Organisationsaufwand des Verfahrens steht der geringe technische Aufwand gegenüber. Die heute verfügbaren Sensoren zur schlupffreien Weg- und Geschwindigkeitsmessung befinden sich vielerorts schon als Geschwindigkeitsgeber für Spritz- oder Düngecomputer im Einsatz. Da jedoch eine Bestimmung der Fahrgassennummer am sichersten manuell erfolgt, kann man das Verfahren nur als halbautomatische Positionsbestimmung einstufen. Die erforderliche hohe Disziplin für die strikte Einhaltung des Durchfahrungsinn empfiehlt das Verfahren besonders für eigenbetriebliche Nutzung im Klein- und Mittelbetrieb, da hier die schlechte Eignung des Verfahrens für Lohnarbeitskräfte durch die niedrigen Investitionskosten mehr als aufgewogen werden.



Funktion:

Abfahren der rechnerisch aneinandergelagten Arbeitsfahrten ab Feld-Nullpunkt
 x wird aus der Fahrgassennummer über den Fahrgassenabstand bestimmt
 y ergibt sich aus der Wegmessung ab Feld-Nullpunkt

Vorteile:

- * nur 1 Sensor
- * Fehlerabgleich an jedem Schlagende möglich
- * keine messtechnische Infrastruktur erforderlich

Nachteile:

- * Arbeit nur von Feld-Nullpunkt an möglich
- * ungleiche Fahrgassen (Reihen-) abstände ergeben Fehler
- * Mehrfachfahrten bei Arbeitsunterbrechungen durch "Nachfahren vom Feld-Nullpunkt an" zum Ermitteln der richtigen Anschlußstelle (oder manuelle Eingabe der Fahrgassennummer)

Fehlerbereich:

Arbeitsbreite (x) $\pm 3 - 12 \%$
Weglänge (y) $\pm 1 - 3 \%$ (bei Fehlerabgleich am Feldende)

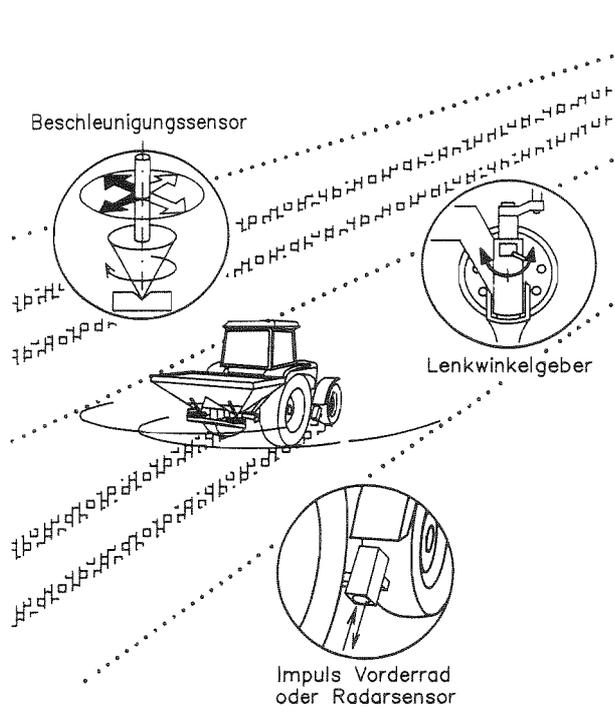
Beurteilung:

Für sorgfältige Landwirte zur eigenbetrieblichen Nutzung in Reihen- und Fahrgassenbeständen gut geeignet

Abbildung 2: Positionsbestimmung mit der Methode "linearisierter Schlag".

2.2.1.2 Koppelortung

Bei der Koppelortung wird die Bewegung eines Fahrzeugs kontinuierlich über die Zeit durch geeignete Sensoren nach Weg und Richtung erfaßt. Durch Integration der Bewegungselemente läßt sich ausgehend von einem Nullpunkt zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Position des Fahrzeugs errechnen. Je nach eingesetzter Sensorik läßt sich die Position in einem (meist lokalen) ebenen oder räumlichen Koordinatensystem angeben. Der englische Begriff „dead reckoning“ faßt die beiden wesentlichen Merkmale des Verfahrens in zwei Worten zusammen: „dead“ steht für den Nullpunkt (auch „Totpunkt“), von dem ausgehend die Berechnung der Position („reckoning“) erfolgt. Das Schema ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Die im folgenden getrennt behandelten Verfahren lassen sich in der Praxis auch kombiniert einsetzen, wobei dann auch die gewählte Zuordnung nicht mehr eindeutig sein kann.



Funktion:

Über fahrzeugautonome Sensorik Bestimmung der aktuellen Position aus der ständigen Summierung der räumlichen Bewegungselemente

Vorteile:

* keine meßtechnische Infrastruktur erforderlich

Nachteile:

* bekannter Ausgangspunkt (Totpunkt) erforderlich

* Fehler oder Restfehler bei schlechter Traktion (Fahrzeugdrift)

* Fehlerfortpflanzung und -summierung bis zum Neustart am Ausgangspunkt

Fehlerbereich:

$> \pm 1$ nautische Meile / 8 h ($> \pm 6,4$ cm/s)

$\hat{=}$ bei 7 km/h $> \pm 3$ %

Beurteilung:

Als alleiniges System unter landwirtschaftlichen Bedingungen nicht ausreichend

Abbildung 3: Positionsbestimmung mit der Methode "Koppelortung".

2.2.1.2.1 Planimetrische Ortung

Die planimetrische Ortung erfaßt den auf der linken und rechten Seite des Fahrzeugs zurückgelegten Weg jeweils getrennt für bestimmte, kleine Wegabschnitte. Dies kann durch Abgreifen von Weggebern in den Rädern einer (möglichst nicht angetriebenen) Achse erfolgen. Der Einsatz von berührungslos arbeitenden Wegsensoren auf beiden Fahrzeugseiten kann aber auch hier zu einer höheren Genauigkeit führen, da sich Fehlerquellen wie Schlupf oder unterschiedliche effektive Abrollumfänge der Räder einer Achse durch z.B. stark unterschiedlichen Luftdruck eliminieren lassen. Dieses Verfahren ist nicht in der Lage Höhenunterschiede zu erfassen und erlaubt daher nur die Bestimmung ebener Koordinaten, wobei die Orientierung des (lokalen) Koordinatensystems arbiträr ist.

2.2.1.2.2 Vektorielle Ortung

Wenn die Richtungsbestimmung nicht aus der differentiellen Wegbetrachtung, sondern aus der Bestimmung des Winkels der Fahrzeuglängsachse erfolgt, spricht man von vektorieller Ortung, da hier die einzelnen Bewegungselemente durch die Parameter eines Vektors (Richtung und Betrag) erfolgt. Die Bestimmung des Richtungswinkels kann dabei indirekt unter Einberechnung der Fahrwerksgeometrie aus dem

Einschlagwinkel der Räder der gelenkten Achse erfolgen. Dabei wirkt der seitliche Schlupf von gelenkten Rädern insbesondere auf typisch landwirtschaftlichen „Fahrbahnen“ (z.B. schmieriger feuchter Boden) als sehr starke und schwer quantifizierbare Fehlerquelle.

Die direkte Bestimmung des Richtungswinkels kann auch direkt durch einen Kompaß erfolgen. Die übliche Bauart des Magnetkompasses ist dabei zwar als einziger Sensor für eine absolute Winkelbestimmung geeignet, die durch wechselnde Anbaugeräte (fast ausschließlich aus ferromagnetischen Materialien) magnetisch stark variierenden Verhältnisse auf dem Fahrzeug erfordern jedoch bei dieser Bauart besondere Beachtung.

Wesentlich vielseitiger lassen sich Kompass einsetzen, die mechanische oder faseroptische Kreisel als Drehratensensoren verwenden. Diese Geräte geben je nach Integrationsstufe Drehraten oder Richtungswinkel aus, die bei Verwendung einer entsprechenden Anzahl und Anbringung dieser Sensoren auch eine räumliche Positionsbestimmung (2 Achsen) oder zusätzlich eine Lagebestimmung des Fahrzeugs im Raum (3 Achsen) erlauben. Dieses Meßverfahren wird wegen der relativ hohen Preise für die Sensoren vor allem in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Anwendungen in Landfahrzeugen sind bisher auf die Wehrtechnik (Panzernavigation und Zieleinrichtung) begrenzt.

Bei der vektoriellen Ortung ist die Erfassung der Position durch Aufsummieren der Wegelemente je nach Ausführung im ebenen oder dreidimensionalen Raum möglich. Die Orientierung des Koordinatensystems (Ausnahme: Magnetkompaß), sowie die Lage des Nullpunkts sind dabei zunächst arbiträr. Sind die Koordinaten des Ausgangspunkts, sowie die ursprünglichen Winkel der Fahrzeugachsen bekannt, läßt sich jedoch auch eine absolute Positionsbestimmung durchführen.

2.2.1.2.3 Akzelerative Ortung (Ortung durch Beschleunigungsmessung)

Die Bewegung eines Fahrzeugs im Raum nach Richtung und Weg läßt sich auch durch Erfassung und Integration der Beschleunigungskräfte errechnen, die auf das Fahrzeug einwirken. Eine vollständige Positionsbestimmung im Raum ist damit möglich wenn die Kräfte in drei Achsen gemessen und aufintegriert werden. Beschleunigungssensoren werden heute überwiegend zur Stützung von Kreiselkompaßsystemen eingesetzt, die kostengünstige mikromechanische Herstellung und Anordnung

der Sensoren in ganzen Arrays verspricht aber für die Zukunft eine den Kreiselkompaßsystemen vergleichbare Genauigkeit bei höherer Miniaturisierung und niedrigerem Preis. Auch dieses Verfahren erlaubt (mit den in 2.2.1.2.2 genannten Ausnahmen) nur die Bestimmung relativer Koordinaten in arbiträr orientierten ebenen oder räumlichen Koordinatensystemen.

2.2.2 Sender- /Empfänger Systeme

Bei den folgenden Ortungsverfahren wird die Position eines Fahrzeugs durch die Auswertung ausgesendeter und wieder empfangener Signale (Zwei-Wege-Messung) oder nur empfangener Signale (Ein-Weg-Messung) relativ zu der Struktur der (quasi) stationären Sende-/Empfangseinrichtung bestimmt. Diese kann sich sowohl auf dem Erdboden befinden (terrestrische Trilateration), oder aber im erdnahen Weltraum (orbital gestützte Trilateration, siehe unter 2.3). Dabei werden ausschließlich elektromagnetische Wellen (Frequenzbereich 1 kHz bis 500 Thz) verwendet, auf die bei einigen Verfahren zusätzliche Informationen aufmoduliert sind.

Generell lassen sich mit terrestrischen Verfahren nur zweidimensionale Koordinaten bestimmen, während mit orbital gestützten Systemen auch Koordinaten in räumlichen Koordinatensystemen berechnet werden können.

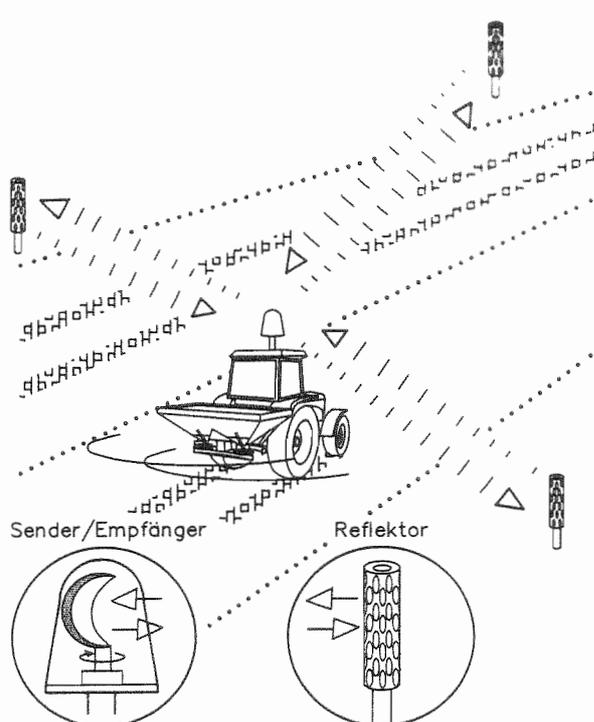
Dem angewendeten Verfahren entsprechend heißen die durch eine einzelne Sender-/Empfänger Anordnung bestimmten „Funkkoordinaten“ Standlinien. Damit sind die Graphen konstanter Ortungsfunktion Radialstandlinien (Richtungsbestimmung über Antennenrichtdiagramm oder Phasenmessung), Kreisstandlinien (Entfernungsmessung über Laufzeitmessung) oder Hyperbelstandlinien (Entfernungsdifferenzmessung über Laufzeitdifferenzmessung). Die Position wird durch Schnitt zweier Standlinien errechnet (= Kollokation), wobei Mehrdeutigkeiten durch grobe Schätzung der eigenen Position aufgelöst werden.

Wegen Ihrer besonderen Bedeutung für Ortungsaufgaben im mobilen Einsatz finden im folgenden nur die Verfahren der Trilateration Beachtung: Durch die gleichzeitige Bestimmung der Laufzeiten zwischen Fahrzeug und drei (oder mehr) Baken (Sender und/oder Empfänger, deren Positionen im Fahrzeug bekannt sein müssen) wird aus den ermittelten drei (oder mehr) Entfernungen eindeutig die aktuelle Position errechnet. Obwohl für die Navigation in Luft- und Seefahrt immer noch sehr bedeutend, finden die Funkortungsverfahren nach der Laufzeitdifferenz- (z.B. bei LORAN A)

oder Phasendifferenzmethode (z.B. bei DECCA), die sog. Hyperbelortungsverfahren, hier keine weitere Beachtung. Ebenso wird auf eine weitere Betrachtung von Triangulationsverfahren (Ortung durch Bestimmung des Richtungswinkels) verzichtet.

Alle Sender-/Empfängersysteme ermöglichen prinzipbedingt die Ermittlung absoluter Positionskordinaten, da die Koordinaten der verwendeten Baken in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem bekannt sein müssen, um die Positionsbestimmung des Fahrzeugs zu ermöglichen.

Systematisch ist zwischen Systemen mit aktiven und passiven Baken zu unterscheiden. Abbildung 4 zeigt eine schematische Anordnung der benötigten technischen Komponenten für die terrestrische Trilateration. Der Aufbau berücksichtigt nur den Aspekt der Eigenortung (d.h., das Fahrzeug bestimmt seine Position). Systeme mit aktiven Baken sind darüberhinaus (entsprechende Ausrüstung des Fahrzeugs vorausgesetzt) auch zur Fremdortung geeignet: Hierbei wird die Fahrzeugposition von einer Beobachtungsstation aus bestimmt.



Funktion:

Sender/Empfänger auf dem Fahrzeug ermittelt über Laufzeitmessung von ausgesandten und an Baken reflektierten Mikrowellensignalen die Entfernungen zu den Baken. Über Trilateration wird Position bestimmt.

Vorteile:

- * hohe Genauigkeit
- * keine betriebsexternen Maßnahmen erforderlich

Nachteile:

- * Aufwand für Bakeninstallation und Unterhalt
- * weitgehend ebenes Gelände erforderlich
- * Fehlerzunahme bei Bakennähe, reduzierbar durch 3 oder mehr Baken (zusätzlicher Aufwand und höhere Kosten)

Fehlerbereich:

$\pm 20 \text{ cm} - \pm \infty$

Beurteilung:

Als betriebseigenes System bei großen Flächen und weitgehend ebenem Gelände gut geeignet

Abbildung 4: Positionsbestimmung mit der Methode "Terrestrische Trilateration".

2.2.2.1 Terrestrische Trilateration mit passiven Baken

Bei der terrestrischen Trilateration mit passiven Baken wird die Laufzeit eines Signals von der Aussendung über die Umsetzung / Reflexion an der Bake bis zum Empfang am Fahrzeug bestimmt (Zwei-Wege-Messung). Um die einzelnen Baken am Ort des Empfängers unterscheiden zu können, ist entweder eine Umsetzung des Signals an der Bake erforderlich (trotzdem „passive“ Bake), oder aber es werden verschiedenartige Signale ausgesandt, die dann nur an der für das jeweilige Signal selektiven Bake reflektiert werden. Sollen mehrere Fahrzeuge im Bereich der selben Baken Eigenortung betreiben können, ist auch zwischen den Fahrzeugen eine Abstimmung der verwendeten Signalcharakteristiken erforderlich. Dies kann u.a. dadurch erfolgen, daß die Signale codierte Fahrzeuginformationen enthalten, die eine eindeutige Signal-/Fahrzeugzuordnung erlauben.

2.2.2.2 Terrestrische Trilateration mit aktiven Baken

Die Verwendung von aktiven Baken erlaubt demgegenüber die Nutzung der Infrastruktur (also der errichteten Anordnung von solchen Baken) durch beliebig viele Nutzer, da dabei zur Ein-Weg-Messung übergegangen werden kann. Die Bake sendet ein Signal aus, das neben der Identifikation der Bake (u.U. auch mit Angabe der Bakenposition, die aber ebensogut im Fahrzeug gespeichert werden kann) vor allem eine Zeitmarke enthält, an der das Signal die Bake verlassen hat. Die synchron laufende Uhr im Empfänger-System auf dem Fahrzeug erfaßt wiederum den Zeitpunkt des Empfangs. Durch Dekodieren des empfangenen Zeitsignals läßt sich so die Laufzeit des Signals bestimmen, die bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals (für elektromagnetische Wellen ca. 300.000.000 m/s) einer Entfernungsmessung zur Bake äquivalent ist.

2.3 Aufbau von Satellitenortungssystemen (orbital gestützte Trilateration)

Die terrestrische Trilateration ist in ihrer Leistungsfähigkeit grundsätzlich durch drei physikalisch-geometrische Sachverhalte begrenzt (nach [4]):

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen längs der Erdoberfläche schwankt stark mit Bodenbeschaffenheit, Feuchte, Bewuchs und Hindernissen längs des Ausbreitungsweges.
- Der Verwendung von Wellen höherer Frequenzen zur Genauigkeitssteigerung sind dadurch Grenzen gesetzt, daß diese Wellen nicht mehr der Erdkrümmung

folgen und die Reichweite von Navigationssendern dadurch bis auf Sichtweite reduziert wird (quasioptische Ausbreitung).

- Die Anordnung von aktiven Baken auf der Erdoberfläche erlaubt nur eine zweidimensionale Positionsbestimmung.

Wird dagegen der Ort der (aktiven) Baken in den Weltraum an Bord von Satelliten verlegt, ergeben sich demgegenüber folgende Vorteile:

- Wegen der weitreichenden „Sichtbarkeit“ von Satelliten können wesentlich höhere Signalfrequenzen verwendet werden, wobei trotzdem große Gebiete mit einem Satelliten „ausgeleuchtet werden können.
- Der Ausbreitungsweg hat genauer definierte bzw. vorhersagbare physikalische Bedingungen, die zu einer weiteren Erhöhung der möglichen Laufzeitentfernungsmessung beitragen.
- Die dreidimensionale Anordnung von aktiven Baken auf Umlaufbahnen erlaubt auch eine dreidimensionale Ortung auf der Erdoberfläche und im erdnahen Welt-
raum.

Allerdings treten durch die Verwendung von Satelliten anstelle von terrestrischen Baken auch technische Probleme auf:

- Die Positionen der Navigationssender sind im Gegensatz zu terrestrischen Systemen nicht mehr konstant, sondern ändern sich mit der Zeit (gestörte Keplerbahnen). Sie müssen dem Nutzer jederzeit mit höchstmöglicher Genauigkeit bekannt sein. Dies erfordert eine hochgenaue Satellitenbahnbestimmung und -vorhersage, sowie die Übertragung dieser Informationen an den Nutzer.
- Der prinzipiell möglichen Ausleuchtung großer Gebiete durch Satelliten steht die Schwierigkeit gegenüber, daß die verfügbare Sendeleistung an Bord von Satelliten sehr gering ist, und mobile Nutzer i.d.R. nur kleine, gering bündelnde Antennen verwenden können. Dadurch ergeben sich sehr ungünstige Signal- / Rauschverhältnisse, die hochempfindliche Empfangsteile erfordern.

Ein-Weg-Meß-Verfahren erfordern die Aussendung extrem frequenzstabiler Signale. Damit die Laufzeitmessung auch zu einer zuverlässigen Positionsbestimmung führen kann, müssen die Uhren an Bord der Satelliten extrem stabil und vor allen Dingen synchron laufen.

2.3.1 Historische Entwicklung der Satellitenortung

Die ersten Positionsbestimmungen über Ein-Weg-Meßverfahren mit Satelliten erfolgten um 1960 nach dem Verfahren der Doppler-Messung:

Dabei wurden sog. „Low Earth Orbit“ Satelliten eingesetzt, d.h. die Umlaufbahnen befanden sich nur etwa 600 bis 1000 km über der Erdoberfläche. Niedrige Umlaufbahnen weisen kurze Umlaufzeiten und entsprechend hohe Relativgeschwindigkei-

ten zur Erdoberfläche auf. Nach den bekannten Beziehungen der Dopplergleichung ergibt sich daraus ein entsprechend hoher Frequenzunterschied zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal. Aus diesem Zusammenhang läßt sich aber auch ableiten, um wieviele Wellenlängen sich der Satellit je Zeiteinheit auf den Nutzer zu (oder vom Nutzer weg mit umgekehrtem Vorzeichen) bewegt. Die Integration dieser Geschwindigkeit über ein bestimmtes Zeitintervall liefert nun die Entfernungsdifferenz zwischen den Entfernungen des Satelliten zu Beginn und am Ende der Integrationsperiode. Sind die wahren Positionen des Satelliten zu diesen beiden Zeitpunkten ebenfalls bekannt, läßt sich schließlich die Position des Empfängers berechnen. Da aber auch die Sendefrequenz des Satelliten nur näherungsweise bekannt ist, und damit als unbekannte Größe in der Berechnung auftritt, wird im praktischen Einsatz noch eine dritte Messung durchgeführt.

Die praktischen Nachteile dieses Verfahrens bestehen vor allem darin, daß die benötigten Integrationszeiten (ca. 5 s) für hoch dynamische Vorgänge zu lang waren, weil damit eine Echtzeit-Positionsbestimmung unmöglich war. Zudem steht ein einzelner Satellit wegen der niedrigen Bahnhöhe nur ca. 10-15 min zur Verfügung. Bei fünf Satelliten ergibt sich daraus nur alle 1-3 h ein solcher Durchgang, an dem die Positionsbestimmung durchgeführt werden kann. Ein heute noch betriebenes System nach diesem Verfahren ist das sog. TRANSIT-System, das von den USA noch voraussichtlich bis zum Jahr 2000 betrieben werden wird. Die wichtigsten Nutzer sind die Schifffahrt und die Geodäsie. Ein ähnliches Verfahren, das von der ehemaligen Sowjetunion entwickelt wurde, trägt die Bezeichnung TSIKADA.

Vor allem vor diesem technischen Hintergrund ist die Weiterentwicklung von satellitengestützten Ortungssystemen zu verstehen: kontinuierliche globale Verfügbarkeit und synchrone Laufzeitmessung zu mehreren Satelliten waren die Hauptziele. Dadurch können auch hochdynamische Vorgänge präzise gesteuert werden - die militärischen Überlegungen (Steuerung gelenkter Flugkörper in Echtzeit) standen Anfang der 70er Jahre dabei sicherlich im Vordergrund.

Die Forderung nach globaler Verfügbarkeit kann nur durch eine entsprechende Anzahl Satelliten erfüllt werden: diese Mindestzahl sinkt mit zunehmender Höhe der Umlaufbahn (dadurch auch: bessere „Ausleuchtung“). Andererseits nimmt die Länge der Signalübertragungsstrecke zu, was wiederum zu schlechten Signal- / Rauschverhältnissen beiträgt. Für die heute bedeutsamsten globalen Satellitenor-

tungssysteme NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Tracking and Ranging Global Positioning System, USA) und GLONASS (Global Navigation Satellite System, Rußland) liegen diese Parameter bei 21-24 Satelliten und ca. 20.000 km Höhe der Umlaufbahn.

Für die folgende Beschreibung der technischen Funktion dieser globalen Satellitennortungssysteme wird besonders auf das von den USA aufgebaute und betriebene GPS Bezug genommen. Dieses System hat den höchsten Ausbaustand und ist seit Jahresbeginn 1994 offiziell zur zivilen Nutzung freigegeben worden. In einigen Punkten unterscheidet sich GLONASS von GPS, in wesentlichen für die Landwirtschaft bedeutsamen Eigenschaften entsprechen sich die beiden Systeme aber.

2.3.2 NAVSTAR-GPS

Das NAVSTAR-GPS besteht aus drei voneinander getrennten Funktionssegmenten, die in Abbildung 5 dargestellt sind: Dem sog. Raumsegment, dem Bodenkontrollsegment und dem Nutzersegment.

Das Bodenkontrollsegment verwaltet mit seinen Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen das Raumsegment (die im Orbit befindlichen Satelliten), so daß das Nutzersegment (also weltweit alle Anwender in den verschiedenen Bereichen) mit geeigneten Empfangsgeräten ohne direkte Kommunikation oder vertragliche Vereinbarungen die Signale der Satelliten zur Bestimmung ihrer Position nutzen können.

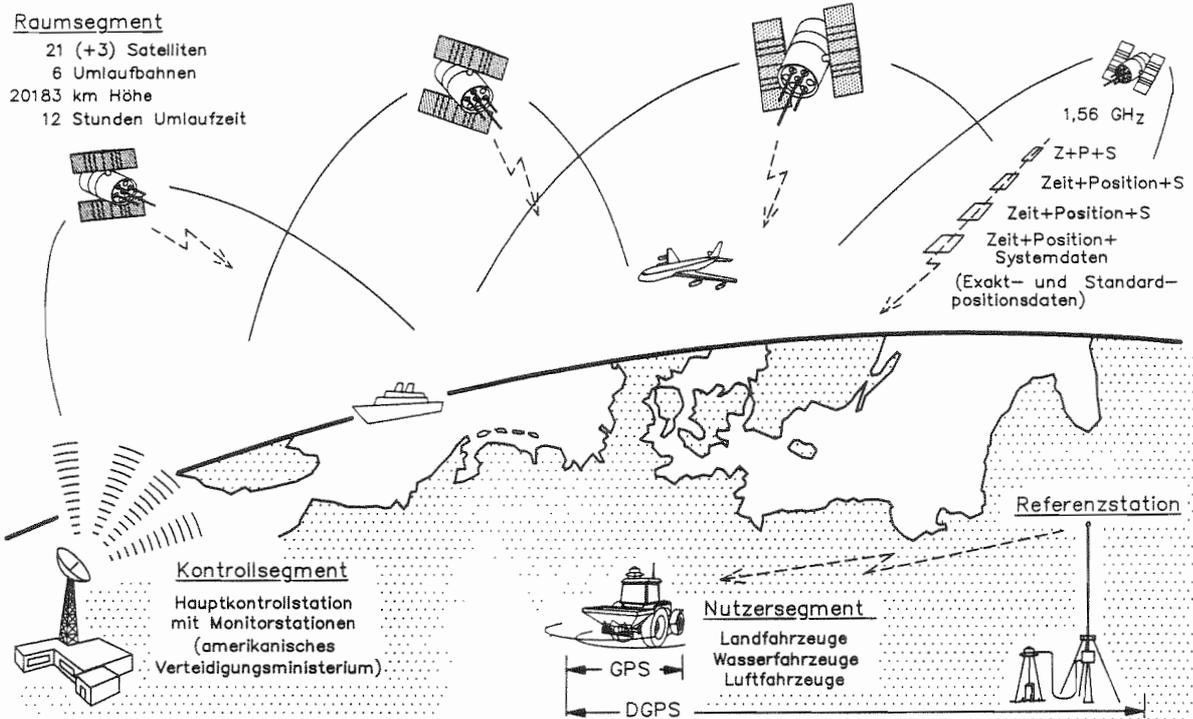


Abbildung 5: Aufbau des NAVSTAR-GPS.

2.3.2.1 Das Raumsegment

Nach dem ersten Experimentalsatelliten NTS-72 (Gewicht ca. 850 kg) wurden zwischen Februar 1978 und Oktober 1985 11 Satelliten gestartet, von denen einige beim Start zerstört wurden oder aus anderen Gründen nicht verfügbar waren. Diese sog. Block I Satelliten dienten im wesentlichen der Erprobung verschiedener Komponenten, die in der zweiten Bauserie (Block II) verwendet wurden. Satelliten dieser zweiten Baureihe werden seit Februar 1989 gestartet. Heute sind 23 Satelliten im Orbit, die zur Positionsbestimmung verwendet werden können.

Die wesentlichen Komponenten dieser Satelliten, die ausschließlich als Navigations- und Ortungssatelliten konzipiert sind, bestehen außer den für die Bahnsteuerung und Energieversorgung notwendigen Teilen aus:

- Empfänger mit Antenne (zur Bodenkommunikation)
- Sender mit Antenne (zur Signalabstrahlung)
- Atomfrequenznormal zur Zeitsignalerzeugung
- Rechner zur Ablaufsteuerung

Der Ausbau dieses Raumsegments darf heute als abgeschlossen gelten, jedoch werden auch in Zukunft weiterentwickelte Satelliten (Block IIR) als Ersatz für die auf-

grund technischer Störungen vor oder nach der geplanten Lebensdauer von 7,5 Jahren außer Betrieb genommenen Satelliten gestartet. Dadurch soll das System bis weit jenseits des Jahres 2000 voll benutzbar bleiben.

2.3.2.2 Das Bodenkontrollsegment

Da das GPS auf Ein-Weg-Messung beruht, muß das vom Satelliten abgestrahlte Signal unter anderem auch die Position des Satelliten selbst enthalten. Die Bestimmung dieser Position und daraus abgeleitet die Bestimmung der Parameter der Umlaufbahn zur Bahnvorhersage, erfolgt dabei völlig analog zur Positionsbestimmung beim normalen Ortungsvorgang. Einziger Unterschied: die Signale eines einzelnen Satelliten werden gleichzeitig von mehreren Bodenstationen (mit bekannten Positionen) empfangen und ausgewertet. Daraus läßt sich dann präzise die Position des Satelliten errechnen. Diese vier Empfangs- und Monitorstationen sind über den Globus verteilt und bilden zusammen mit der Master-Kontrollstation in Colorado Springs in USA das Bodensegment von GPS. Die Master-Kontrollstation koordiniert die Aktionen der vier Monitorstationen, errechnet die aktuellen Daten für die Satelliten und sendet diese Daten entweder direkt oder über eine der Monitorstationen an die Satelliten. Diese Daten werden ein bis dreimal pro Tag aktualisiert an die Satelliten übertragen, um die volle Genauigkeit des Systems zu gewährleisten. Im Fall einer Störung kann das System aber über einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen unter Verwendung von in den Satelliten gespeicherter Information auch ohne diese Bodeninformation auskommen. Darüberhinaus sorgt die Masterkontrollstation auch für die regelmäßige Synchronisation der Satellitenuhren: Ein Zeitfehler von nur 10^{-8} s hätte bereits einen Fehler in der Entfernungsmessung von 30 m zur Folge.

Schließlich werden von der Masterkontrollstationen auch physikalische Daten der Atmosphäre erfaßt und an solche Nutzer weitergegeben, die für Anwendungen höchster Genauigkeit auch diese Einflüsse auf die Signalausbreitung berücksichtigen müssen.

2.3.2.3 Das Nutzersegment

Im Nutzersegment werden aber nicht nur diese Anwender mit höchsten Genauigkeitsanforderungen, sondern allgemein alle Nutzer zusammengefaßt, die mit geeigneten Empfängern in den verschiedensten Anwendungen die Signale der GPS-

Satelliten erfassen und zu Positions- und / oder Zeitinformationen verarbeiten. Derzeit sind weltweit bereits ca. 1 Million Empfänger im Einsatz, und der Massenmarkt für Hobby- und Freizeitanwendungen beginnt sich bei Empfängerpreisen von ca. 800-1000 DM gerade erst zu entwickeln. Auf dem anderen Ende der Skala stehen geodätische Empfänger für Vermessungsaufgaben, die je nach Ausrüstung bis über DM 100.000 kosten. Für die Zukunft wird ein rapides Anwachsen der Empfängerzahlen, die ja systembedingt (Ein-Wege-Messung) nicht begrenzt sind, und damit einhergehend ein weiterer Verfall der Empfängerpreise vorhergesagt.

2.3.3 Das Verfahren der Positionsbestimmung mit GPS

2.3.3.1 Das GPS-Signal

Die GPS-Satelliten strahlen kontinuierlich Signale auf zwei Frequenzen aus:

L1-Signal (Frequenz: 1,57542 Ghz) und L2-Signal (Frequenz: 1,22760 Ghz).

Diesen Frequenzen entsprechen Wellenlängen von 19 bzw. 24 cm. Die Ausbreitung dieser Frequenzen erfolgt quasioptisch, d.h. ohne „Sichtverbindung“ zum Satelliten ist das Signal nicht empfangbar. Die Verwendung von zwei Frequenzen erlaubt bei gleichzeitigem Empfang beider Frequenzen die weitgehende Modellierung der Ausbreitungsbedingungen in der Atmosphäre und der dadurch induzierten Fehlerpotentiale. In üblichen zivilen Anwendungen wird jedoch meist nur das L1-Signal empfangen.

2.3.3.2 Die Daten des GPS-Signals

Die Eigenortung mit GPS beruht auf der Einweg-Laufzeitmessung. Wie bereits eingehend beschrieben, ist dazu eine genaue Zeitmessung auf Empfängerseite und eine ebenso genaue Zeit- und Ortsinformation auf Senderseite erforderlich. Als ursprünglich militärisches System enthalten die Signale diese Information in codierter Form (Phasenmodulation), wobei die Algorithmen der Codierung geheimgehalten werden. Beide Signale erhalten dadurch Strukturen, die bei bekannter Nachrichtenstruktur die Auflösung der Mehrdeutigkeit ermöglichen. Bei der Auswertung rein harmonischer Schwingungen läge diese im Bereich einer Wellenlänge. Bei der Kodierung werden zwei verschiedene Codes eingesetzt: Der sog. C/A- und der sog. P-Code.

Der C/A-Code ist dabei der Öffentlichkeit uneingeschränkt zugänglich und ermöglicht Genauigkeiten bis zu ca. 40 m absolut.

Der P-Code weist dagegen einen wesentlich komplizierteren Aufbau auf und ist wegen der dadurch hohen Variationsmöglichkeiten ohne Kenntnis der aktuellen Codes praktisch nicht zu entschlüsseln. Mit seiner Hilfe sind Genauigkeiten bis zu 20 m absolut möglich. Die höhere Genauigkeit resultiert in erster Linie aus der höheren Modulationsrate, die eine genauere Zeitübertragung ermöglicht.

Auf das L1-Signal werden zwei Codes (C/A und P) aufmoduliert, während das L2-Signal nur einen Code (P) enthält.

Außerdem kann der Betreiber durch S/A (selective availability = eingeschränkte Verfügbarkeit) oder A-S (anti spoofing = Maßnahme gegen Signalstörung) den nicht autorisierten Nutzern im sog. SPS (Standard Positioning Service) einen Teil der verfügbaren Genauigkeit vorenthalten. S/A wird dabei durch künstliche Verfälschung der übertragenen Signale realisiert und verschlechtert die mit dem C/A-Code erreichbare Genauigkeit auf ± 100 m. A-S verschlüsselt den P-Code zum Y-Code. Nur speziell autorisierte Benutzer (v.a. militärische) erhalten die Schlüssel zu diesen Manipulationen und damit Zugang zum sog. PPS (Precise Positioning Service), der wieder die volle Genauigkeit von 40 bzw. 20 m ermöglicht.

2.3.3.3 Die Berechnung der Position des Empfängers

Die wesentlichen Signalinformationen, die nach der Entschlüsselung des Codes zur Verfügung stehen, sind die Ortsangabe des Satelliten und die Zeitmarke der Aussendung des Signals.

Die Berechnung der Empfängerposition erfolgt durch die Berechnung der sog. Pseudoentfernung (engl. pseudorange): Das von einem einzelnen Satelliten empfangene Signal wird unter Verwendung einer Zeitmessung im Empfänger hinsichtlich seiner Laufzeit ausgewertet. Diese Zeitmessung muß aber mit herkömmlichen Oszillatoren („Quarz“) erfolgen und ist deshalb gegenüber der hochgenauen Satellitenzeit (Atomfrequenznormal) mit einem Fehler behaftet.

Ein weiteres Fehlerpotential besteht im Unterschied zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Vakuum („Lichtgeschwindigkeit“) und der tatsächlichen, durch atmosphärische Bedingungen niedrigeren Geschwindigkeit, so daß die sich

aus dem Produkt gemessene Laufzeit mal Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ergebende Entfernung zwischen Empfangsantenne und Satellit eben nur eine Pseudoentfernung darstellt.

Durch Bestimmung vier solcher Pseudoentfernungen mittels gleichzeitiger Auswertung der Signale von vier Satelliten ergeben sich vier Gleichungen, die neben den drei Koordinatenkomponenten der Empfängerposition X, Y, und Z auch den Uhrenfehler im Empfänger als vierte Unbekannte enthalten. Dieses Gleichungssystem ist dadurch eindeutig bestimmt und erlaubt die Berechnung der Empfängerposition in dreidimensionalen kartesischen Koordinaten eines erdfesten, geozentrischen Koordinatensystems. Entsprechend läßt sich aus drei solcher gleichzeitiger Satellitenbeobachtungen (bei Annahme einer bekannten Z-Komponente) eine zweidimensionale Positionsbestimmung durchführen.

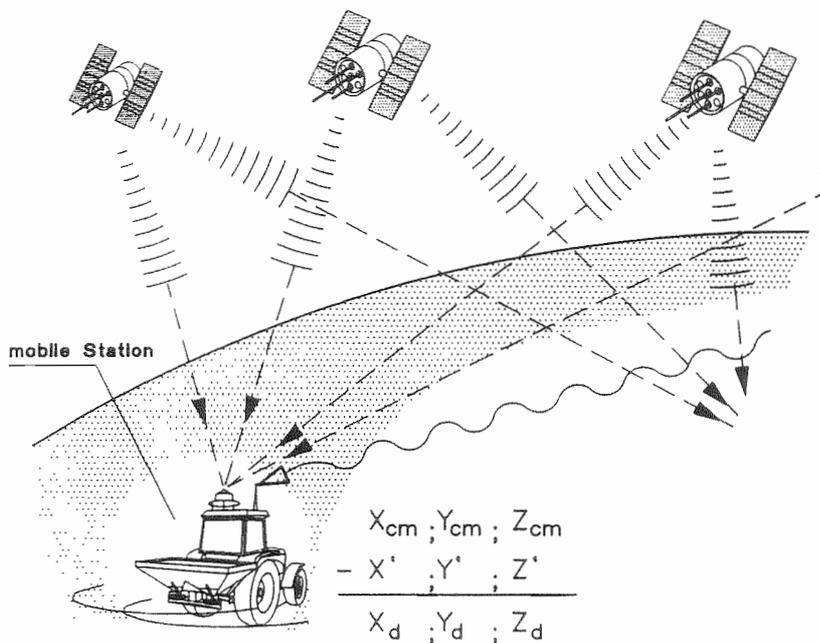
Verfeinerte und damit genauere Algorithmen benutzen neben der Code-Information auch noch Messungen zusätzlicher Größen des Trägersignals wie Phasenlage und Dopplerverschiebung.

2.3.4 Differentielle GPS-Messung (DGPS)

Wie die oben dargestellte Charakteristik des GPS-Systems zeigt, läßt sich die in der Zielstellung geforderte Genauigkeit mit einem einzelnen Empfänger keinesfalls erreichen. Selbst ein autorisierter militärischer Nutzer erreicht im PPS und P-Code nur eine Genauigkeit von ± 10 m.

Für den zivilen Nutzer stellt heute die Anwendung von S/A das größte Hindernis im Zugriff auf höhere Genauigkeiten dar. Ein weiterer Fehleranteil besteht in zeitlich veränderlichen systematischen Fehlern: Bedeutsam sind hier der zufällige Synchronisationsfehler der Satellitenuhren, Fehler in der Bahnvorhersage, Laufzeitveränderungen durch Tropo- und Ionospäre, Fehler aus der Signalverarbeitung im Empfänger und Mehrwegeausbreitung. Da sich das zeitliche Verhalten dieser Fehlereinflüsse nicht modellieren läßt, muß man deren Größenordnung zeitgleich und kontinuierlich durch eine zweite GPS-Messung unter ähnlichen geometrischen Verhältnissen abschätzen. Dazu betreibt man parallel zum Empfänger (z.B. Fahrzeug) einen zweiten Empfänger (Referenz-Empfänger) stationär auf einem Punkt, dessen Position genau bekannt ist (z.B. aus terrestrischen Messungen und Bezug zu Festpunk-

ten). Durch den ständigen Vergleich zwischen Ergebnis der GPS-Messung und der bekannten Position, läßt sich nun ein Großteil der o.g. Fehlereinflüsse als systematischer Fehler quantifizieren und als Korrekturinformation in Form von z.B. Pseudoentfernungs- oder Koordinatenkorrekturen für den mobilen Empfänger, dessen genaue Position gesucht ist, verwenden.



(g = geodatisch; cf = kalkuliert fest; cm = kalkuliert mobil; d = differenziell)

Abbildung 6: Differentielles "Global Positioning System".

Die Verrechnung dieser Korrekturwerte mit den gemessenen Positionen des mobilen Empfängers kann in Echtzeit (Echtzeit- oder Online-DGPS) erfolgen, wenn die Übertragung der Daten an das Fahrzeug z.B. über eine Funkverbindung möglich ist. Andernfalls müssen sowohl die Rohdaten des Fahrzeugs, als auch die Korrekturdaten des Referenzempfängers mit (GPS-) Zeitmarken abgespeichert werden, um dann nach dem Einsatz eine Verrechnung der Messungen (Postprocessing DGPS) durchzuführen. Abbildung 6 zeigt den für DGPS benötigten Aufbau. Mit Anwendung dieser Verfahren ist heute unter günstigen Bedingungen eine Positionsbestimmung in Echtzeit auf wenige Dezimeter genau möglich.

2.3.5 Ortung über Kommunikationssatelliten (mit und ohne GPS)

Prinzipiell kann die Eigen- und Fremddortung eines Fahrzeugs auch über Kommunikationssatelliten erfolgen. Diesem Verfahren liegt eine Zwei-Wege-Messung zugrunde.

Der Nutzer sendet ein Signal an den Kommunikationssatelliten, der eine bekannte (oft geostationäre) Position besitzt. Der Satellit antwortet (mit bekanntem Zeitverhalten), und der Nutzer empfängt dieses Antwortsignal. Durch die Laufzeitbestimmung kann er seine Entfernung zum Satelliten berechnen. Durch Kollokation (Bestimmung des Schnittpunkts) dieser Standlinie mit der Standlinie aus einer zweiten Messung zu einem zweiten Satelliten kann die zweidimensionale Position auf der Erdoberfläche (oder jeder anderen Bezugsfläche) bestimmt werden.

Bei der Fremddortung über Kommunikationssatelliten fragt eine Zentrale das Fahrzeug mit unbekannter Position ab. Dieses antwortet und sendet das Antwortsignal über mindestens zwei (geostationäre) Kommunikationssatelliten an die Zentrale zurück, die aus der Laufzeitdifferenz zwischen beiden Signalwegen wiederum die Position des Fahrzeugs bestimmen kann.

Größter Nachteil dieser Verfahren ist die Belegung von begrenzt verfügbaren und entsprechend teureren Kommunikationskanälen für Ortungszwecke, Vorteil entsprechend die gleichzeitige Übertragung von Informationen.

Kombinierte Systeme (LKW-Überwachung) arbeiten deshalb heute häufig mit einer Positionsbestimmung über GPS. Die Position kann dann als Teil eines Datentelegramms, das auch einsatzbezogene Daten enthalten kann, über eine Satellitenkommunikationsstrecke an die Zentrale geschickt werden.

3 Darstellung der durchgeführten Versuche

Aufbauend auf die theoretischen Grundlagen wurden seit 1990 umfassende Versuche durchgeführt, um die verschiedenen Verfahren beurteilen und einordnen zu können. Mit zunehmender Untersuchungsdauer wurde dabei dem Satellitenortungssystem GPS immer größeres Gewicht beigemessen.

3.1 Aufbau eines Versuchsfahrzeugs

Als Versuchsfahrzeug wurde von der Firma Mercedes-Benz eine landwirtschaftliche Zugmaschine vom Typ UNIMOG zur Verfügung gestellt. Damit stand ein sehr mobiles Fahrzeug zur Verfügung, das auch an räumlich weit voneinander entfernten Versuchsstandorten eingesetzt werden konnte.

3.1.1 Ausstattung für Satellitenortung (GPS)

Bereits zu Beginn der Versuche war eine mobile GPS-Empfangsanlage, bestehend aus Antenne, Empfängereinheit und Display, vorhanden. Diese Einheiten mußten auf das Fahrzeug montiert werden, wobei allerdings sicherzustellen war, daß die gesamte Anlage auch relativ leicht auf andere Versuchsfahrzeuge (insbesondere die zur Ertragskartierung verwendeten Mähdrescher) übertragen werden konnte.

Zusätzlich dazu wurde eine baugleiche zweite Einheit beschafft, die speziell für den Einsatz als Referenzstation innerhalb der Anwendung eines differentiellen GPS (DGPS) vorgesehen war.

3.1.2 Ausstattung für die Koppelortung

Bei der Ausstattung des Fahrzeugs für die Koppelortung (und damit auch für den „linearisierten Schlag“) mußten mehrere denkbare Verfahren gleichzeitig berücksichtigt werden: Nur so ließen sich der Zeitbedarf wirksam begrenzen und verschiedene Verfahren unter gleichen Bedingungen testen.

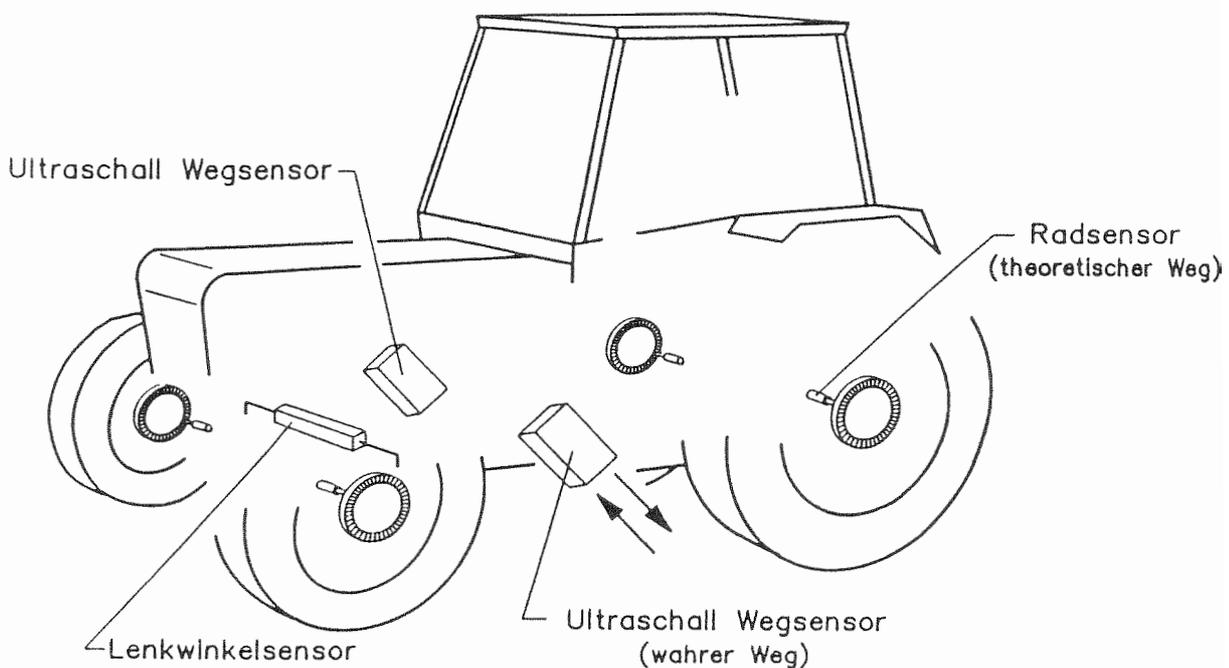


Abbildung 7: Schema der Sensoranordnung zur Koppelnavigation.

Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Sensoranordnung: Über Raddrehzahlsensoren, die jeweils an den Radvorgelegen appliziert wurden, konnte die Drehzahl (und über die Integration der zurückgelegte Weg) an allen vier Rädern unabhängig voneinander erfaßt werden. Dies ermöglichte neben der Ermittlung des zurückgelegten Weges auch Aussagen über die relative Bewegungsrichtung des Fahrzeugs, da die kurveninneren Räder immer kürzere Wege zurücklegen als die an der Kurvenaußenseite laufenden (planimetrische Ortung).

Da landwirtschaftliche Fahrbahnen in der Regel aber hohen Schlupf an Antriebs- und gelenkten Rädern bedingen, sollte über zwei links und rechts vom Fahrzeug angebrachte berührungslos arbeitende Wegsensoren dessen störender Einfluß eliminiert werden. Das Auswerteverfahren war dagegen das gleiche, das auch bei den Raddrehzahlmessungen zum Einsatz kam: Die Differenzbetrachtung der Wege links und rechts des Fahrzeugs sollte Hinweise auf die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs liefern.

Berührungslos arbeitende Geschwindigkeitssensoren für landwirtschaftliche Fahrzeuge sind ausschließlich nach dem Dopplerprinzip funktionierende Systeme: Bei einer Relativbewegung eines Sender- / Empfängersystems gegenüber einer Reflexionsfläche unterscheidet sich die empfangene von der abgestrahlten Frequenz des

Sensors. Der Betrag dieser Verschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit und wird im Empfänger größenmäßig bestimmt. Diese seit rund zwanzig Jahren im Bereich der landwirtschaftlichen Fahrzeuge verfügbare Technik ist unter dem Begriff „Radarsensor“ heute eine Standardkomponente in elektronischen Kontroll- und Regelsystemen (EHR, Spritzen- und Düngerstreuercomputer). Dabei kommen der Bezeichnung entsprechend Frequenzen von ca. 24 Ghz zum Einsatz (eine eingehende Beschreibung und Beurteilung solcher Sensoren findet sich in [48]).

In der beschriebenen Versuchsanordnung wurden dagegen Vorserienmodelle von Dopplersensoren eingesetzt, die anstelle von elektromagnetischen Wellen Schallwellen (Frequenz ca. 60 kHz) verwenden.

Als weiterer Sensor zur Bestimmung der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs, wurde ein potentiometrischer Längengeber zwischen dem Achsschenkel des rechten vorderen Rades und dem Vorderachsrohr angebracht und über eine optische Vermessung kalibriert.

Zur Zusammenführung der Signale der geschilderten Sensoren und Sensorsysteme wurde ein robuster Industrie-PC mit einem entsprechenden Datalogger-Modul beschafft. Durch die Programmierbarkeit war ein sehr flexibel einsetzbares Meßsystem verfügbar, das zur Aufzeichnung und Verarbeitung aller aus den verschiedenen Ortungsverfahren resultierenden Größen geeignet war.

Die ursprünglich vorgesehene Ausstattung des Fahrzeugs mit Sensoren und Meßsystemen für die Trägheitsnavigation konnte nicht durchgeführt werden, da die Beschaffung entsprechender Systeme zu hohe Kosten verursacht hätte.

3.2 Versuche zur Koppelnavigation

Die Versuche gliedern sich in Fahr- und Prüfstandsversuche.

3.2.1 Fahrversuche

Die Fahrversuche dienten der Überprüfung der Sensoranordnung unter wirklichkeitsnahen Bedingungen.

3.2.1.1 Versuchsaufbau

Gemäß Abbildung 7 wurden zur Ermittlung des theoretischen Weges vier induktiv arbeitende Näherungssensoren an den Radvorgelegen angebracht. Die Ermittlung des vom Fahrzeug zurückgelegten "wahren" Weges (d.h. frei vom Radschlupf) erfolgte mit den bereits erwähnten berührungslos arbeitenden Ultraschall-Wegsensoren links und rechts vom Fahrzeug in der Fahrspur. Als Lenkwinkelgeber wurde das beschriebene Linearpotentiometer eingesetzt, dessen Kennlinie auf dem Prüfstand ermittelt wurde.

3.2.1.2 Versuchsdurchführung

Die Fahrversuche erfolgten auf zwei verschiedenen Fahrkursen:

- Geradeausfahrt
- 8-Kurs

Die Versuche auf einer 300 m langen geradeausführenden Asphaltstraße sollten vor allem der Klärung der Charakteristik der Sensorik unter Kalibrierbedingungen (gleichmäßige Geschwindigkeit, minimaler Lenkeinfluß, praktisch schlupffreie Fahrt) dienen. Für die Koppelrechnung wurde für alle Fahrversuche als mittlere Impulsrate (Impulse / m) ihr bei Geradeausfahrt ermittelter Weg verwandt. Als Kriterium für die Genauigkeit der Positionsbestimmung diente die durchschnittliche Abweichung (=absolute Abweichung der Impulssumme / Anzahl der Ortungsvorgänge) zwischen wahrer und berechneter Position.

Die zweite Variante (8-Kurs) der Fahrversuche sollte dagegen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden. Der Kurs entsprach dabei in seiner Form in etwa der Ziffer 8. Die Fahrten auf kurzgemähtem Klee gras mit dem Wechsel zwischen Links- bzw. Rechtskurven und Geradeausfahrt kommen dabei einer tatsächlichen Fahrsituation sehr nahe.

3.2.1.3 Versuchsergebnisse

Entsprechend der Versuchsanordnung wurden die Versuche gesondert ausgewertet.

3.2.1.3.1 Geradeausfahrt

Bei der Analyse der aufgezeichneten Rohdaten ergibt sich für die Impulsraten der eingesetzten Radsensoren ein mittlerer Wert von 7,9 Impulsen pro Meter, d.h die Auflösung betrug 12,7 cm. Dies führt unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeometrie bei der minimalen Differenz von einem Impuls zwischen linkem und rechten Rad einer Achse aus der Koppelrechnung zu einem Winkel von $0,07^\circ$ als kleinstem erfaßbaren Differenzwinkel (= Ortungsauflösung).

Am Beispiel der vorderen Radsensoren ergab sich folgende Rekonstruktion des Fahrtverlaufs (Abbildung 8).

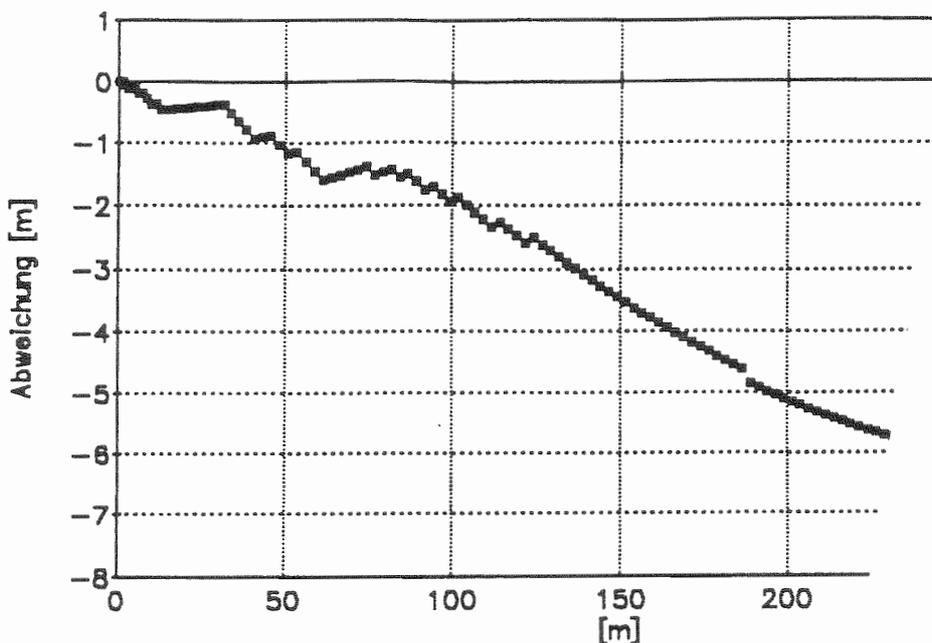


Abbildung 8: Summenfehler der Radsensoren vorne.

Damit führte dieser Versuch zu einem mittleren Wegfehler von -3,45 m / 300 m oder 1,15 %.

Die gleichmäßige Zunahme der Abweichung über die Fahrweglänge deutet auf ein konstantes aber von 1 verschiedenes Impulsratenverhältnis hin. Um den Einfluß dieser Größe auf die Ortungsgenauigkeit zu verdeutlichen wurde rechnerisch deshalb das Impulsratenverhältnis um +0,1% verändert. Abbildung 9 zeigt den sich daraus ergebenden Verlauf der Fahrt.

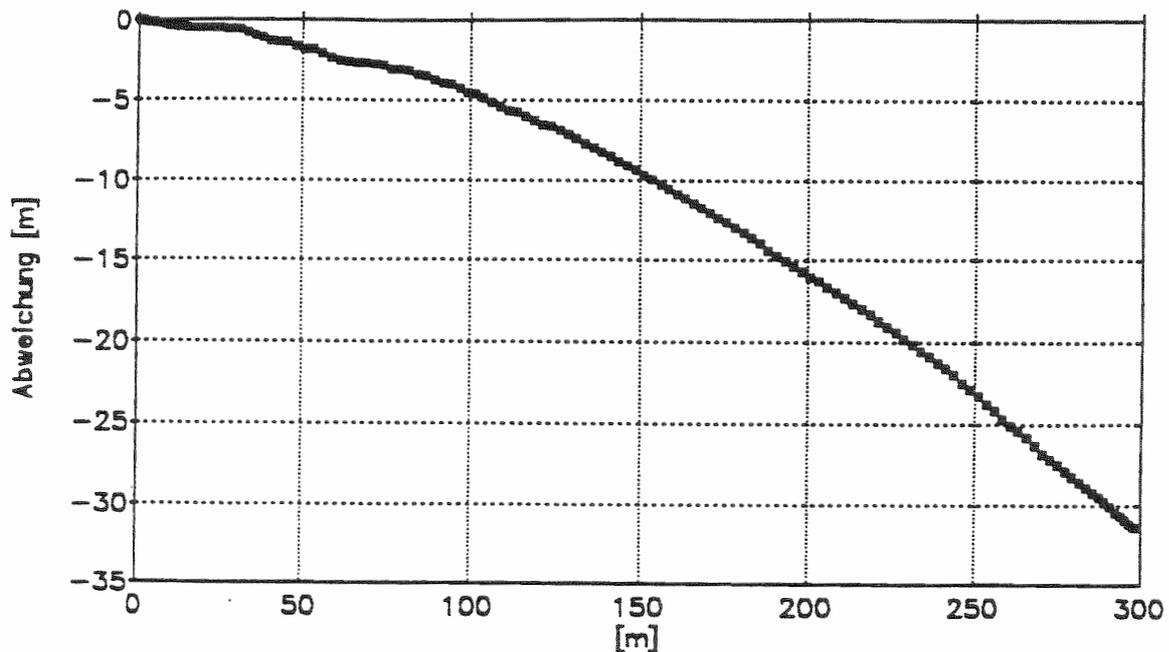


Abbildung 9: Summenfehler der Radsensoren vorne (Impulsratenverhältnis + 0,1%).

Bereits diese geringe Veränderung führt zu einer Vervierfachung des Fehlers im Vergleich zu Abbildung 8. Damit zeigt sich, daß das Impulsratenverhältnis zwischen linkem und rechten Rad ein sehr wesentlicher Faktor für die Ortungsgenauigkeit ist. Dies wiederum macht eine wiederholte Kalibrierung notwendig, um den Einfluß unterschiedlicher Luftdrücke oder stark unterschiedlicher Verschleiß an den Rädern einer Achse auf das Impulsratenverhältnis zu erfassen.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die ermittelten Fahrkurven unter gleichen Bedingungen bei Verwendung der Ultraschallsensoren. Dabei traten erheblich höhere Abweichungen vom wahren Kurs auf als bei den Radsensoren.

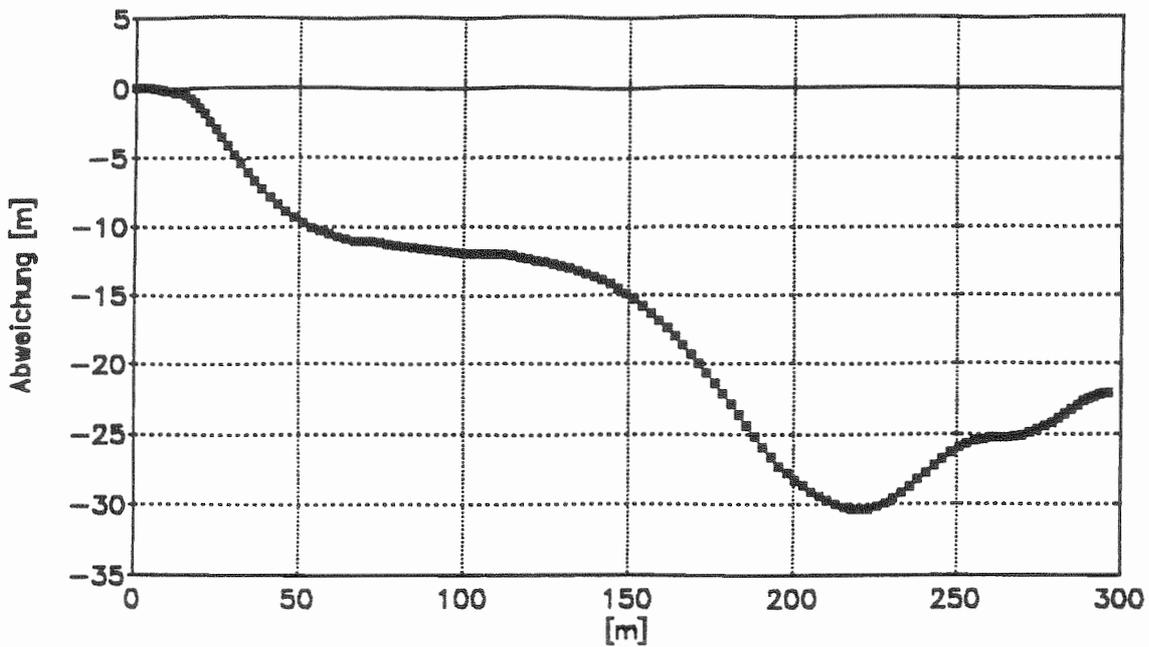


Abbildung 10: Summenfehler der Ultraschallsensoren.

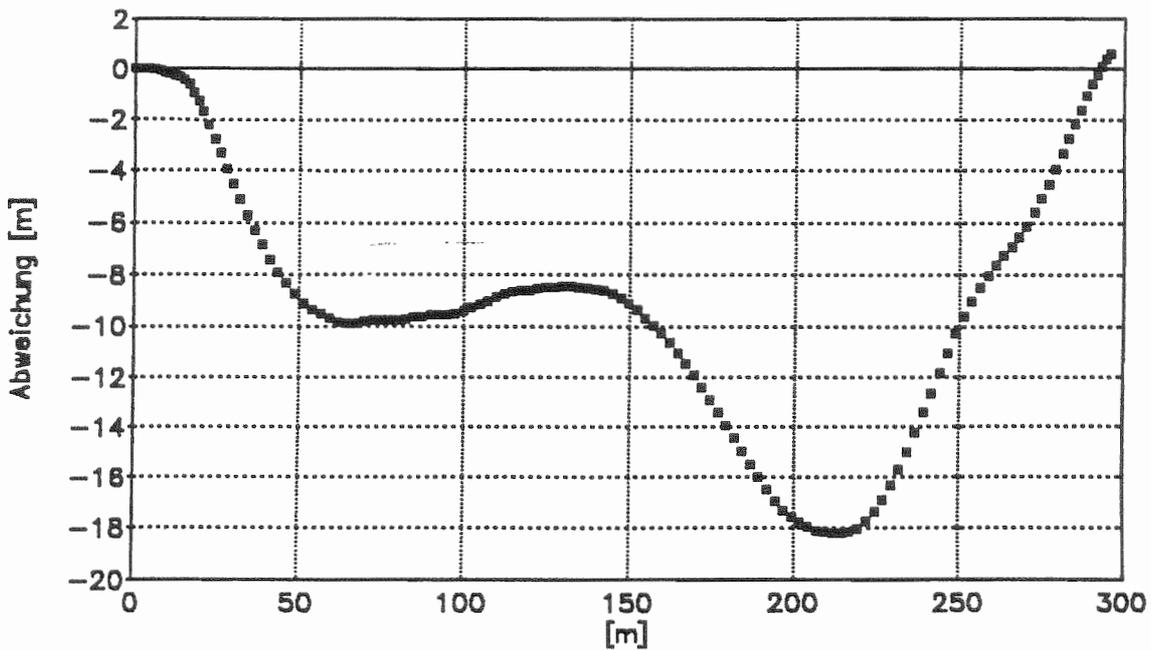


Abbildung 11: Summenfehler der Ultraschallsensoren (Impulsratenverhältnis +0.1%).

Der in Abbildung 10 dargestellte Verlauf ergibt sich bei Unterstellung eines konstanten Impulsratenverhältnisses von 1.

In Abbildung 11 wurde das Impulsratenverhältnis wiederum um 0,1% erhöht.

Auffallend im Vergleich zu den Ergebnissen mit den Radsensoren ist neben der Höhe des Fehlers vor allem der nicht monotone Verlauf der Fahrtkurve wie er bei der Aufsummierung konstanter Fehler zu erwarten wäre. Offensichtlich ist das Impulsratenverhältnis der Ultraschallsensoren nicht konstant. Die gute Übereinstimmung im Endpunkt (in Abbildung 11) ist vor diesem Hintergrund rein zufällig, unterstreicht aber im Vergleich mit Abbildung 10 noch einmal den herausragenden Einfluß des Impulsratenverhältnisses bei der Koppelrechnung.

In früheren Untersuchungen ([48]), in denen die Wiederholbarkeit von Meßergebnissen bezüglich der Wegerfassung geprüft wurde, zeichneten sich die berührungslos arbeitenden Wegsensoren durch eine hohe Präzision aus. Offensichtlich ist die Impulsrate des einzelnen Sensors also über die damals betrachteten Integrationswege von 4 m bis 0,5 m weitgehend konstant. Allerdings wurde mit dem Übergang zu kürzeren Integrationswegen bereits ein Ansteigen des Fehlers beobachtet, der auf mögliche Schwankungen der Impulsrate hindeuten könnte. Die Beobachtung eines nicht konstanten Impulsratenverhältnisses läßt sich damit vor allem mit einer Instabilität der Impulsraten bei den Einzelsensoren erklären, da sich fahrdynamische Einflüsse bei der Kalibrierfahrt (geradeaus, Asphaltstraße) vernachlässigen lassen.

3.2.1.3.2 Fahrt auf 8-Kurs

Die theoretisch zu erwartenden Einflüsse auf die Koppelrechnung, die sich aus dem dynamischen Fahreinsatz ergeben, konnten auf dem praxisnahen 8-Kurs untersucht werden.

Auch auf diesem Kurs wiederholt sich die Beobachtung des mit der zurückgelegten Fahrtstrecke zunehmenden Ortungsfehlers. Dieser resultiert sowohl aus einem Wegfehler, als auch aus einem Kursfehler. Längere Geraden werden in der Rekonstruktion durch einen systematischen Winkelfehler überlagert und damit gekrümmt dargestellt. Dies läßt abgesehen vom Einfluß eines digitalen Quantisierungsfehlers auf ein von 1 abweichendes Impulsratenverhältnis bzw. eine dynamische Änderung des Impulsratenverhältnisses zwischen den jeweiligen Sensoren der linken bzw. rechten Seite des Fahrzeuges schließen.

In den nachfolgenden Abbildungen stellen die ausgefüllten kleinen Quadrate jeweils die geodätisch bestimmten Einzelpunkte dar, deren Verbindung den 8-Kurs ergibt.

Die durchgezogene Linie gibt den durch Koppelrechnung gefundenen Fahrkurs wieder.

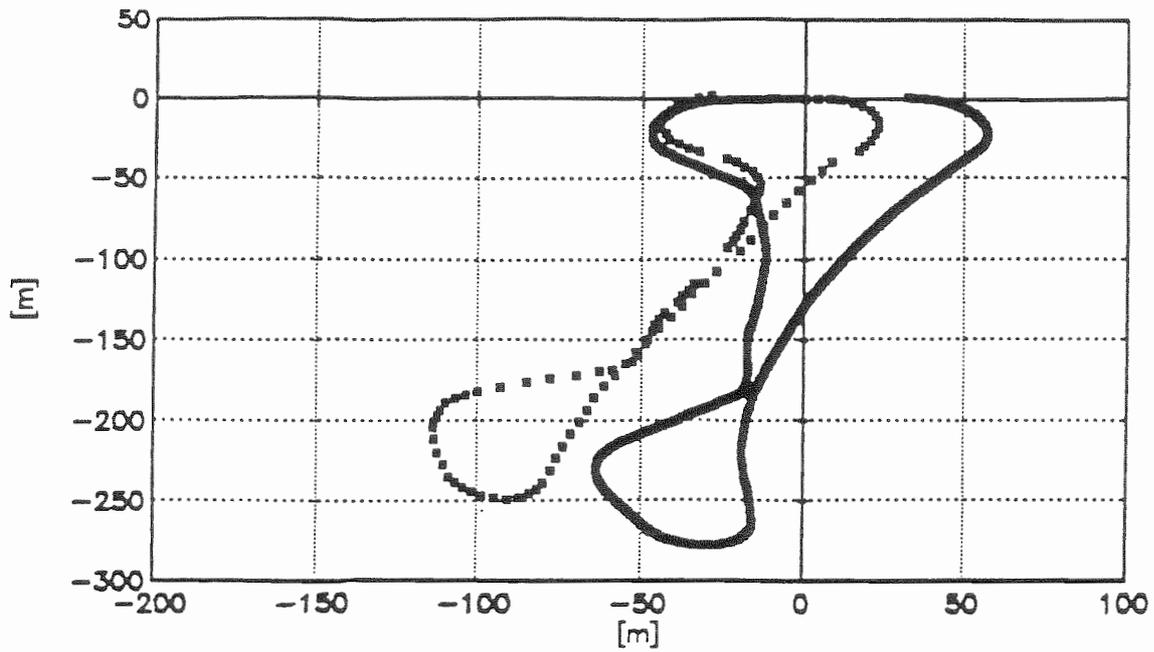


Abbildung 12: Ortungsfehler der Radsensoren vorne.

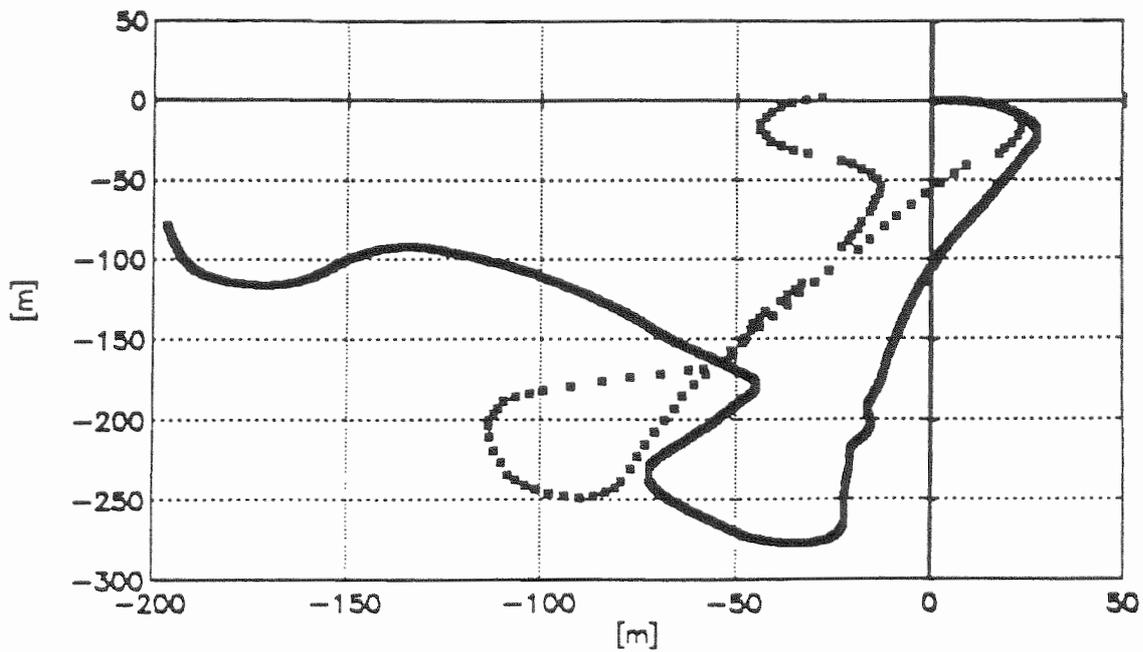


Abbildung 13: Ortungsfehler der Radsensoren hinten.

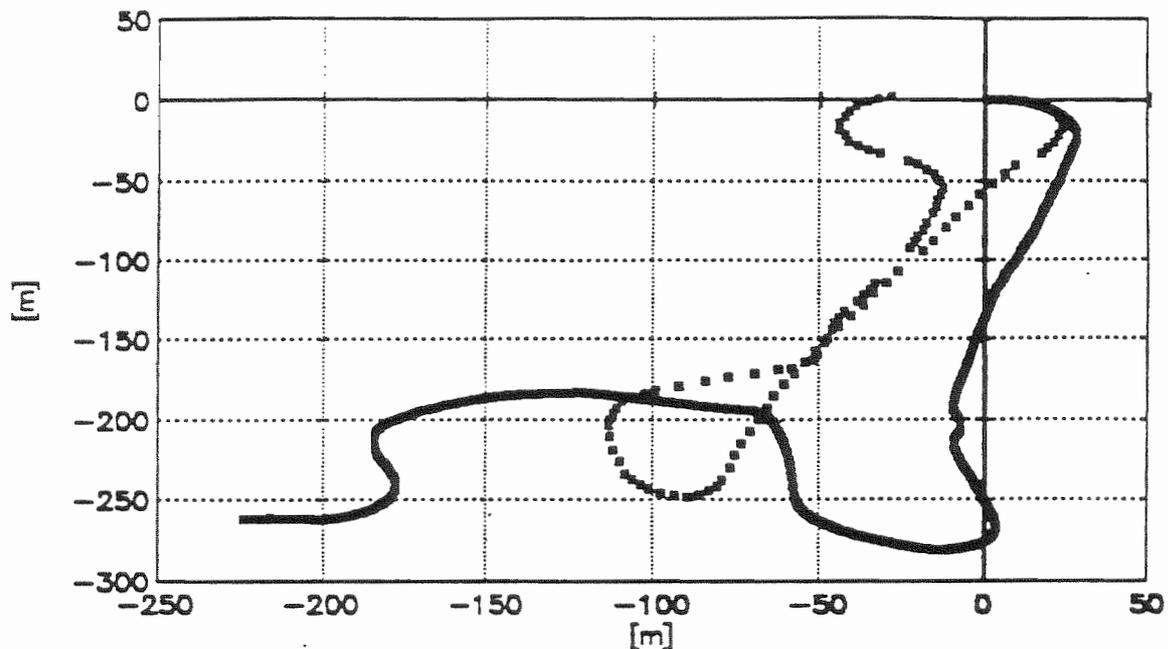


Abbildung 14: Ortungsfehler der Ultraschallsensoren.

Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die aufgezeichneten Fahrkurse der beschriebenen Sensorpaare und unter Anwendung der aus der Kalibrierfahrt gewonnenen Impulsratenverhältnisse.

Insbesondere die Abbildung des Fahrkurses durch die vorderen Radsensoren kommt dem tatsächlichen Kursverlauf sehr nahe. Genau wie bei den Kalibrierfahrten geradeaus werden auch auf dem 8-Kurs gerade Wegabschnitte nicht als Geraden abgebildet. Durch die Aufsummierung dieses Fehlers über die Weginkremente entstehen dann die dargestellten Abweichungen.

Bei den hinteren Radsensoren bzw. den Ultraschallsensoren war eine im praktischen Einsatz nicht vertretbare Abweichung zu beobachten.

Für den Fall der hinteren Radsensoren läßt sich lediglich der Schlupf durch Antriebskräfte als Einflußfaktor isolieren, der bei den (ohne eingeschalteten Allradantrieb) nicht angetriebenen Vorderrädern in vergleichbarer Form nicht auftreten kann. Aufgrund der bei Kurvenfahrt höheren notwendigen Antriebsleistung tritt in diesen Fahrzuständen auch erhöhter Schlupf an den Hinterrädern auf. Die Tatsache, daß die Kurven des Kurses regelmäßig zu offen abgebildet werden, kann nur durch eine Veränderung des Impulsratenverhältnisses während dieser Abschnitte erklärt wer-

den: Ungleicher Schlupf an beiden Rädern (in diesem Fall höherer Schlupf am kurveninneren Rad) ist im Rahmen der Koppelrechnung gleichbedeutend mit einer solchen Änderung.

Die bereits in den Kalibrierfahrten festgestellten dynamischen Veränderungen der Impulsratenverhältnisse bei den Ultraschallsensoren tragen auch in den Fahrversuchen maßgeblich zum Gesamtfehler der Ortung bei. Die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Problematik mit unterschiedlichem Schlupf bei verschiedenen Fahrzuständen kann bei berührungslos arbeitenden Sensoren ja gerade keine Rolle spielen.

Aufgrund des bereits bei Geradeausfahrt durch Simulation bestätigten großen Einflusses des Impulsratenverhältnisses wurde versucht, eine Optimierung der Koppelrechnung durch Anpassung des Impulsratenverhältnisses zu erreichen. Als Optimierungskriterium wurde die Übereinstimmung von Start- und Zielkoordinaten in zumindest einer Dimension gewählt.

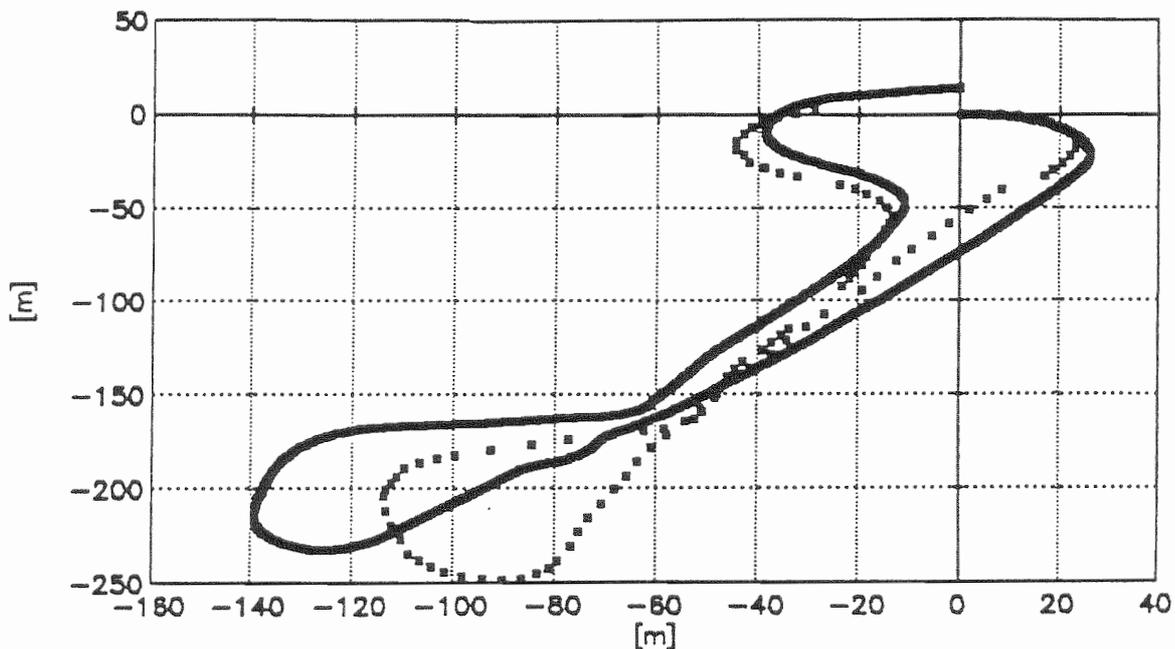


Abbildung 15: Ortungsfehler der Radsensoren vorne (Impulsratenverhältnis - 0.2%).

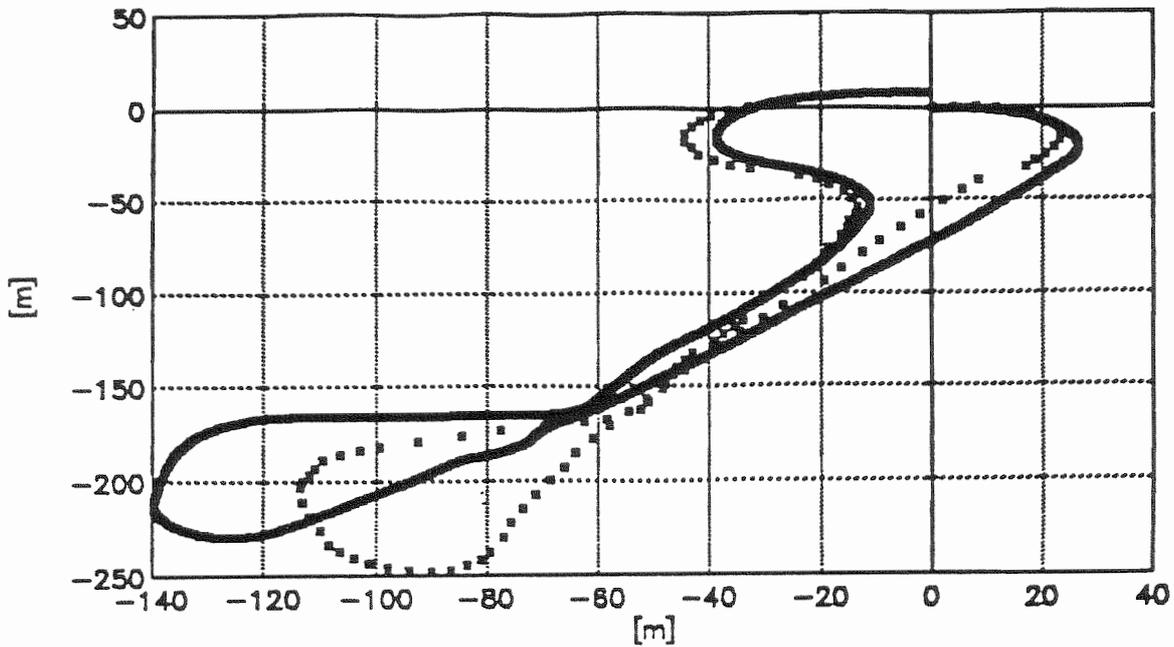


Abbildung 16: Ortungsfehler der Radsensoren hinten (Impulsratenverhältnis +0,45%).

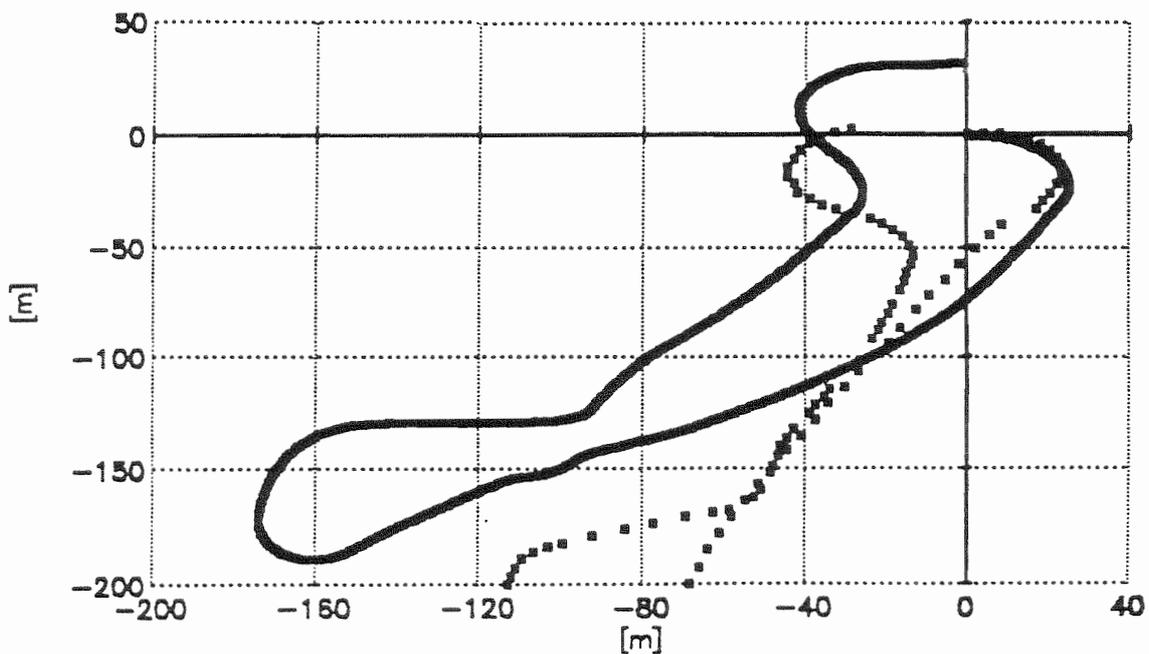


Abbildung 17: Ortungsfehler der Ultraschallsensoren (Impulsratenverhältnis +0,88%).

Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen, daß in der dynamischen Anpassung des Impulsratenverhältnisses ein möglicher Weg der Erhöhung der Or-

tungsgenauigkeit liegt. Allerdings läßt sich dies im praktischen Betrieb nur durch die automatische Kalibrierung der Meßanordnung mittels eines übergeordneten Ortungssystems erreichen. In den Versuchen hat sich gezeigt, daß das effektive Impulsratenverhältnis nicht nur von statischen (oder niedrig dynamischen) Fahrzeugparametern, sondern vor allem auch von den dynamischen Fahrzuständen abhängt. Wechselnde Größen der Wirkung von Schlupf, von Einfederung, von Unter- oder Übersteuern, oder vom Einsinken der Räder auf weichem Untergrund treten unregelmäßig auf und wirken auf die Koppelrechnung letztlich immer in Form einer Veränderung des effektiven Impulsratenverhältnisses.

Eine weitere Verbesserung des Koppelergebnisses ließe sich möglicherweise durch Hinzunahme zusätzlicher Sensorik erreichen. Die Verwendung des Lenkwinkels als Zusatzgröße bietet sich an, da dieser abgesehen von extremen Fahrzuständen eng mit der Bewegungsrichtung des Fahrzeuges zusammenhängt.

3.2.2 Prüfstandsversuche

In einem Prüfstandsversuch wurde für die Einsätze des zweiten Versuchsjahres eine Vermessung des potentiometrischen Lenkwinkelgebers durchgeführt.

3.2.2.1 Versuchsaufbau

Zwischen Achsschenkel des rechten Vorderrades und Achsrohr wurde auf einer Teleskopführung ein Linearpotentiometer mit einer für diese Anwendung nicht begrenzenden Auflösung angebracht. Die Vorderachse des Versuchsfahrzeuges wurde aufgebockt, so daß die Radflanschmittelpunkte eine zu einer Projektionsebene (Metallmaßband) parallele Grundlinie und die Fahrzeuglängsachse eine senkrechte zu dieser Projektionsebene bildete. Sowohl an der rechten, als auch an der linken Radflansch fixierte Laserstrahler projizierten Leuchtpunkte auf das Metallband. Der Aufbau und die geometrischen Verhältnisse sind aus Abbildung 18 ersichtlich.

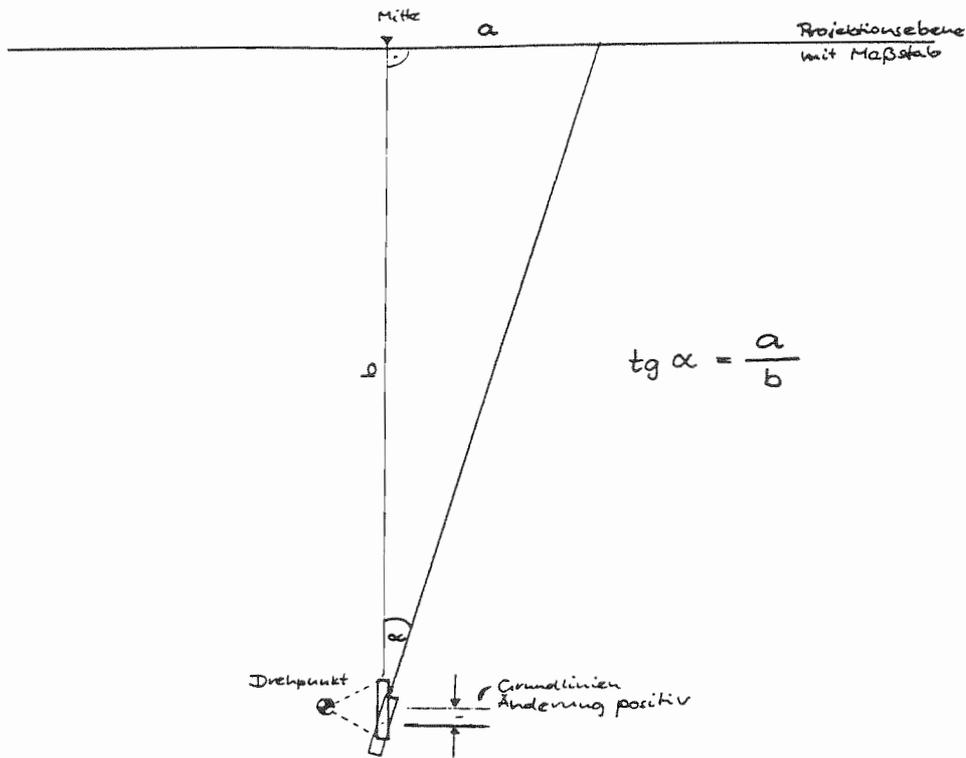


Abbildung 18: Geometrische Verhältnisse der Lenkwinkelbestimmung.

Die Widerstandsmessung am Linearpotentiometer wurde mit dem in Abbildung 19 gezeigten Aufbau durchgeführt: Die am Mittenabgriff des Potentiometers abgefallene Teilspannung der aus einer Normalspannungsquelle zugeführten Versorgungsspannung wurde an den Eingang eines Linienschreibers mit parallel geschaltetem Digitalvoltmeter gelegt. Der abgelesene Wert am Digitalvoltmeter variiert je nach Schaltung des Abgriffs proportional oder indirekt proportional mit der geometrischen Stellung des Mittenabgriffs (und damit dem Auszug des Linearpotentiometers). Für den Einsatz als Stützungssensor in einem Koppelortungssystem ist die Kenntnis des funktionalen Zusammenhangs zwischen tatsächlichem Lenkwinkel und dem vom Sensor gelieferten Signal entscheidend. Durch die Erfassung des Lenkwinkels über dem Sensorsignal konnte diese Kennlinie aufgenommen werden.

Meßaufbau:

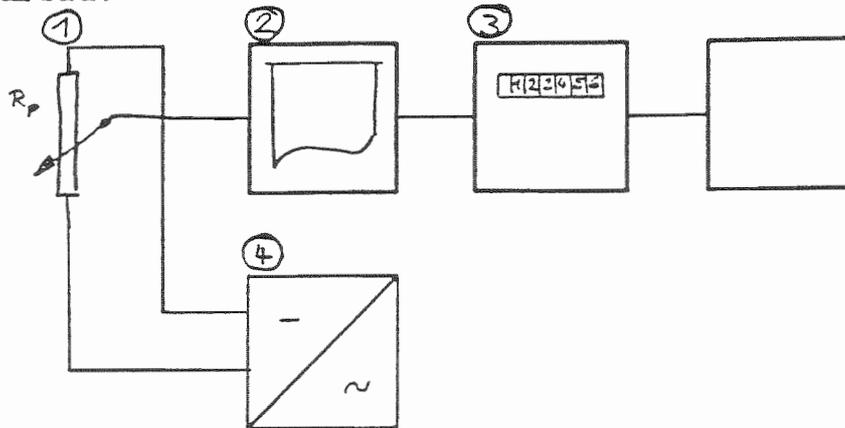


Abbildung 19: Meßaufbau zur Kalibrierung des Lenkwinkelsensors: 1 Linearpotentiometer, 2 Linienschreiber, 3 Digitalvoltmeter, 4 Normalspannungsquelle.

3.2.2.2 Versuchsdurchführung.

Die Ermittlung der Strecken (a,b) (Abbildung 18) und damit des Lenkwinkels α erfolgte geometrisch. Der Lenkwinkel wurde ausgehend von Null in beliebigen, aber in etwa konstanten Winkelabständen variiert. In der Aufzeichnung wurde jedem eingestellten Winkel ein Ablesewert des Digitalvoltmeters (Abbildung 19) zugeordnet.

3.2.2.3 Ergebnisse

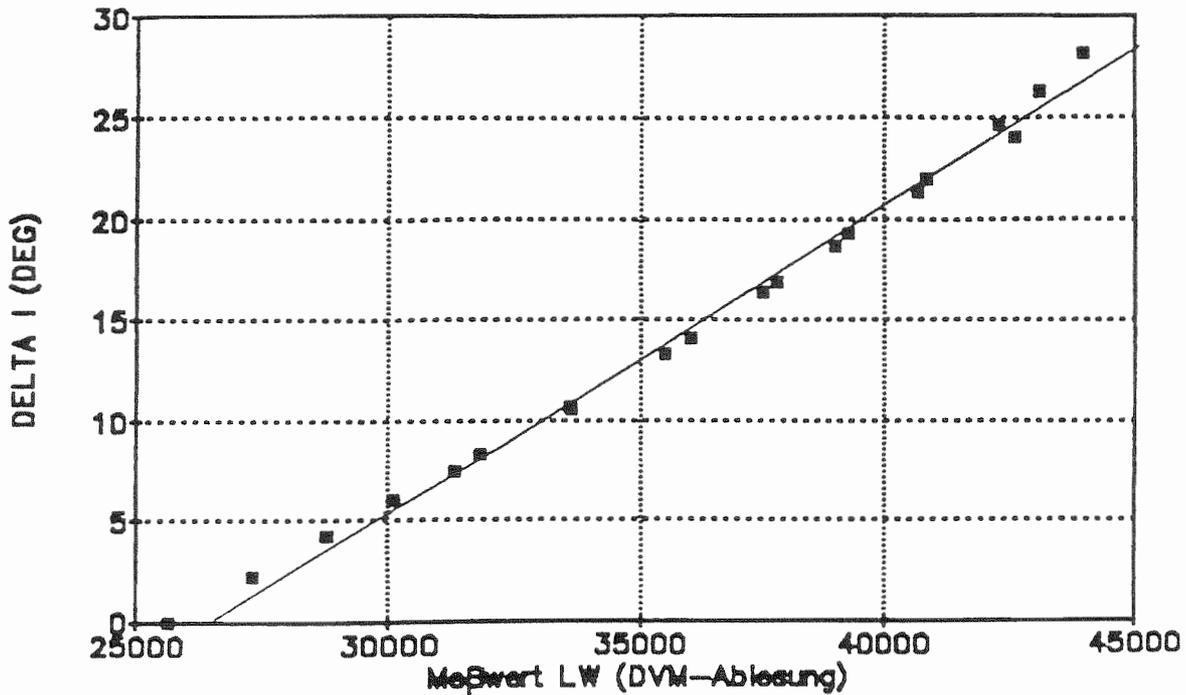


Abbildung 20: Radeinschlagswinkel Delta I als Funktion des Meßwertes (LW) (L).

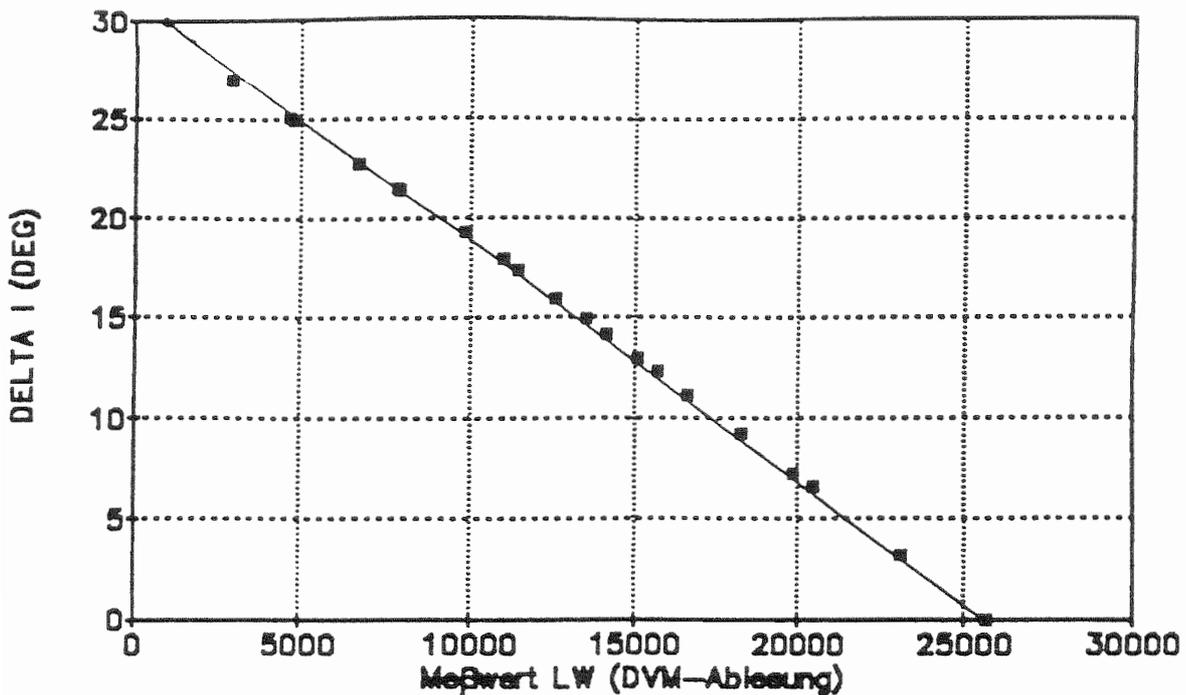


Abbildung 21: Radeinschlagswinkel Delta I als Funktion des Meßwertes (LW) (R).

Abbildung 20 und Abbildung 21 stellen die aufgenommenen Kennlinien dar. Der Meßwert (LW) wurde aus der Ablesung des Digitalvoltmeters (DVM) gewonnen.

Abbildung 20 zeigt die Kennlinie für Lenkeinschlag nach links, Abbildung 21 die entsprechende Kennlinie für Lenkeinschlag nach rechts.

Als Ergebnis ist (hier am Beispiel des linken Rades) festzuhalten, daß bei der gewählten Geometrie der Anordnung des Linearpotentiometers am Achsschenkel ein linearer Zusammenhang zwischen Radeinschlagswinkel ΔI und Meßwert LW besteht. Durch diese Linearität ist die Integration eines solchen Sensors in ein Kopelortungssystem besonders leicht zu realisieren, da die lineare Kennlinie eine konstante Auflösung bei der Messung des aktuellen Radeinschlagswinkels gewährleistet.

3.3 Versuche zum Einsatz der Satellitenortung (orbital gestützte Trilateration)

Die Versuche zum Einsatz von GPS wurden als Fahrversuche durchgeführt, wobei neben dem beschriebenen Versuchsfahrzeug UNIMOG auch Mähdrescher als Trägerfahrzeuge eingesetzt wurden.

3.3.1 Fahrversuche UNIMOG

Im folgenden werden die Versuche zum Einsatz von GPS auf dem Unimog beschrieben.

3.3.1.1 Versuchsaufbau

Auf dem Versuchsfahrzeug kam im Versuchsjahr 1990 eine GPS-Empfangsanlage zum Einsatz, die noch nicht DGPS-fähig war. Deren Ausgabedaten wurden auf den beschriebenen Industrie-PC aufgezeichnet.

3.3.1.2 Versuchsdurchführung

Es wurden wiederholt zwei verschiedenartige Kurse auf Getreidestoppel durchfahren: Ein Rundkurs und ein Kurs, der ähnlich Fahrgassen mit einem Abstand von 16 m angelegt war. Die Vermessung der Kurse erfolgte konventionell mit dem Bandmaß. Entsprechend positionierte Fluchtstäbe ermöglichten dem Fahrer, den Kursverlauf zwischen den einzelnen Wiederholungen auf 0,5 m genau einzuhalten. Die aufgezeichneten Daten wurden nach Versuchsende zu grafischen Darstellungen weiterverarbeitet (Abbildung 22 und Abbildung 23).

3.3.1.3 Ergebnisse

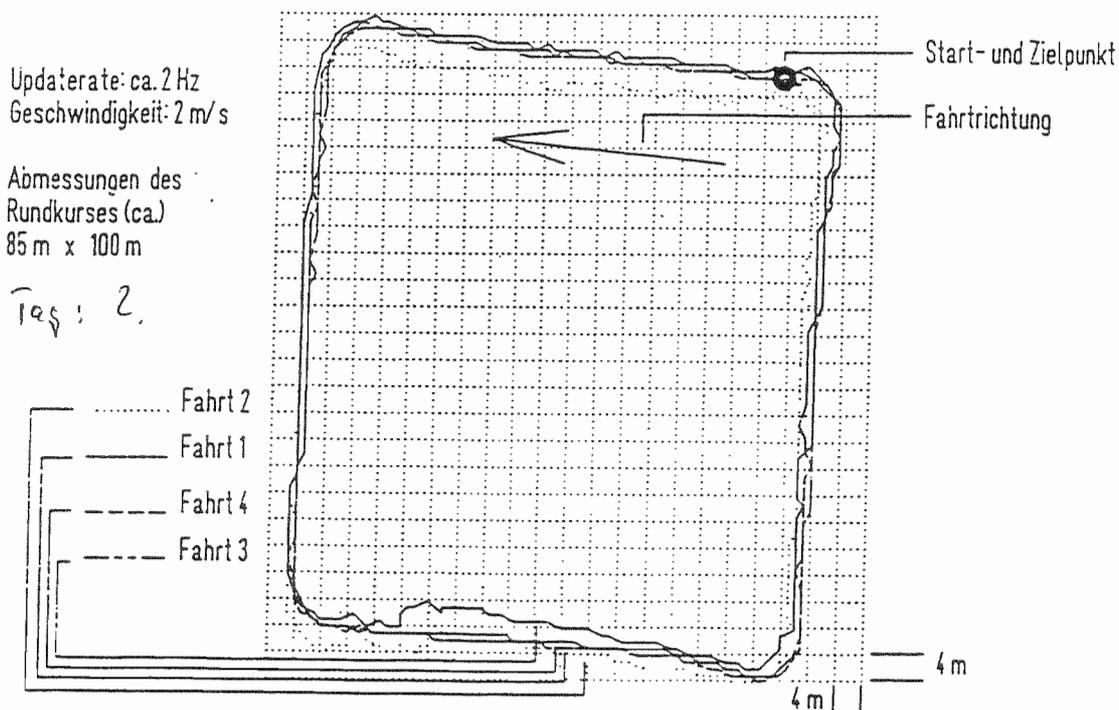


Abbildung 22: Fahrversuch GPS - Rundkurs (Gut Wittenfeld, August 1990).

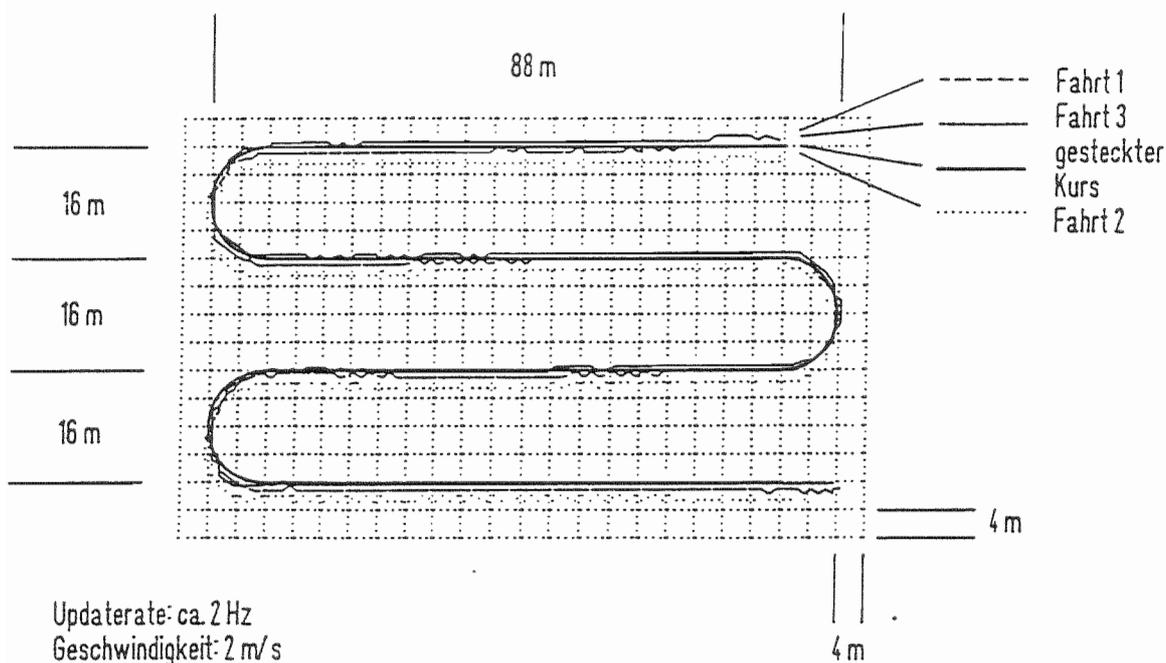


Abbildung 23: Fahrversuch GPS - Fahrgassenkurs (Gut Wittenfeld, August 1990).

Die grafischen Ergebnisdarstellungen zeigen eine zunächst nicht erwartete hohe Ortungsgenauigkeit (± 2 m). Diese hohe Genauigkeit läßt sich vor allem durch zwei Tatsachen erklären:

Zum einen war zum Versuchszeitpunkt S/A, d.h. die künstliche Verschlechterung der Information des Satellitensignals nicht aktiv.

Zum anderen wurden alle Wiederholungen innerhalb einer sehr kurzen Versuchsdauer von weniger als einer Stunde gefahren. Dabei verändert sich die Geometrie der angepeilten Satelliten im Verhältnis zum Fahrzeug nur wenig. Über längere Zeiträume lassen sich solche Genauigkeiten nur durch Anwendung differentieller GPS-Messungen (DGPS) erreichen.

Dennoch ließen sich mit dem angewandten Verfahren bereits zu einem Zeitpunkt, an dem DGPS noch nicht verfügbar war, dessen mögliche Genauigkeit abschätzen, weil sich eine sehr kurze Versuchsdauer in einer geringen Veränderung der systematischen Fehler niederschlägt. Der systematische Fehler ist damit für die Wiederholungen als nahezu konstant anzusehen.

3.3.2 Fahrversuche Mähdrescher

Innerhalb der Inventurphase des Forschungsverbundes Agrarökosysteme München (FAM) von 1990-1992 übernahm das Institut für Landtechnik, Weihenstephan die flächenhafte Ertragskartierung beim Mähdrusch. Über diesen Zeitraum wurden im Rahmen der Vor- und Hauptversuche ca. 400 ha Getreide geerntet. Dabei sollten die über GPS ermittelten Positionsdaten mit der vom Bordcomputer des Mähdreschers zur Verfügung gestellten Ertragsinformation zusammengeführt und in einer Ertragskarte dargestellt werden. Es kamen unterschiedliche GPS-Empfängersysteme und -Konfigurationen zum Einsatz.

3.3.2.1 Versuchsaufbau

Neben der für die Ertragsmessung notwendigen Sensorik wurden die eingesetzten Mähdrescher (1990 eine Maschine, 1991 und 1992 je zwei Maschinen von unterschiedlichen Herstellern) mit GPS-Positionierungssystemen ausgestattet. Im Jahr 1990 kam die auch für die Fahrversuche mit UNIMOG eingesetzte "einfache" GPS-Anlage zum Einsatz, in 1991 und 1992 wurden ausschließlich DGPS-Verfahren

(Offline und Online) verwendet. Tabelle 1 stellt die zur Verfügung stehende Technik für die Ernte 1991 zusammen, während Abbildung 24 den Versuchsaufbau zeigt.

Tabelle 1: Sensorausstattung der Mähdrescher in der Ernte 1991.

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
Schnittanfangserfassung	Lichtschranke	Lichtschranke
Wegstreckenmessung	Induktivsensoren an beiden Antriebsrädern	Induktivsensoren an beiden Antriebsrädern
Zellenradrehzahl	Induktivsensor	—
Dreschwerk ein/aus	—	DATAVISION
Schneidwerk ein/aus	—	DATAVISION
Schneidwerk reversieren	—	DATAVISION

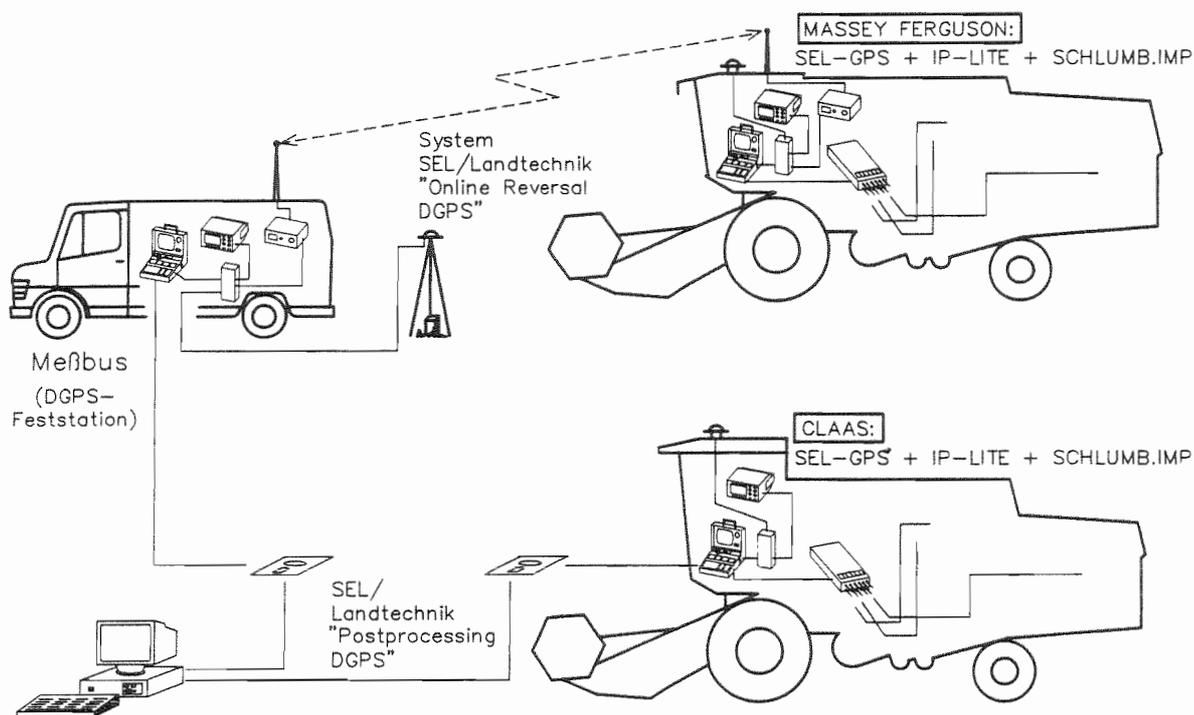


Abbildung 24: Ortung und Datenerfassung für die Ertragsermittlung 1991.

1991 konnte erstmals auf ein Online DGPS zurückgegriffen werden. Da bei dem verwendeten System die Korrektur der Fahrzeugposition jedoch bei der Referenzstation durchgeführt wird, bezeichnet man dieses Verfahren als "Reversal DGPS", d.h. die Fahrzeuge senden ihre Positionsmessungen an die Zentrale. Die zweite Maschine war mit einem baugleichen Empfänger ausgestattet, der allerdings nicht über eine ständige Datenfunkverbindung zur Zentrale verfügte. Deshalb wurden die zunächst auf der Maschine gespeicherten Daten nach Versuchsende im Post-processing mit den Korrekturdaten der Referenzstation verrechnet. Das angewandte DGPS-Korrekturverfahren war die sog. Positionskorrektur, d.h. die Korrekturinformation enthielt eine Translationsvorschrift bezüglich der X-, Y-, und Z-Koordinaten.

Tabelle 2 und Abbildung 25 geben eine zusammenfassende Darstellung der technischen Versuchsausrüstung bzw. des Versuchsaufbaus zur Ernte 1992.

Tabelle 2: Sensorausstattung der Mähdrescher in der Ernte 1992.

Ausstattung	CLAAS DOMINATOR 108 MAXI	MASSEY FERGUSON MF 40 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)	DATAVISION + CHIPKARTE Robust-PC: KONTRON IP-Lite (2x RS f. Ortung und Ertrag) (S-Net + DATALOGGER für Sensoren)
Positionsbestimmung	SEL DGPS GLOBOS LN 2000 (ONLINE) ASHTECH M XII DGPS (POSTPROCESSING)	MF-DATAVISION DGPS ASHTECH M XII + OEM MODUL DGPS (ONLINE)
Sensoren für		
Schneidwerk Arbeitsstellung	Zugschalter	Induktivsensor
Schnittanfangserfassung	Lichtschranke	—
Wegstreckenmessung	Induktivsensoren an beiden Antriebsrädern	—
Zellenradrehzahl	Induktivsensor	—
Dreschwerk ein/aus	Bordelektrik	DATAVISION
Schneidwerk ein/aus	Bordelektrik	DATAVISION
Schneidwerk reversieren	Bordelektrik	DATAVISION
Schnittbreite	Taster	—
	Ultraschall	—
Kornfeuchte	Kapazitiver Sensor	—

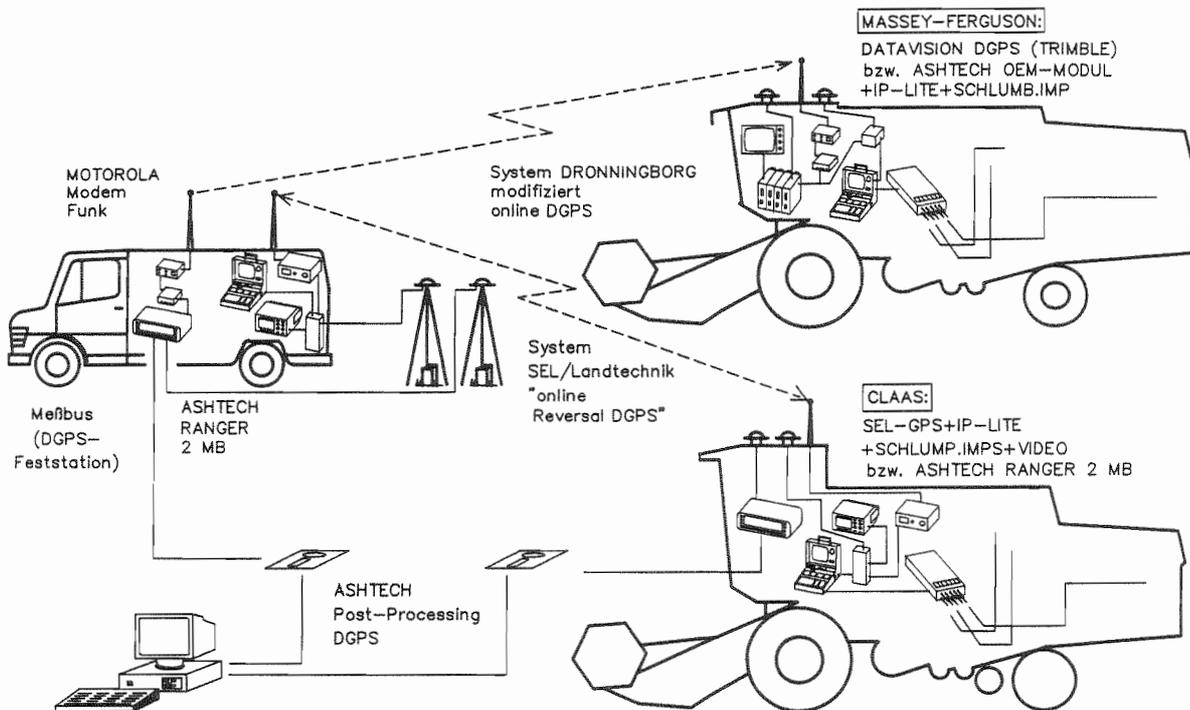


Abbildung 25: Ortung und Datenerfassung für die Ertragsermittlung 1992.

Im Erntejahr 1992 wurde zusätzlich ein Online DGPS-System (mit Satellitenentfernungskorrektur) getestet, das von einem Mähdrescherhersteller als Vorserienprodukt verfügbar war (System Dronningborg). Die Korrektorempfangsanlage wurde modifiziert, so daß noch ein zweiter Empfänger als Online DGPS-System (mit Satellitenentfernungskorrektur) parallel getestet werden konnte.

Das im Vorjahr eingesetzte reversal DGPS mit Positionskorrektur kam nur noch auf einer Maschine zum Einsatz und wurde durch ein unabhängiges leistungsfähiges Offline DGPS mit Satellitenentfernungskorrektur ergänzt.

Bei der Satellitenentfernungskorrektur ("Pseudorange"-Korrektur) enthält die Korrekturinformation anstelle einer Translationsvorschrift Korrekturen für die Schrägentfernungen zwischen Empfänger und Satelliten. Dadurch ist dieses Verfahren vor allem bei stark unterschiedlichen Empfangsbedingungen (z.B. durch Abschattung, große Entfernung) zwischen Referenzstation und Mobilempfänger wesentlich leistungsfähiger als die Positionskorrektur.

3.3.2.2 Versuchsdurchführung

Alle eingesetzten Maschinen mußten jeweils mit dem normalen landwirtschaftlichen Einsatz vergleichbare Flächen beernten. Daraus leitete sich die Forderung nach ho-

her Verfügbarkeit aller installierten Meßsysteme ab. Abgesehen von den Zeiten unzureichender Satellitenverfügbarkeit (weniger als 3 Satelliten über dem Horizont) wegen noch unvollständigem Systemausbau in 1990 und 1991, wurden während der Arbeit jeweils Rohmesswerte der GPS-Empfänger, Positionsmessungen und synchron dazu die Ertragswerte der Durchflusssensorik der Mähdrescher aufgezeichnet, ohne den "normalen" Arbeitsablauf zu stören. Übliche Arbeitspausen wurden zur Übernahme der Daten von den Mobilrechnern auf Datenträger (Disketten) genutzt.

3.3.2.3 Ergebnisse

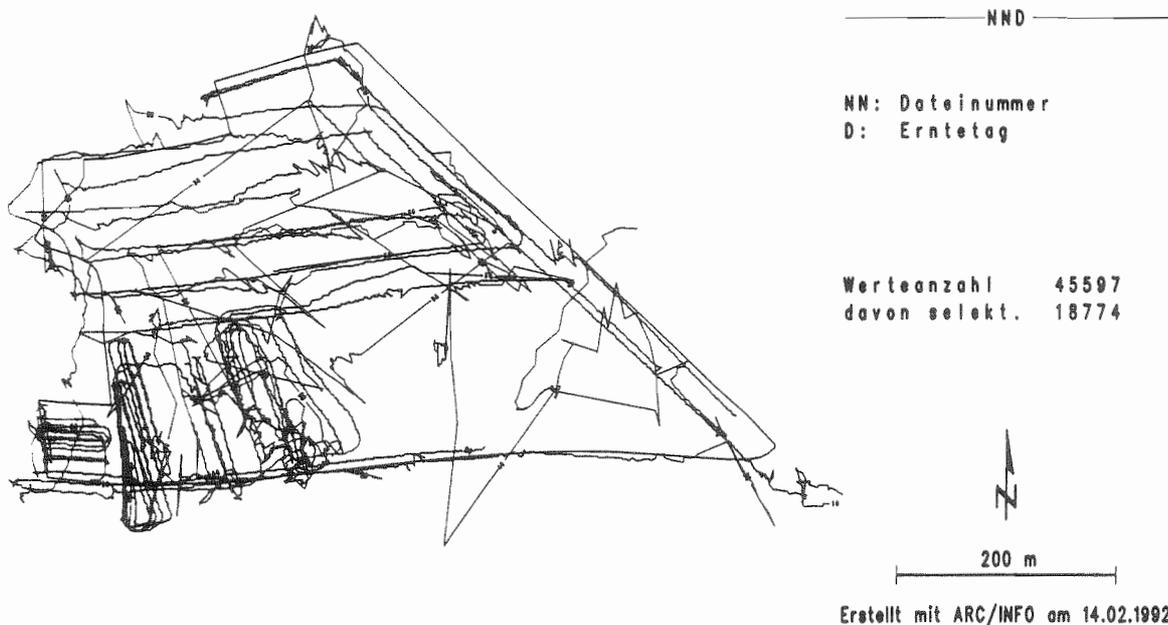


Abbildung 26: Fahrspuraufzeichnung beim Mähdrusch (Ertragsermittlung mit GPS, August 1990, Scheyern).

Abbildung 26 zeigt nur vereinzelt eine Aufzeichnung einzelner Arbeitsspuren. Der große Anteil von Flächen ohne Positionsbestimmung rührt von der zum Versuchszeitpunkt sehr schlechten Satellitenverfügbarkeit her (Unvollständiger Ausbau des Raumsegments von GPS). Längere Aufzeichnungen einzelner Fahrspuren zeigen aber den schon aus den Fahrversuchen mit UNIMOG erwarteten Einfluß eines zeitlich veränderlichen systematischen Fehlers durch teilweise deutliche Driften.

Bei der Erfassung statischer GPS-Daten (Abbildung 27) zeigte demgegenüber auch das einfache GPS bei abgeschalteter S/A eine hohe Genauigkeit ($p=95\%$) bei der

nördlichen Breite (X) von ± 28 m, bei der östlichen Länge (Y) von ± 24 m, und bei der Höhe (Z) von ± 46 m.

Abbildung 27 zeigt darüberhinaus, wie stark die erreichbare Genauigkeit bei den Koordinatenkomponenten Länge, Breite und Höhe im Tagesverlauf schwankt. Während z.T. die Standardabweichungen der Stundenmittelwerte nur bei 10 m liegen, ergeben sich zu anderen Tageszeiten Werte von fast 80 m. Die hohen Genauigkeiten ließen sich bei guter Satellitenverfügbarkeit (große Anzahl verfügbarer Satelliten / günstige geometrische Bedingungen) realisieren, während zu Zeiten schlechter Überdeckung (geringe Anzahl verfügbarer Satelliten / ungünstige geometrische Bedingungen) entsprechend höhere Fehler auftraten.

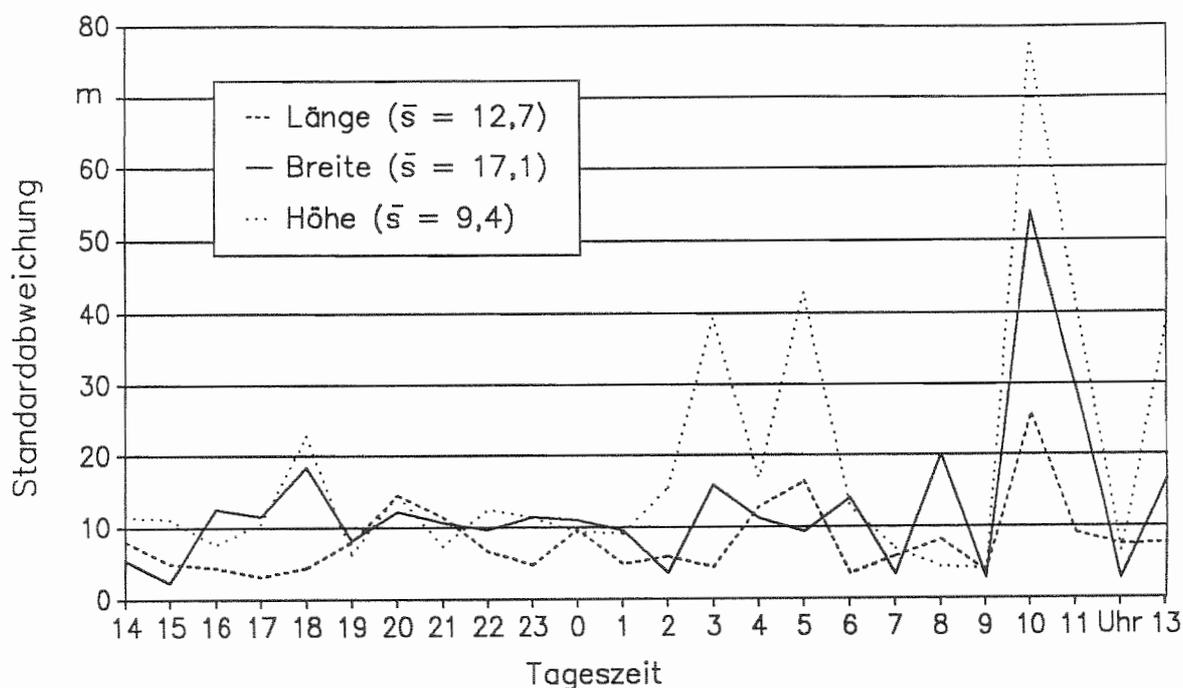


Abbildung 27: Standardabweichungen von Stundenmittelwerten für GPS (Gut Wittenfeld, 30./31.7.1991; SEL-GLOBOS LN 2000).

Diese Werte ließen sich 1991 durch den Einsatz des beschriebenen Online "reversal" DGPS mit Positionskorrektur (Updaterate 7 s, d.h. alle 7 s wurde ein neuer Korrekturwert berechnet) auf mittlere verbleibende Restfehler von 15 bis 30 cm verbessern. Allerdings streuten die Restfehler in einem relativ weiten Bereich: Sie ergaben Standardabweichungen von etwa 6,4 m bei X und Y und von nahezu 8 m bei Z. Anhand der rekonstruierten Fahrspuren eines Mähdreschers lassen sich diese Ergebnisse einfach visualisieren (Abbildung 28). Diese können im Postprocessing

durch gleitende Mittelwertbildung zu realitätsnahen Fahrabläufen verrechnet werden, wobei wirkliche Ausreißer problemlos zu beseitigen sind.

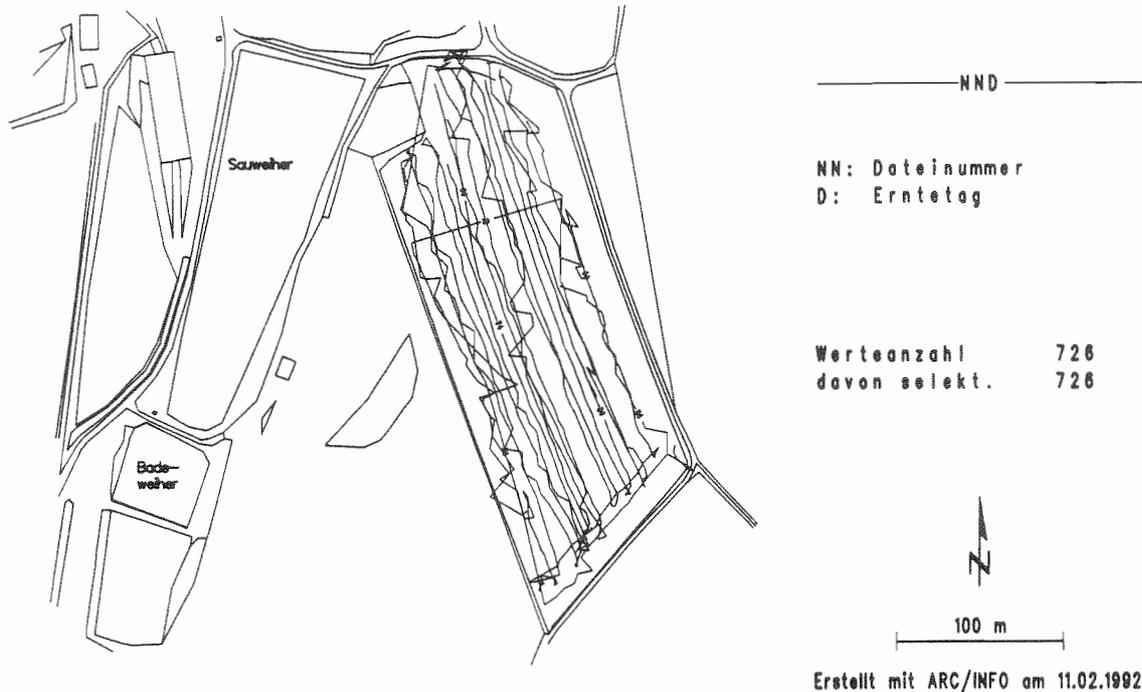


Abbildung 28: Fahrspuren des Mähdreschers (August 1991, Scheyern).

Zum Jahresende 1991 wurden von den GPS-Betreibern die S/A-Degradation auf das Positionssignal aufgeschaltet und dadurch eine deutliche Verschlechterung der Ortungsgenauigkeit verursacht. Im einfachen GPS-Einsatz führte dies zu mittleren Fehlern von ± 65 m bei X und Y und zu ± 117 m bei Z. Charakteristisch für die S/A-Degradation ist die hohe zeitliche Änderung der Positionsfehler, die kürzere Updateraten für die Korrektur notwendig macht.

Deshalb wurde 1992 zur Satellitenentfernungskorrektur übergegangen und gleichzeitig eine leistungsfähigere Referenzstation (höhere Updateraten, verbesserte Signalfilterung) eingesetzt. Über die damit erreichten Ergebnisse kann aus der Darstellung der Fahrspuren schon ein erster Eindruck gegeben werden (Abbildung 29).

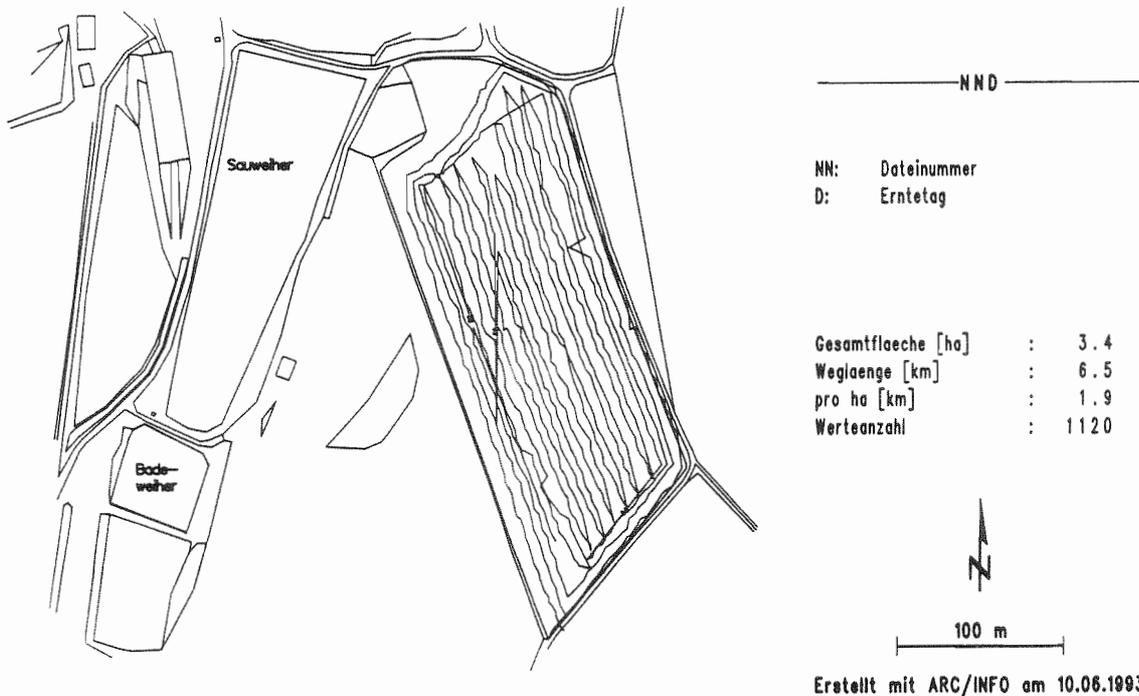


Abbildung 29: Fahrspuren des Mähdreschers (August 1992, Scheyern).

Dabei stellt jeder Fahrspurpunkt eine Positionsbestimmung mit Ertragszuordnung dar. Kreuzende Fahrspuren sind nicht zu erkennen, woraus bei einer Arbeitsbreite des Mähdreschers von 5,50 m auf einen maximalen Ortungsfehler von $\pm 2,5$ m geschlossen werden kann.

3.4 Versuche zur Bestimmung technischer Parameter der Systemgenauigkeit

Seit Sommer 1991 arbeitet das Raumsegment des GPS praktisch ununterbrochen mit S/A-Degradation. Die dadurch induzierten Positionsfehler beim Benutzer lassen sich größtenteils durch Einsatz differentieller Meßverfahren (DGPS) wieder eliminieren. Die Kenntnis der Fehlerverteilung, der Dimension der Fehler, sowie der Einflußparameter auf die Effizienz der Korrektur sind daher entscheidend für die Beurteilung der Tauglichkeit von DGPS für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

3.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entspricht einer einfachen GPS-Empfängerstation, d.h. GPS-Empfänger und Antenne in Form einer Referenzstation. Zusätzlich wird ein PC-kompatibler Laptop zur Datenaufzeichnung (Datenvolumen ca. 14 MB / 24 h) eingesetzt.

3.4.2 Versuchsdurchführung

Zur Überprüfung der Systemeigenschaften von GPS insbesondere unter dem Einfluß von S/A wurden Ganztagesbeobachtungen durchgeführt. Anschließend wurden diese aufgezeichneten Daten über ein Rechnerprogramm verarbeitet, das eine Simulation der DGPS-Messung zuließ:

Die aufgetretenen Fehler (Abweichungen vom bekannten Ort) werden über 7 s (typische Updaterate, die sich mit der 1992 verfügbaren Echtzeit DGPS-Anlage realisieren ließ) gemittelt. Dieser Korrekturwert wird auf den nächsten zur Verfügung stehenden Meßwert angewendet. Daraus ergibt sich eine Positionsangabe, deren Abweichung zur bekannten Position als DGPS-Fehler aufgezeichnet wurde.

In einem zweiten Schritt wurde die Updaterate von 7 s bis auf 1 s verkürzt, um den Einfluß der Updaterate auf die erreichbare Ortungsgenauigkeit zu ermitteln.

3.4.3 Versuchsergebnisse

Allen Analysen liegt das Datenmaterial von jeweils 24 h zugrunde (=100.000 bis 150.000 Einzelmessungen). Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen die Verteilung der Fehler von DGPS. Als Datengrundlage dienten Aufzeichnungen vom 30./31.7.91 ("S/A off") und 22./23.1.92 ("S/A on").

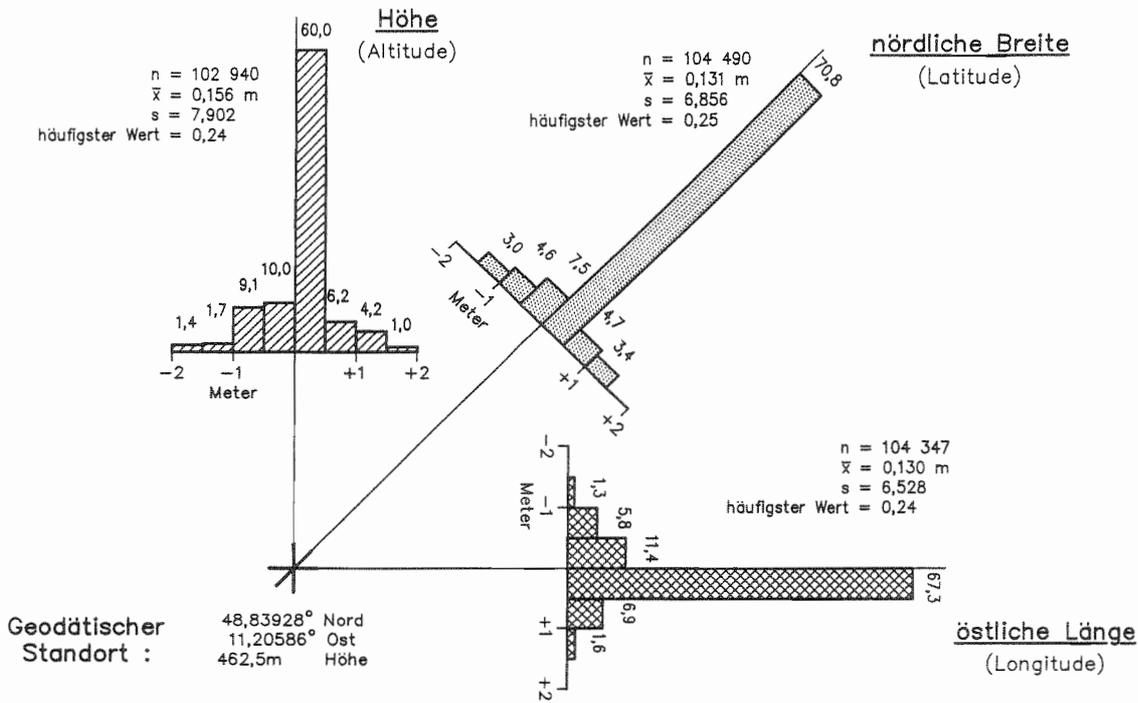


Abbildung 30: Verteilung der Positionsfehler bei DGPS ("S/A off").

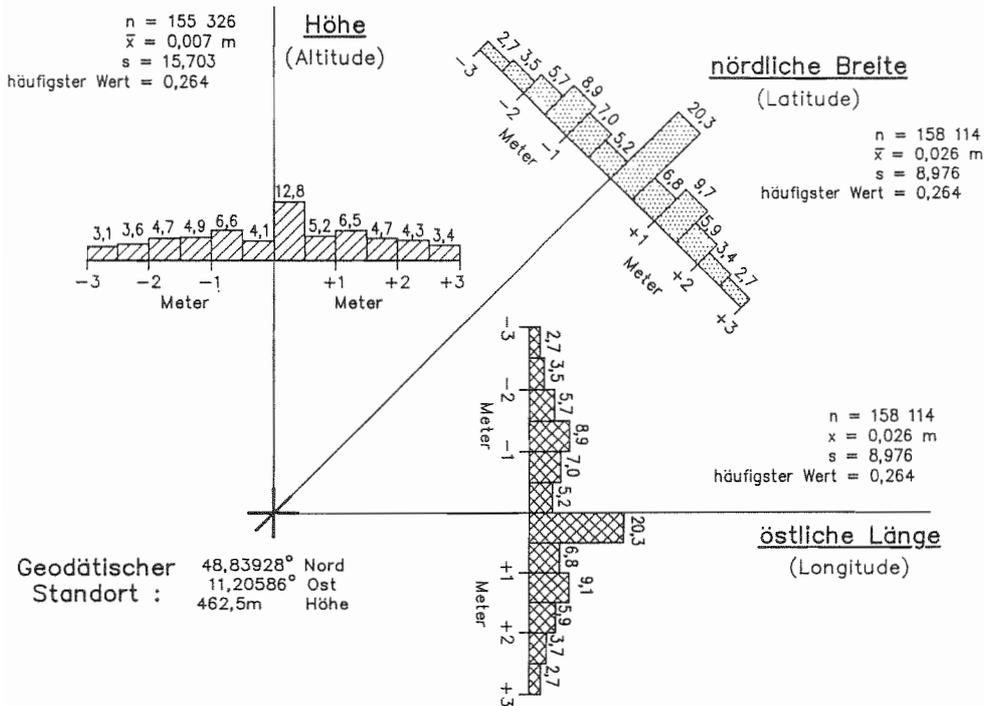


Abbildung 31: Verteilung der Positionsfehler bei DGPS ("S/A on").

Die Histogramme repräsentieren jeweils die Verteilungen der Meßwerte der einzelnen Koordinatenkomponenten (Höhe, Breite, Länge). Deutlich ist der Einfluß von S/A in der Vergrößerung der Standardabweichung zu erkennen.

Die Beschriftung bei den Histogrammen gibt die statistischen Kennzahlen (n=Umfang der Stichprobe, \bar{x} =Mittelwert, s=Standardabweichung, häufigster Wert=Median) der Verteilung wieder. Den Abbildungen liegt der auch in den Praxisversuchen verwendete Updatezyklus von 7 s zugrunde.

Da sich S/A offensichtlich vor allem in einer Vergrößerung der Varianz der Meßwerte ("Rauschen") niederschlägt, scheint die Länge des Updatezyklus für Korrekturen bei DGPS ein wesentlicher Parameter für die erreichbare Genauigkeit zu sein. Deshalb wurde in einer weiteren Simulation eine schrittweise Verkürzung des Updatezyklus von 7 s auf 1 s durchgeführt.

Tabelle 3: Simulierte Genauigkeiten bei verkürzten Updatezyklen bei DGPS.

		Update - Zyklus						
		7 s <small>derzeit genutzt</small>	6 s	5 s	4 s	3 s	2 s	1 s
Anzahl Werte		161152	161070	161008	160743	160292	158721	160697
Mindestzahl/Zyklus		3	3	3	3	3	3	1
nördl. Breite (m) (Latitude)	\bar{x}	0,05	0,04	0,04	0,05	0,08	0,14	0,11
	s	8,976	8,419	7,741	6,895	6,049	5,222	4,421
östl. Länge (m) (Longitude)	\bar{y}	0,05	0,04	0,04	0,05	0,08	0,14	0,11
	s	8,976	8,419	7,741	6,895	6,049	5,222	4,421
Höhe über NN (m) (Altitude)	\bar{z}	0,02	0,06	0,06	0,05	0,06	0,11	0,08
	s	15,703	14,805	13,505	12,003	10,357	8,785	6,868

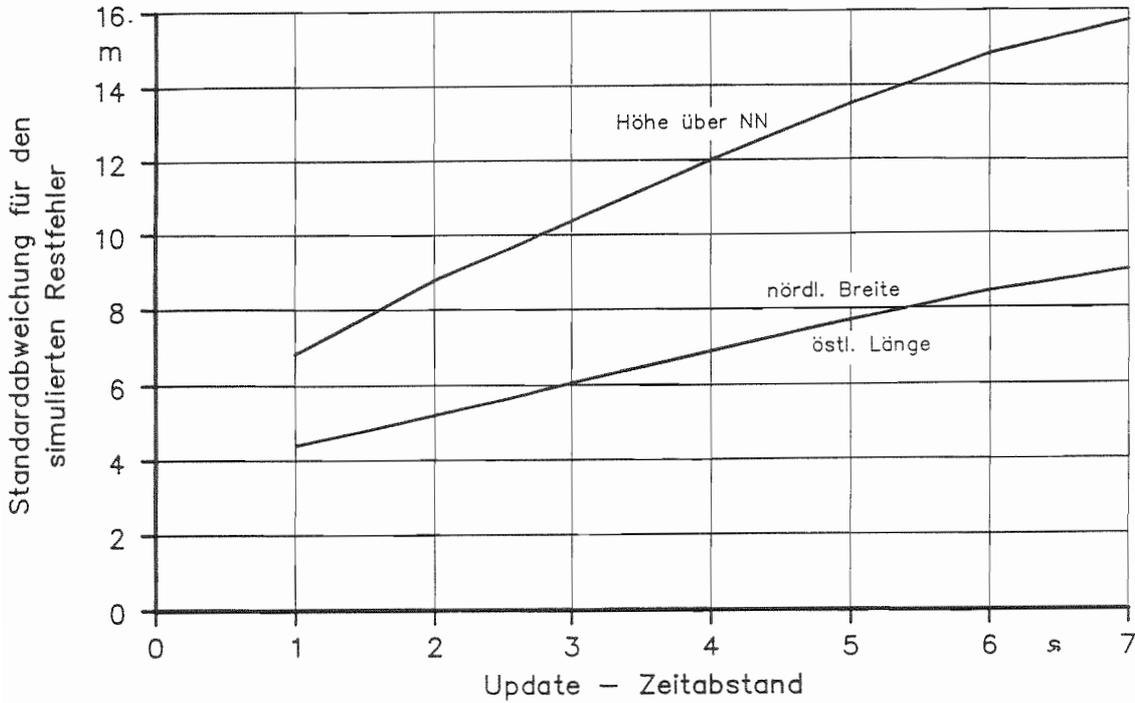
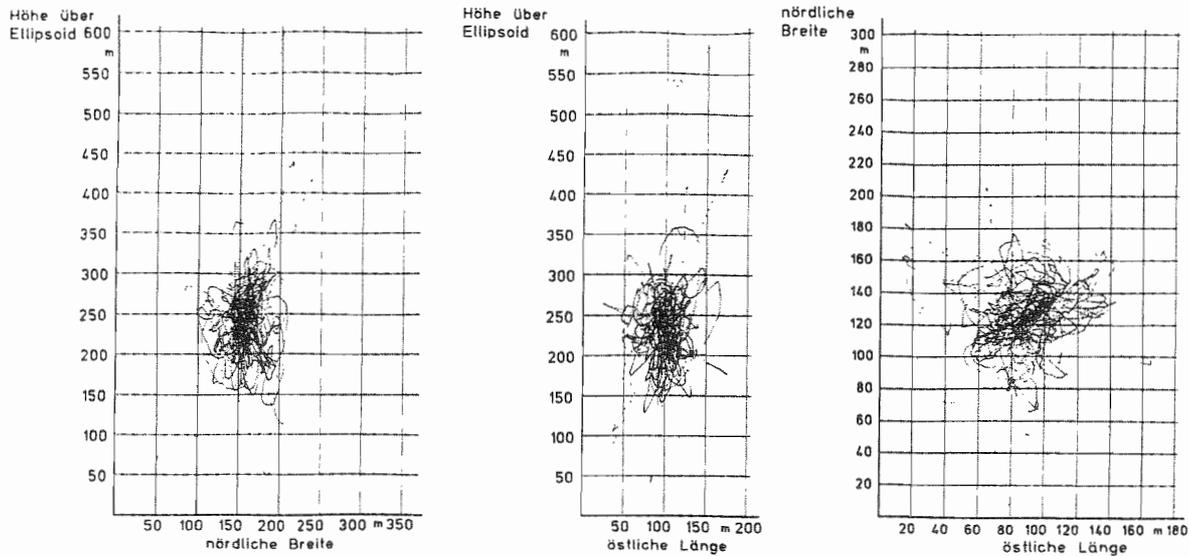


Abbildung 32: Simulierte Genauigkeiten bei verkürzten Updatezyklen bei DGPS.

Wie aus Tabelle 3 und Abbildung 32 abzulesen ist, ermöglicht die Verkürzung des Updatezyklus unter S/A eine deutliche Verringerung der Standardabweichung. Vereinfacht ausgedrückt "paßt" bei verkürzten Updatezyklen und großer Varianz der Meßgröße die Korrektur "besser", die erreichbare Ortungsgenauigkeit bei DGPS steigt, der Einfluß von S/A kann eliminiert werden.

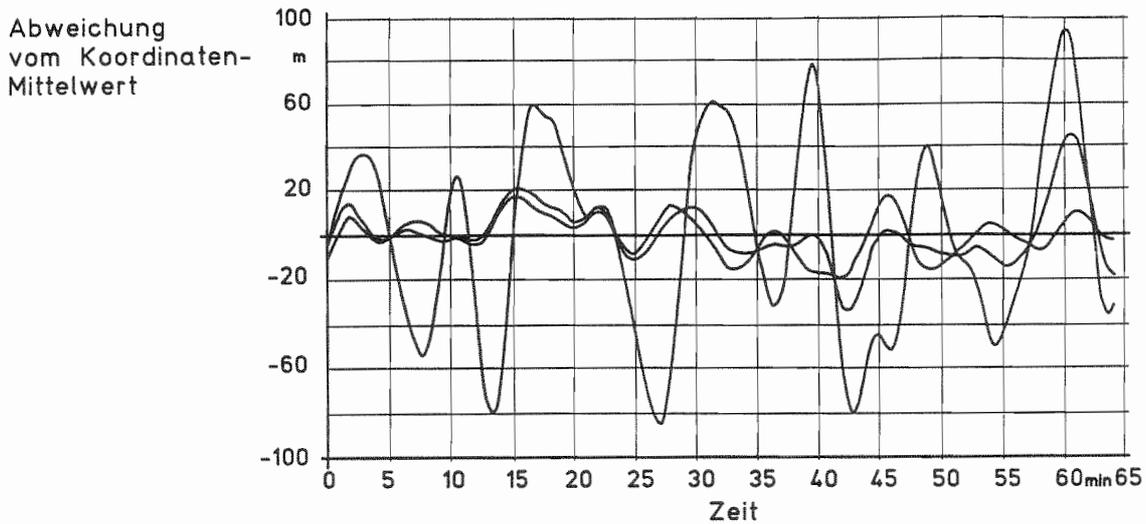


Punktbeobachtung über 8.00 h mit 7200 Einzelmessungen
18.12.1992, Gut Wittenfeld, Empfänger ASHTECH M-XII

Abbildung 33: Grafische Darstellung der Ortungsfehler von GPS unter S/A.

Abbildung 33 zeigt in drei Einzeldiagrammen, welche Spannweite die Einzelmeßwerte der Position (Breite X, Länge Y, Höhe Z) haben, wenn über 8 h ein stationärer Empfänger GPS-Messungen unter S/A-Bedingungen durchführt. Die vom Betreiber zugesicherte Genauigkeit von ± 100 m über 95% der Zeit wird auch bei der Höhenkomponente erreicht, die höhere Fehler als die beiden Komponenten Breite und Länge aufweist.

Über die Zeitachse aufgetragen ergeben sich oszillierende Fehlergraphen bei jeder Koordinatenkomponente, die den Einfluß von S/A auf die Einzelmeßwerte deutlich als überlagertes Rauschen charakterisiert (Abbildung 34). Hieraus ist deutlich abzulesen, daß das Fehlerpotential durch die S/A Maßnahmen stark mit der Zeit variiert und deshalb nur durch hohe Updateraten bei der Anwendung von DGPS eliminiert werden kann. Allerdings muß bei der Verwendung dieser Ergebnisse berücksichtigt werden, daß die Algorithmen, die zur Realisierung von S/A verwendet werden, jederzeit geändert werden können. Damit könnten zukünftig sowohl Fehlerkurven, als auch Zeitverhalten völlig anders aussehen, als in Abbildung 34 gezeigt.

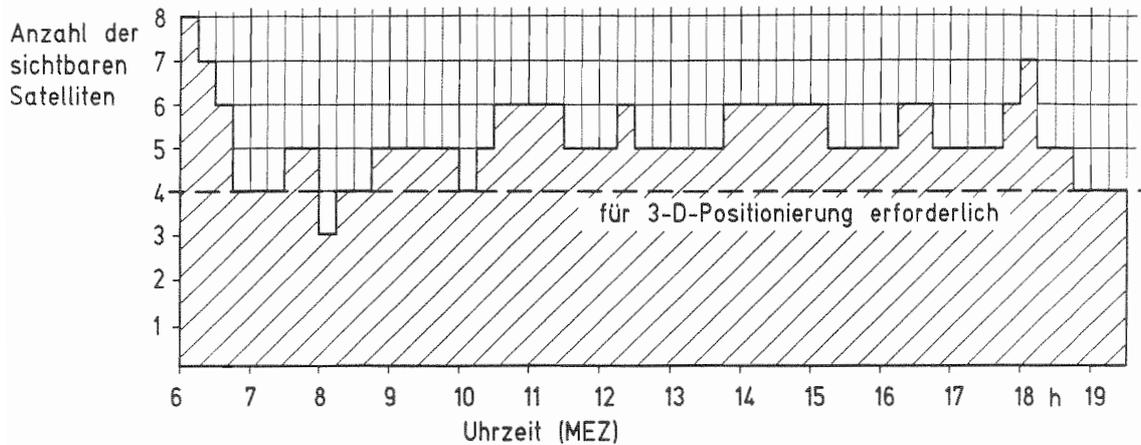


Punktbeobachtung über 65 min mit 975 Einzelmessungen; Gut Wittenfeld, 18.12.92; Empfänger ASHTECH M-XII

— Breite
— Höhe
— Länge

Abbildung 34: Fehlerkurven der Koordinatenkomponenten unter S/A.

Die am Anfang des Berichtszeitraumes noch eingeschränkte Verfügbarkeit des Raumsegmentes bei GPS (d.h. nicht alle Orbitale vollständig besetzt) führte zu mehrstündigen Zeitabschnitten während des Tages, an denen nicht die für eine vollständige 3D-Ortung mindestens notwendige Zahl von 4 Satelliten "sichtbar" (d.h. über dem Horizont = 0° Elevation) waren. Am Ende des Berichtszeitraumes ergibt sich nur noch 15 Minuten am Tag eine Situation in der weniger als 4 Satelliten höher als 15° über dem Horizont stehen, d.h. Positionsbestimmungen mit GPS sind 24 h am Tag kontinuierlich möglich. Abbildung 35 gibt eine graphische Darstellung der Anzahl verfügbarer Satelliten über die Tageszeit.



Punktbeobachtung von 6.00 h bis 19.30 h mit 12150 Einzelmessungen.
Elevationsschranke 15 Grad; 12.1.1993, Gut Wittenfeld, ASHTECH M-XII.
Stationskoordinaten 48.8393 Nord, 11.2059 Ost, Höhe 462.5 m.
21 Satelliten verfügbar: SV 2, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32.

Abbildung 35: Verfügbarkeit des Raumsegmentes bei GPS.

Im praktischen Einsatz im Frühjahr 1993 zeigte sich, daß in offenen Lagen die Signale von bis zu 12 Satelliten gleichzeitig zu empfangen waren. Diese "Überverfügbarkeit" wird von modernen Empfängern in Redundanzalgorithmen zur internen Verbesserung der Positionsbestimmung und Ausreißererkennung verwendet. Im praktischen Einsatz stellt aber auch die Entschärfung des Abschattungsproblems durch eine große Anzahl "sichtbarer" Satelliten (z.B. an Waldrändern) eine wesentliche Verbesserung für die praktische Verfügbarkeit dar.

4 Stand und Ausblick für die GPS-Nutzung

4.1 Ausbau des Raumsegmentes von GPS

Die Entwicklung des Ausbaus des Raumsegmentes von GPS läßt sich anhand von Fahrspuraufzeichnungen aus den Jahren 1990 bis 1993 nachvollziehen, wie aus Abbildung 36 hervorgeht:

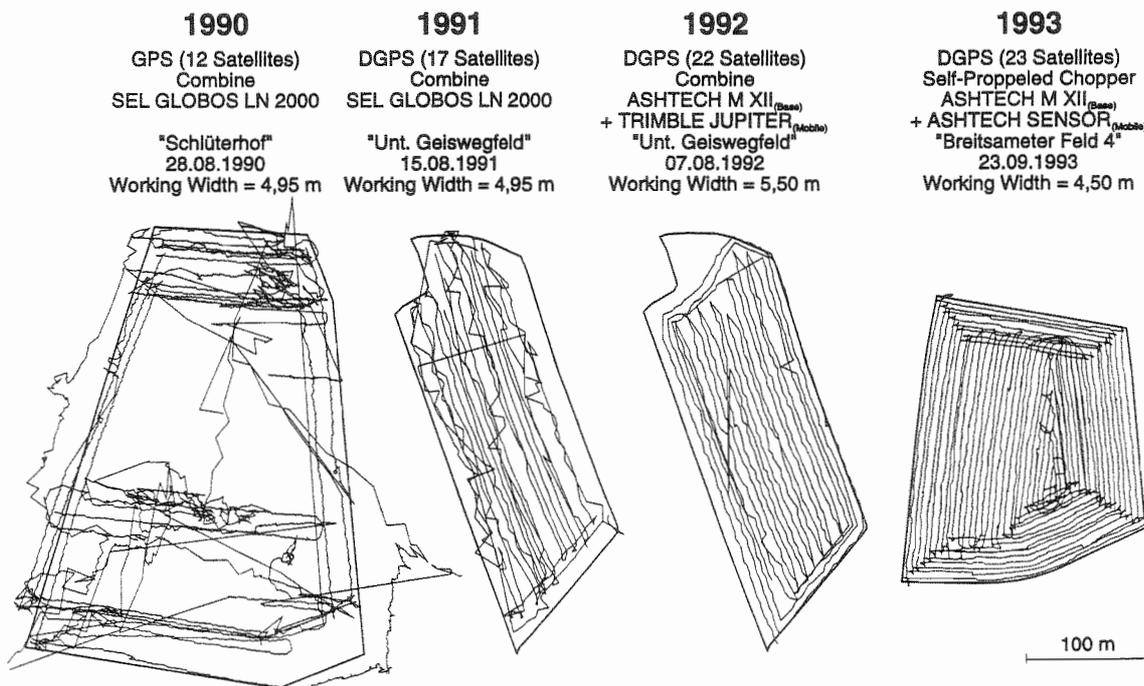


Abbildung 36: Fahrspuraufzeichnungen bei der Ertragskartierung (Mähdrescher und selbstfahrender Feldhäcksler)

1990 stand keine DGPS-Ausrüstung zur Verfügung. Vor allem aber führte der unvollständige Systemausbau mit nur 12 verfügbaren Satelliten mit entsprechend schlechten geometrischen Bedingungen zu der sehr schlechten Ortungsqualität. 1991 ergab sich bei 17 Satelliten und einem ersten DGPS-Einsatz schon eine vergleichsweise gute Positionsbestimmung, aber erst die Verwendung eines Pseudorange DGPS bei vollem Systemausbau brachte 1992 und 1993 die für Ertragskartierungen notwendige Präzision der Ortung.

Mit Übergabe des GPS im vorläufig endgültigen Ausbaustadium (IOC = Initial Operation Capability), das 21 (+3 Ersatz) Satelliten umfaßt und eine weltweite Überdeckung über 24 h ermöglicht, steht es einer Vielzahl von Nutzern in zahlreichen Anwendungen zur Verfügung. Die Tatsache, daß zusätzlich die kostenlose Nutzung für

10 Jahre (d.h. bis 2004) garantiert ist, macht dieses System zum derzeit attraktivsten Angebot unter den verfügbaren Satellitenortungssystemen. GLONASS, das russische Globale Navigations Satelliten System, hat zwar gegenüber GPS bezüglich der Genauigkeit leichte Vorteile (S/A oder ein vergleichbares Verfahren ist in diesem System nicht vorgesehen). Allerdings ist der Systemausbau noch nicht vollständig und die Nutzung ist nur mit speziellen GLONASS-Empfängern, die noch nicht in größeren Stückzahlen verfügbar sind, möglich. Zudem ist die weitere Entwicklung aufgrund der politischen Situation unsicher. Derzeitige Entwicklungsbestrebungen bei einigen Geräteherstellern gehen dahin, kombinierte Empfänger, die zum gleichzeitigen Empfang beider Systeme geeignet sind, anzubieten. Dadurch ergäbe sich die Möglichkeit eine größere Zahl von Satelliten für überbestimmte Messungen der Position zu benutzen und einen Teil der durch S/A induzierten Fehler auch ohne DGPS eliminieren zu können.

Tabelle 4 gibt einen vergleichenden Überblick über den Ausbau der Systeme GPS und GLONASS.

Tabelle 4: Aktueller Ausbau Globaler Navigations Satelliten Systeme (GNSS)

GPS - NAVSTAR		GLONASS	
NAVigation System with Time And Ranging		GLObal NAVigation Satellit System	
21 + 3	Satelliten (23 verfügbar)	24	Satelliten (15 verfügbar)
6	Bahnebenen	3	Bahnebenen
20183 km	Höhe	19100 km	Höhe
11h 56min	Umlaufzeit	11h 16min	Umlaufzeit
WGS 84	Koordinatensystem (World Geodetic System 1984)	SGS 85	Koordinatensystem (Soviet Geodetic System 1985)
Möglichkeit der Signalverschlechterung (SA; AS)		Keine Signalverschlechterung	
10 Jahre garantierte Nutzungszeit		15 Jahre garantierte Nutzungszeit	

4.2 Stand und Ausblick der DGPS-Verfahren

4.2.1 Vorgaben des Betreibers

Auch nach der offiziellen Erklärung der Operationalität von GPS (IOC = Initial Operation Capability) durch das US-Verteidigungsministerium zur Jahreswende 1993/1994, behält sich diese Behörde als Betreiber vor, ohne Ankündigung die Techniken S/A und A-S einzusetzen. Einzige Garantie für den Nutzer ist, daß im SPS bei Verwendung des C/A-Codes auf dem L1-Signal über 95 % der Zeit eine Positionsgenauigkeit von mindestens 100 m erreicht werden kann. Über die Hintergründe dieser Politik wird insbesondere nach Ende des kalten Krieges kontrovers diskutiert: Offiziell dienen S/A und A-S dazu, potentiellen Gegnern der USA die Möglichkeit zu nehmen, GPS zu präzisen Angriffen zu verwenden.

Im P-Code (PPS) steht weltweit ohne weitere Stützung eine Genauigkeit von 20 m zur Verfügung. (Ob 100 m gegenüber 20 m Fehler bei einem Angriff mit ferngelenkten Waffensystemen einen großen Unterschied machen, darf bezweifelt werden.)

Für zahlreiche Anwendungen - eben auch diejenigen in der Landwirtschaft - wäre allerdings auch eine Genauigkeit von 10 m nicht ausreichend. Die Benutzung von differentiellen GPS-Verfahren ist deshalb ausdrücklich vom Betreiber genehmigt. Einzige Einschränkung: Bei einem Krisenfall müssen auf Anordnung des Betreibers alle Referenzstationen, die Korrekturdaten aussenden können, außer Betrieb genommen werden.

4.2.2 Der Einsatz von Postprocessing-DGPS

Bei allen Einsätzen, wo die korrigierte hochgenaue Position nicht sofort benötigt wird, empfiehlt sich die Anwendung von Postprocessing-Verfahren (zeitversetzte Verrechnung der Rohmeßwerte mit den Korrekturdaten einer Referenzstation).

Die Vorteile der Anwendung von Postprocessing-Verfahren sind:

- keine Telemetrie zur Datenübertragung erforderlich
- zeitversetzte Verarbeitung ermöglicht auch Verwendung komplexer Algorithmen (höhere mögliche Genauigkeit)

Als Nachteil ergibt sich jedoch der notwendige Speicher- und Verarbeitungsbedarf für die Meßwerte, die bei der Mobil- und bei der Referenzstation anfallen. Fehlende Standards für die verwendeten Datenformate stellen weitere Probleme dar.

Damit empfehlen sich Postprocessingverfahren für folgende Aufgaben

- Dokumentation („Fahrtenschreiber“, Arbeitszeiterfassung)
- Datenerfassung (Feldaufmaß, Bodenprobennahme, Ertragskartierung)

4.2.3 Der Einsatz von Echtzeit-DGPS

Für die Anwendungen, die die präzise Position für selbständige Steuerungsmaßnahmen sofort auf dem Fahrzeug oder in einer Zentrale benötigen, müssen dagegen Echtzeit-Verfahren zur Positionskorrektur angewendet werden.

Die Vorteile von Echtzeit-DGPS sind:

- Korrigierte Position steht sofort im Fahrzeug oder in einer Zentrale zur Verfügung
- Keinerlei Speicherung von intermediären Meßdaten notwendig
- Eine Referenzstation kann für beliebig viele Nutzer arbeiten (im Postprocessing nur theoretisch möglich, da die aufgezeichneten Daten jedem Nutzer zur Verfügung gestellt werden müssen).

Nachteilig ist allenfalls, daß die erreichbare Genauigkeit unter Praxisbedingungen nicht ganz das Niveau von Postprocessinglösungen erreicht, da die Algorithmen i.d.R. im Mobilempfänger abgearbeitet werden. Die benötigte Telemetrieeinrichtung muß bestimmten Anforderungen entsprechen, die in 4.2.4 näher erörtert werden, stellt aber potentiell einen Beitrag zum sog. Elektrosmog dar. Heute sind fast alle GPS-Empfänger für den Echtzeit-GPS-Betrieb ausgerüstet.

Echtzeit-DGPS ist für alle mobilen Steuerungs-, Ortungs- und Navigationsaufgaben mit höheren Genauigkeitsforderungen als sie mit dem SPS erfüllt werden können, geeignet. Insbesondere gilt dies für:

- Fahrzeugführung (Probenpunkte bei der Bodenbeprobung können exakt angesteuert werden, Pflanzenschutz- und Düngungsfahrzeuge können an den Ort lokalen Bedarfs geführt werden, usw.)
- Maschinensteuerung (Prozeßsteuerung beliebiger Art in Abhängigkeit der Position)
- Datenerfassung und Dokumentation (wie unter 4.2.2, jedoch mit Einschränkung für das Feldaufmaß: Besonders am Feldrand können ungünstige Empfangssituationen (Wald, Gebäude, Verkehrswege) auftreten, deren Fehlerpotential im Postprocessing besser beherrscht werden kann).

4.2.4 Die Verfügbarkeit von Echtzeit-DGPS Korrekturdaten

Die Erzeugung von Echtzeit-DGPS Korrekturdaten erfolgt in speziell ausgerüsteten, i.d.R. hochwertigen GPS-Empfängern. Die Daten werden aus Messungen zu möglichst vielen Satelliten gewonnen. Das heute vorherrschende Verfahren der Korrektur ist das Pseudorange-Korrektur Verfahren, das die systematischen Fehler der GPS-Messung auf eine Korrektur für die Pseudoentfernung zwischen dem Empfänger und dem jeweiligen Satelliten zurückführt. Deshalb ist es notwendig, daß die Referenzstation „freie Sicht“ zu allen Satelliten über dem Horizont hat. Nur dann ist ausgeschlossen, daß ein mobiler Empfänger Satelliten empfängt, deren zugehöriges Meßergebnis nicht korrigiert werden kann, weil dazu keine Korrekturinformation verfügbar ist. Der Referenzempfänger muß über mindestens 8 Kanäle (die unabhängig von einander die Daten je eines Satelliten verarbeiten) verfügen, um die notwendige Kapazität für diese Aufgabe zur Verfügung zu stellen.

Die errechneten Korrekturen werden dann über eine serielle Schnittstelle und ein Modem an eine Datenfunkstrecke übergeben, die für eine Ausstrahlung dieser Information sorgt.

Wie bereits erwähnt kann auf diese Weise eine unbegrenzte Anzahl von Anwendern dieses Signal benutzen. Die Korrekturinformation ist bei der beschriebenen Anordnung für einen Radius von etwa 300 km um die Referenzstation gültig. Wird die Korrekturinformation über mehrere vernetzte Referenzempfänger errechnet und verarbeitet, ist es auch möglich, dieselben Korrekturen in sehr viel größeren Gebieten zu verwenden und beispielsweise über Kommunikationssatelliten auszustrahlen.

Diese Infrastruktur ist derzeit in der Bundesrepublik Deutschland jedoch noch nicht flächendeckend realisiert. Deshalb greifen die heutigen DGPS-Anwender ausschließlich auf betriebs- oder unternehmenseigene Referenzanlagen zurück, obwohl der Investitionsaufwand (ca. 20.000 DM) nicht unerheblich ist. Der Grund dafür liegt vor allem darin, daß fernmelderechtliche und technische Gründe kaum Datenfunkstrecken mit großen Reichweiten ermöglichen, und deshalb nur betriebliche Lösungen möglich sind. Im nichtöffentlichen mobilen Landfunk werden maximal 6 W Sendeleistung genehmigt, die über Land eine Reichweite von 10-30 km ermöglichen. Die Genehmigungsverfahren sind aber nur bei ausreichender Verfügbarkeit freier Frequenzen möglich. Genehmigungsfrei, aber anmeldepflichtig sind dagegen Fern-

wirksender geringer Leistung, die aber maximal 50 mW Sendeleistung aufweisen dürfen: Die maximale Reichweite liegt damit bei 1-3 km und erfordert i.d.R. eine mobile Referenzstation, die am jeweiligen Einsatzort aufgestellt werden muß.

Diese einzelbetrieblichen Verfahren stellen eine Übergangslösung dar, weil

- der Investitionsbedarf hoch (zu hoch für kleinere und mittlere Betriebe) ist,
- der Bedarf an Wissen zur Wartung und zum Betrieb einer Referenzstation hoch ist,
- die Reichweite der Datenfunkstrecke zu gering, bzw. bei höheren Sendeleistungen die Anzahl der verfügbaren Frequenzen zu niedrig ist (insbesondere bei einer steigenden Zahl von Nutzern).

Bestehende Funknetze, auf denen Daten übertragen werden können, sind:

- Bündelfunk (z.B. Chekker, Servicekanal)
- Modacom (dediziertes Datenfunknetz mit Datex-P Anschluß)
- GSM-Netze (D-Netz Telefon, Sprach-, Daten-, Service-Kanal)

Diese bestehenden Infrastrukturen sind aus folgenden Gründen eher ungeeignet DGPS-Korrekturen zu übertragen:

- Verfügbarkeit der Netze in ländlichen Gebieten ist schlecht
- Zwei-Wege-Kommunikation begrenzt Anzahl der Nutzer
- Schlechtes Zeitverhalten (Verbindungsaufbau)
- Betriebskosten sind hoch (siehe Abbildung 37)

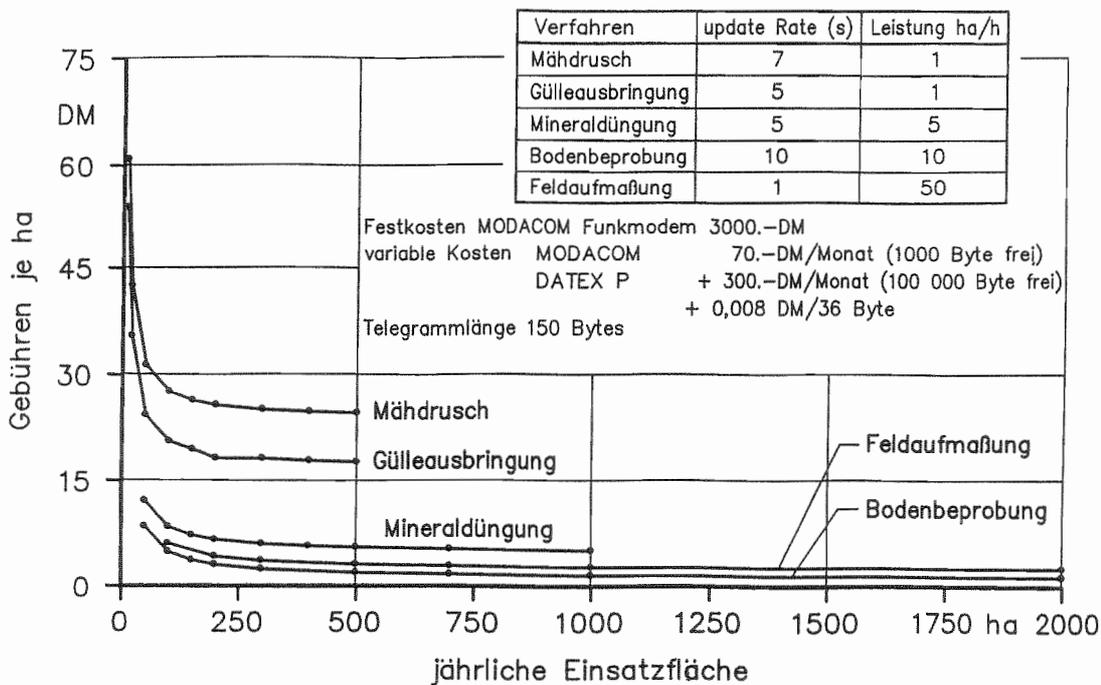


Abbildung 37: Gebühren für die DGPS-Korrekturdatenübertragung mit MODACOM/DATEX P.

Da für die Verbreitung der DGPS-Korrekturen möglichst weitreichende Träger benötigt werden und keine Zwei-Wege-Kommunikation notwendig ist, liegt die Übertragung einer solchen Information über Rundfunkstationen nahe.

In Nordrhein-Westfalen sendet der WDR in Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt Bonn bereits seit mehreren Jahren DGPS-Korrekturen über das RDS (Radio Data System) für Versuche aus. RDS ist ein Protokoll, das die Übertragung von digitalen Daten mit Rundfunkprogrammen ermöglicht.

In Schweden ist in diesem Jahr offiziell ein Service in Betrieb gegangen, der ebenfalls DGPS-Korrekturen über RDS überträgt. Der potentielle Nutzer kauft vom Netzbetreiber einen entsprechenden Dekoder (oder einen GPS-Empfänger mit integriertem Dekoder) und wird nach Zahlung der jährlichen Nutzungsgebühr über diesen RDS-Kanal als „Hörer“ freigeschaltet. Die Nutzungsgebühr liegt je nach Genauigkeitsanforderung zwischen 100 und 800 US \$ je Jahr. Der Dekoder liefert die Korrekturdaten im standardisierten RTCM104 (V2.0) Format, so daß auch beliebige Empfänger von Drittanbietern verwendet werden können.

Für andere europäische Länder (darunter auch die Bundesrepublik Deutschland) sind ähnliche Entwicklungen im Gang.

Die derzeit einzige kostenlos benutzbare und offiziell betriebene Quelle für DGPS-Korrekturinformationen sind weitreichende Sender (sog. „Beacons“) im Bereich der Nord- und Ostseeküsten. Diese strahlen mit einer Datenrate von 50 bis 300 Bit/s ein ebenfalls kodiertes Korrekturssignal ab, das mit sog. „Beacon-Receiver“ decodiert und im RTCM104 (V2.0) Format an übliche GPS-Empfänger übergeben werden kann. Diese Signale sind im Bereich der Küsten auch an Land empfangbar, die erreichbare Genauigkeit ist aber wegen der geringen Datenrate und der daraus resultierenden kleinen Updaterate auf etwa 5-10 m begrenzt.

Als Alternativen für eine flächendeckende Verbreitung der DGPS-Korrekturen, ist die Ausstrahlung eines Korrektursignals möglich über:

- Kommunikationssatelliten
- dedizierte Kommunikationsnetzwerke speziell für ländliche Gebiete (kleine Sendeleistungen, aber Sender- / Repeaterkombinationen)
- das AM-Data System (vergleichbar RDS, aber für amplitudenmodulierte Sender mit großer Reichweite)

Diese Systeme berücksichtigen insbesondere die Versorgung ländlicher Räume und sind in den USA bereits in Betrieb.

4.3 Europäische Initiativen zum GPS

Bedingt durch die zunehmenden Verkehrsströme im dichtbesiedelten Europa wird innerhalb der EU über die Nutzung eines eigenen „Global Satellite Navigation System (GNSS)“ nachgedacht und diskutiert. Im Gegensatz zu GPS und GLONASS ist dabei an eine ausschließlich zivile Nutzung gedacht, welche schon in der einfachen Nutzung eine Genauigkeit $\leq \pm 10$ m erreichen soll. Über differentielle Nutzung wäre damit eine Genauigkeit $\leq \pm 10$ cm im dynamischen Einsatz erreichbar. Derzeit erstellen die europäischen Länder spezifische Nutzeranforderungen in sogenannten nationalen Satelliten-Navigations-Plänen.

Der „Deutsche Satelliten Navigations Plan (DSNP)“ wurde von November 1993 bis Juli 1994 im Auftrag des „Bundesministeriums für Verkehr (BMV)“ über die „Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON)“ erstellt. Die spezifischen Anforderungen werden darin für die Bereiche Land-, Luft- und Seeverkehr dokumentiert. Innerhalb des Bereiches Landverkehr finden sich darin auch die Belange der Landwirtschaft wieder (Tabelle 5).

Tabelle 5: Systemanforderungen der Land- und Forstwirtschaft

Aufgabe	Anwendung	Genauigkeit [m]	Verfügbarkeit		tolerierb. Abschatt. [s]	Ortungs- intervall [s]
			Raum [dim]	Zeit [%]		
Ortung für Information und Dokumentation						
- Ausbringmengenüberwachung		5 - 10	2	99	5	3
- Erntemengenüberwachung		2 - 5	2	99	5	3
- Maschineneinsatzüberwachung		2 - 5	2	99,9	5	3
- Flächeninventur		0,5 - 1	3	99,9	<1	1
Ortung für lokale Steuerungsmaßnahmen						
- lokale Applikationsmaßnahmen		2 - 5	2	99	5	3
- technische Schutzmaßnahmen		1 - 2	3	99,9	<1	1
- Umweltschutzmaßnahmen		1 - 2	3	99,9	300	3
Navigation von Einzelfahrzeugen						
- Zielsuche im Feld		0,5 - 1	2	99	300	1
- Fahrzeugführung		0,05-0,1	2	99,9	<1	1
- Geräteführung		0,02-0,05	2	99,9	<1	1
Navigation von Fahrzeuggruppen						
- Zielsuche auf Feldwegen		10 - 20	2	98	300	3
- Flottenmanagement		50 - 100	2	98	300	>600
- Trabantenfahrzeuge		0,05 - 0,10	3	99,9	<1	1
- Feldroboter		0,05 - 0,10	3	99,9	<1	1

Die Einbringung des DSNP in die EU ist zum Jahresende 1994 vorgesehen. Es ist zu erwarten, daß damit noch vor Ablauf der zugesagten kostenfreien Nutzung von GPS ein zuverlässiges und hochpräzises Nachfolgesystem zur Nutzung zur Verfügung steht. Damit sind die heutigen Entwicklungen für die Anwendung von Satellitenortungsverfahren im Hinblick auf ihre zukünftigen Einsatzmöglichkeiten sehr gut abgesichert.

5 Ortung in der pflanzlichen Produktion

Im traditionellen Pflanzenbau stellt der Schlag die kleinste Einheit dar, auf die Optimierungsmaßnahmen ausgerichtet werden. Durch die Einführung der Möglichkeit einer exakten Ortung, mit deren Hilfe jederzeit und kontinuierlich die Position eines Fahrzeuges auch innerhalb des Schlages bestimmt werden kann, lassen sich nun Teilflächen ansprechen, deren Größe nach unten nur durch die Auflösung des Ortungsverfahrens begrenzt ist. Abbildung 38 zeigt die Ortung als Schlüsseltechnik in der rechnergestützten Pflanzenproduktion.

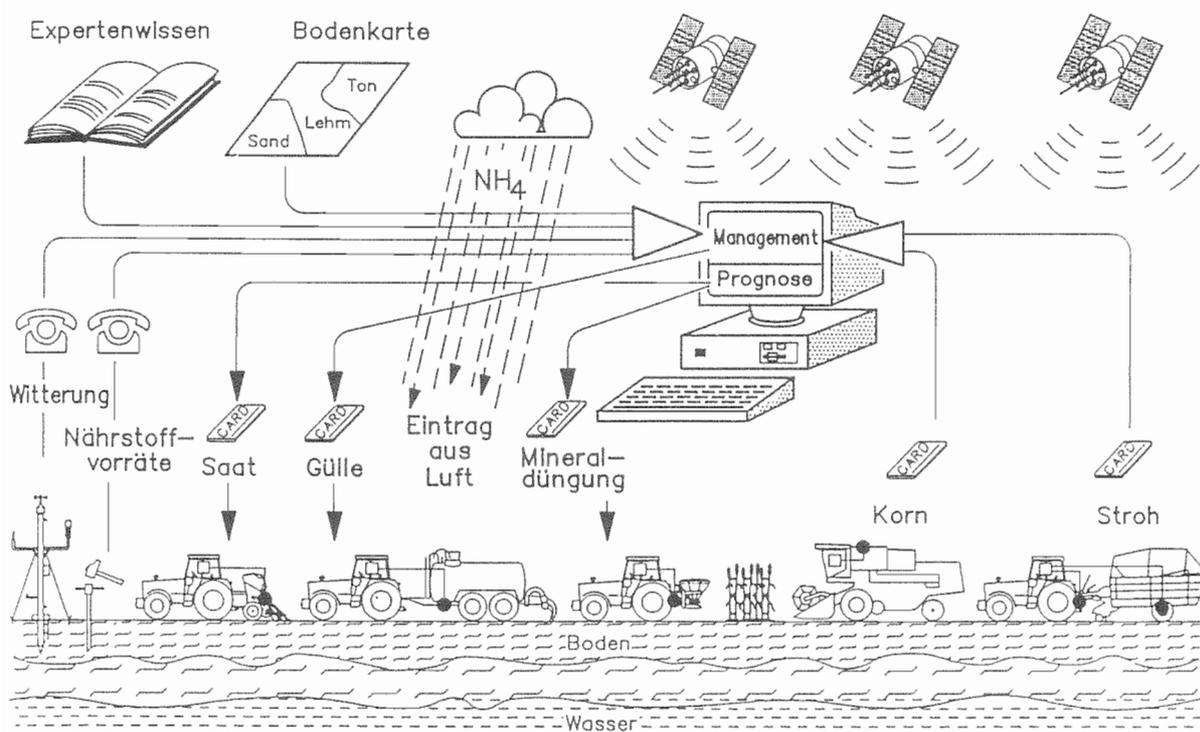


Abbildung 38: Rechnergestützte Pflanzenproduktion

5.1 Lokale Erfassung von Eingabegrößen für die Planung

Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen orientieren sich immer an den natürlichen (wenn auch zum Teil unter menschlichem Einfluß veränderten) Ertragsvoraussetzungen, die ganz wesentlich durch den Boden und seine Eigenschaften bestimmt werden. Die Erfassung der Bodenparameter bildet daher die Grundlage der ökonomischen und ökologischen Optimierung der Pflanzenproduktion. Während bisher die Beprobung des Bodens im landwirtschaftlichen Betrieb nur auf den jeweiligen Schlag bezogene Mittelwerte des untersuchten Parameters lieferte, läßt sich in Verbindung mit den untersuchten Ortungsverfahren auch die Position der Probenahme bestimm-

men und damit als zusätzliches Datum in die Analyse des gewonnenen Datenmaterials einführen. Abbildung 39 zeigt Kartierungen des Nährstoffs Phosphat und des pH-Wertes, denen über DGPS georeferenzierte Bodenproben zu Grunde liegen.

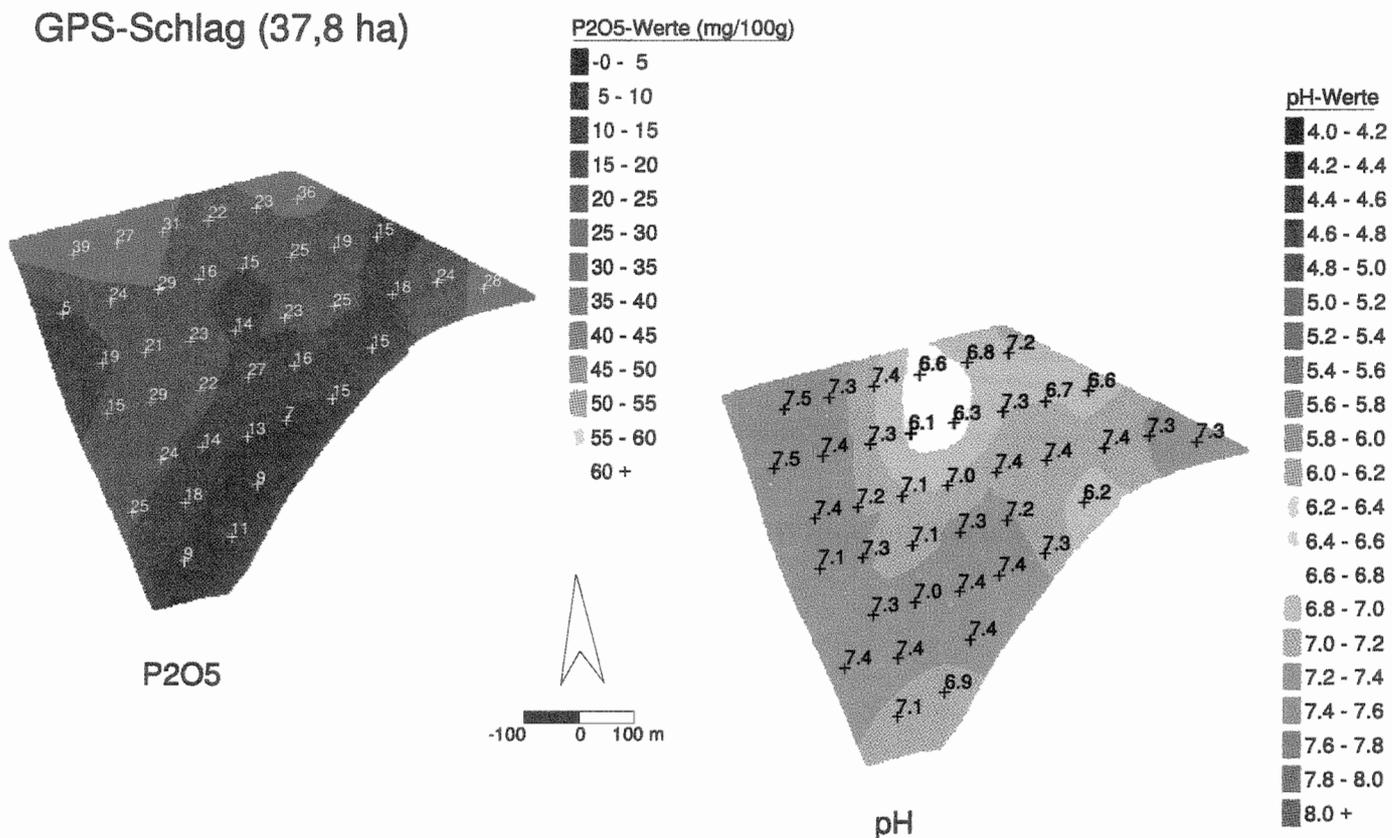
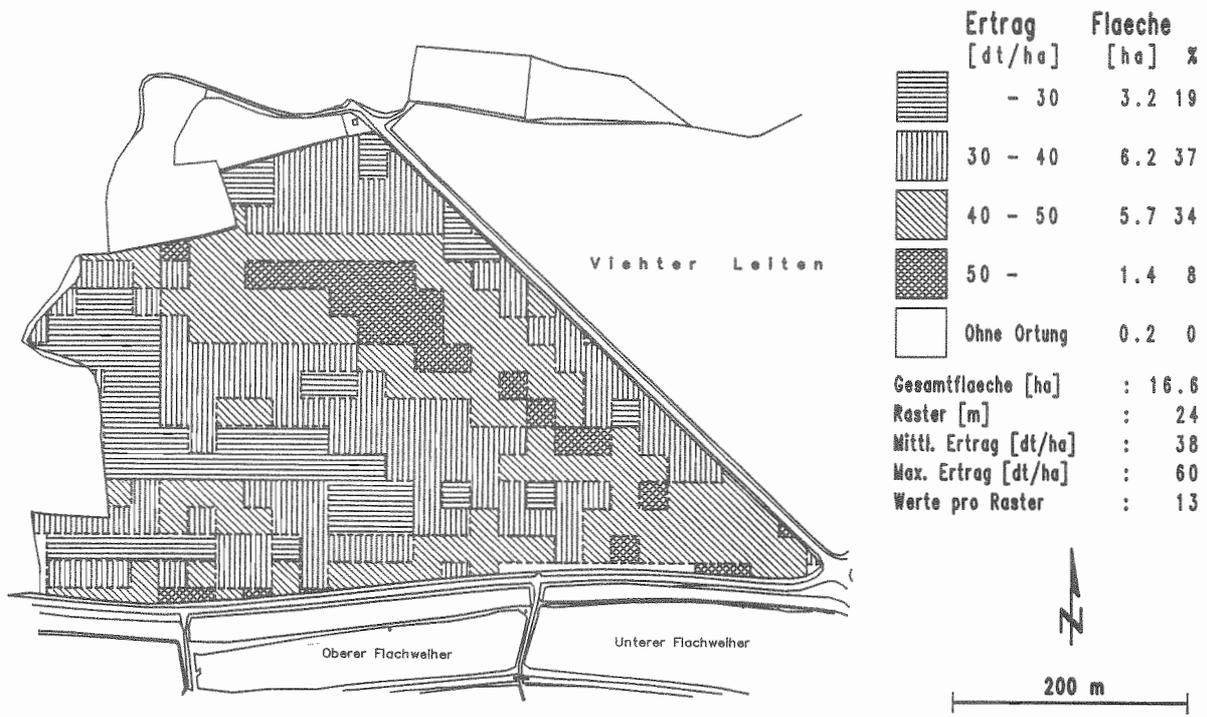


Abbildung 39: Kartierung des Nährstoffes Phosphat und des pH-Wertes.

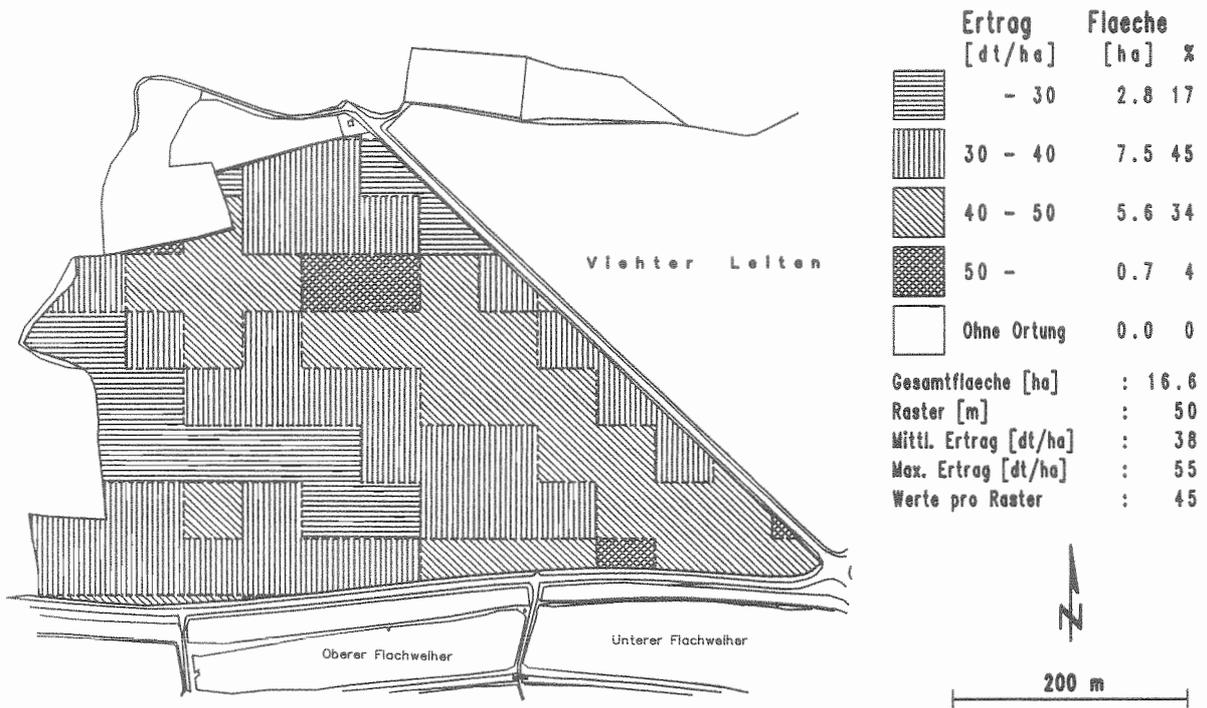
Gleiches gilt für die Erfassung des Ertrages: Der traditionellen summarischen Ertragsermittlung je Schlag steht durch die Ortung die Möglichkeit einer lokalen Ertragsermittlung (wie am Beispiel des Mähdruschs bereits mehrjährig im FAM-Projekt durchgeführt) gegenüber. Abbildung 40 und Abbildung 41 stellen die Ergebnisse in Form von Ertragskarten dar, wobei erkennbar ist, daß die räumliche Auflösung solcher Kartierungen mit zunehmender Rastergröße abnimmt. In beiden Fällen handelt es sich um dasselbe Datenmaterial.

Neue Sensorsysteme werden in Zukunft auch die lokale Ermittlung von Hackfrucht, Stroh- und Grünfüttererträgen ermöglichen. Abbildung 42 zeigt eine entsprechende Darstellung der Erträge von Stroh aus dem Erntejahr 1992.



Erstellt mit ARC/INFO am 29.06.1993

Abbildung 40: Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" 1992 (24 m - Raster).



Erstellt mit ARC/INFO am 28.06.1993

Abbildung 41: Ertragskarte Scheyern "Flachfeld" 1992 (50 m - Raster).

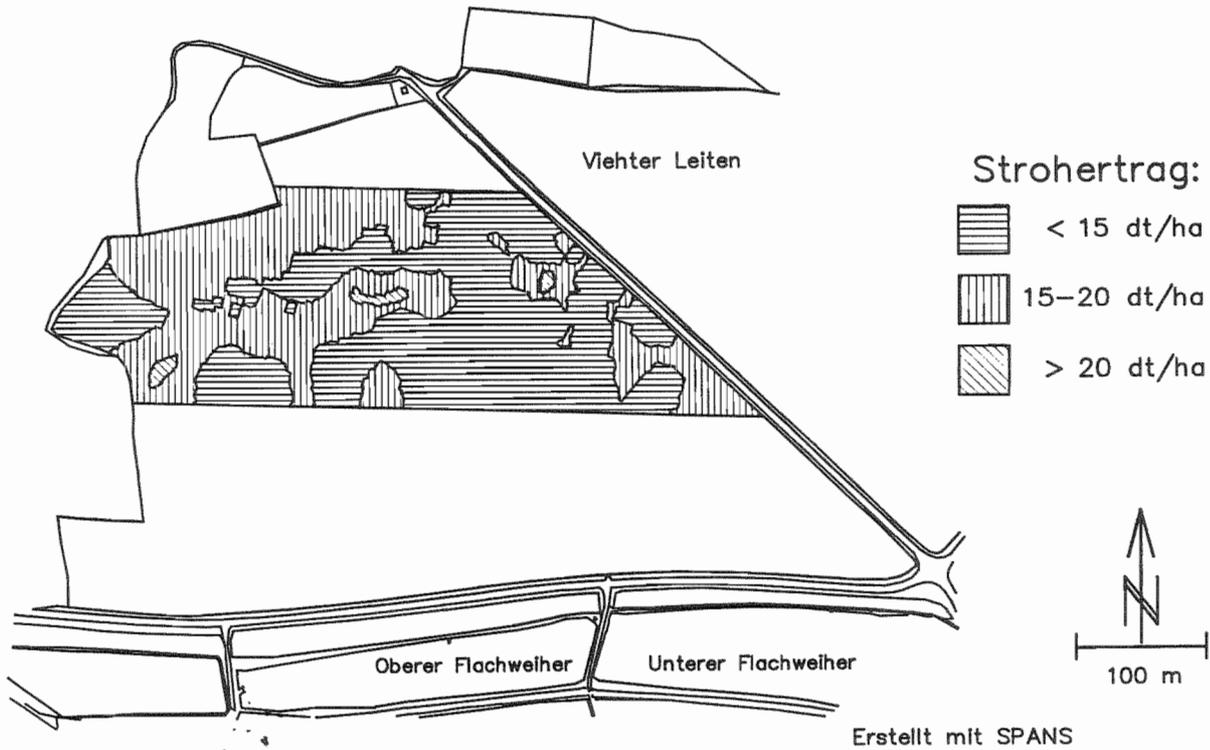


Abbildung 42: Strohertrag Flachfeld (Scheyern, August 1992).

Damit ist schon heute die Möglichkeit gegeben, bestehende Planungsstrategien auf Teile eines Schlages anzuwenden und damit der örtlichen Variabilität der Ertragsvoraussetzungen Rechnung zu tragen.

Außerdem werden durch verbesserte Sensortechnik und die zunehmende Verfügbarkeit ortsbezogener (georeferenzierter) Daten in Zukunft wesentlich detailliertere Modelle entstehen, deren Anwendung die einzige Möglichkeit darstellen wird, den veränderten ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft Rechnung zu tragen. Tabelle 6 zeigt eine Darstellung der Zeitanteile für verschiedene Arbeitsvorgänge, die aus GPS-Aufzeichnungen im Rahmen der Ertragskartierung hervorgegangen ist.

Tabelle 6: Automatisierte Erfassung der Arbeitszeit.

Schlag	Fläche ha	Gesamtzeit Std:Min	Anteil (%) an der Gesamtzeit			
			Drusch	KT Entleer.	Leerfahrten	Stillstand
Kehrfeld	25.5	9:56	63.05	6.33	13.00	17.30
Flachfeld	16.6	6:54	72.69	6.10	13.71	7.49
Unteres Hohlfeld	9.9	3:20	62.44	7.58	22.07	7.83
Eulenwies	5.3	2:14	67.37	6.62	19.37	6.58
Unteres Geiswegfeld	3.4	1:25	70.51	7.27	16.66	5.57
Oberes Geiswegfeld	3.3	1:33	68.76	7.58	21.60	2.05
Heubruich	3.1	1:30	71.08	6.09	16.84	5.70
Hopfungarten	2.1	1:02	65.96	4.70	25.04	4.29
Mittelwert (Ohne Kehrfeld und Unteres Hohlfeld)			69.40	6.37	18.87	5.28

5.2 Umsetzung von Planungsdaten in der Pflanzenproduktion

Düngermenge, Düngermischung, Düngerart werden üblicherweise ebenso wie Sorte und Saatstärke aufgrund der erfaßten Daten eines Schlages für den gesamten Schlag festgelegt.

Liegen aber durch die Anwendung von Ortungsverfahren bei der Datenerhebung (siehe 5.1) georeferenzierte Daten vor, und sind die angewendeten Planungsstrategien in der Lage, lokale Variabilitäten zu berücksichtigen, dann müssen auch die Eingangs genannten Parameter lokal variiert werden. D.h. beim Beispiel Düngung müssen sowohl Menge, als auch Mischung der Düngemittel mit der Position verändert werden. Bei diesem Schritt kommt neben der eigentlichen Technik zur Ausbringung wieder der Ortung des Fahrzeugs die Schlüsselrolle zu: Über die Position werden die für den jeweiligen Ort geplanten Solldaten referenziert und am Ausbringergerät eingestellt (ortsbezogene Steuerung). In gleicher Weise könnten Sorte und Saatstärke bei der Aussaat an die lokalen Bedingungen angepaßt werden.

Um eine flächendeckende Anwendung dieser auf die Schonung natürlicher Ressourcen ausgerichteten Bewirtschaftungsstrategie für landwirtschaftliche Flächen zu erreichen, muß sich die Technik sowohl im Grünland-, als auch im Marktfruchtbetrieb einführen lassen. Darüberhinaus sollten die neuen Verfahren nicht nur im Großbetrieb, sondern auch in der überbetriebliche Maschinenverwendung realisierbar sein.

5.2.1 Anwendung der Ortungsverfahren im landwirtschaftlichen Betrieb

Derzeit ist großen, arrondierten Betrieben mit geringer Flächenfluktuation am ehesten zur Einrichtung eines betrieblichen DGPS-gestützten Ortungsverfahrens zu raten. Diese Betriebe sollten gute Aussichten haben, funktechnische Genehmigungsverfahren so erfolgreich abzuwickeln, daß sie eine betriebsweite Aussendung des DGPS-Korrektur Signals erreichen. Sie können aufgrund des Betriebsumsatzes ein derartiges System, das aufgrund der dynamischen Entwicklung in nur 3-5 Jahren abgeschrieben werden muß, amortisieren. Schließlich sind diese Betriebe in der Lage, vorhandenes Personal für die Überwachung eines solchen Systems zu schulen und damit die erfaßten Daten im Entscheidungsprozeß gewinnbringend einzusetzen. Wesentliche Anwendungen sind dabei zunächst die Dokumentation der durchgeführten Applikationsarbeiten nach Ort, Menge und Zeit, sowie die Inventur über Bodenbeprobung, Bonitur und Ertragskartierung. Erst später werden sich dann auf diese Daten aufbauend und mit weiterentwickelter Technik lokal variierende Dünge- und Pflanzenschutzverfahren erfolgreich realisieren lassen. Weiterentwickelte Schlagkarten (besser als „Geografische Informationssysteme Landwirtschaft“ bezeichnet) werden zusammen mit weiter verbesserter Ortungstechnik schon in kurzer Zeit zu einer ökonomisch und ökologisch effektiven Nutzung der Information „Ort“ beitragen.

5.2.2 Anwendung der Ortungsverfahren in der überbetrieblichen Maschinenverwendung (ÜMV)

Für alle anderen Betriebe muß dagegen auf die überbetriebliche Nutzung übergegangen werden. Entsprechend der unterschiedlichen Verbreitung sollen die Einsatzmöglichkeiten bei Maschinenringen und Lohnunternehmern besonders erwähnt und dargestellt werden.

5.2.2.1 Maschinenringe

Die Organisation eines rechnergestützten Pflanzenbaus mit der Ortung als wesentlicher neuer Komponente wird für die Maschinenringe gleichzeitig Herausforderung und Chance sein: Da der Maschinenring als Organisation selbst nicht aktiv werden kann, muß dafür gesorgt werden, daß einzelne Mitglieder gänzlich neue Aufgaben übernehmen und dieses Engagement von den anderen Mitgliedern unterstützt und genutzt wird (Abbildung 43).

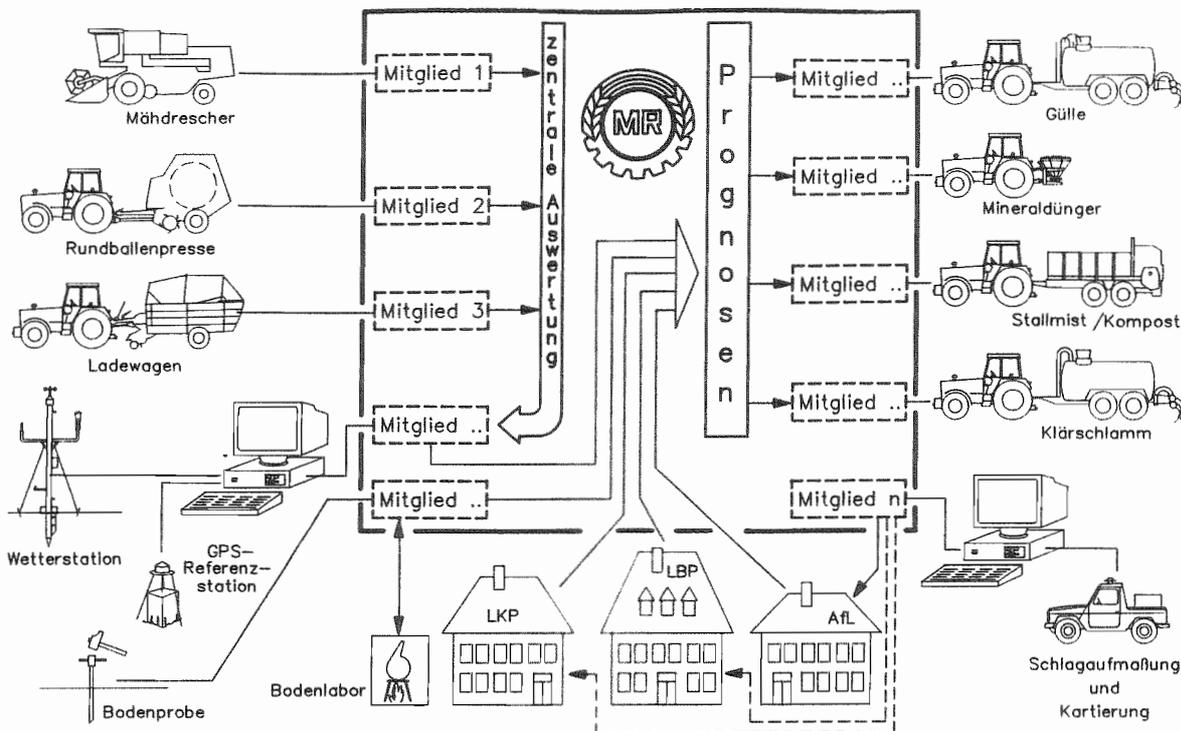


Abbildung 43: Organisation der rechnergestützten Düngung über den Maschinenring

Die neuen Leistungen werden z.T. in Form völlig neuer Aufgaben erbracht (Datenerfassung, -auswertung und Empfehlung, Schlagaufmaß und Kartierung). Aber auch konventionelle Leistungen (z.B. Mähdrusch, Futterernte, Schlammausbringung) werden durch die Anwendung von Ortungsverfahren und automatischer Datenerfassung aufgewertet (Ertragskartierung im Getreide- und Futterbau), Arbeitsdokumentation nach Ort, Menge, Zeit) und mit neuen Schwerpunkten versehen.

5.2.2.2 Lohnunternehmen

Lohnunternehmen haben dagegen den Vorteil die Übernahme eigener Leistungen und Vergabe von Teilleistungen an Vertragspartner allein nach ihren eigenen Fähigkeiten, ihrer Ausstattung mit Arbeitskraft und Gerät und den Anforderungen ihrer

Auftragsnehmer aufzuteilen. Durch den Entscheidungsprozeß im eigenen Unternehmen kann somit die Organisation eines rechnergesteuerten Pflanzenbaus schneller und mit weniger unternehmerischem Risiko realisiert werden.

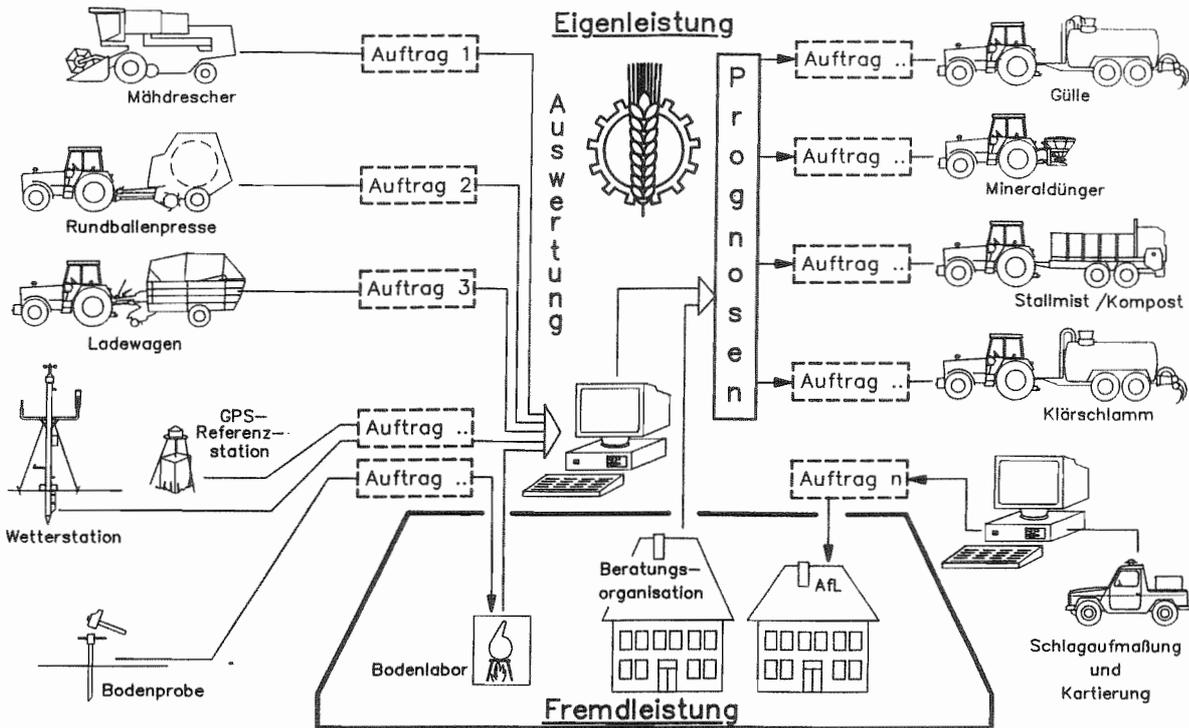


Abbildung 44: Organisation der rechnergestützten Düngung über den Lohnunternehmer.

Um von Anfang an ein vollständiges Leistungspaket für den rechnergesteuerten Pflanzenbau anbieten können, wird der Lohnunternehmer vor allem kosten- und wissensintensive Teilleistungen an eigenständige, spezialisierte Dienstleistungsunternehmen abgeben (Schlagkartierung, Bodenuntersuchung, Beratung). Dadurch erhält er über Partnerfirmen Zugriff auf technisches know-how, das ihm eine dazu kompatible Weiterentwicklung eigener Leistungen (Ertragserfassung, lokale variierte Düngung, Pflanzenschutz, Dokumentation bei der Ausbringung von Siedlungsabfällen und anderen Dienstleistungen) ermöglicht. Innerbetrieblich lassen sich vorhandene Ortungssysteme in der Verbindung mit automatisierter Arbeits- und Maschinendatenerfassung, sowie mit dem Management von Fahrzeugflotten bei Transportketten zusätzlich nutzen und gewinnbringend einsetzen.

Im Unterschied zur bisherigen Situation wird damit der Lohnunternehmer nicht nur zum Anbieter von Arbeitskraft und Maschinenkapazität, sondern auch von Logistik und Daten. Die zentrale Abwicklung der notwendigen Kommunikation mit Admini-

stration, Beratung und Fremdleistungsanbietern (Boden- / Pflanzenlabors) erhöht die Effizienz und ermöglicht auch dem kleineren Betrieb die Umsetzung moderner Produktionsverfahren.

Dem Lohnunternehmer sind deshalb größere Chancen beim Einsatz dieser neuen Technik zuzuschreiben. Außerdem wird er den erwarteten Nutzen schneller und effektiver umsetzen können.

5.3 Bodeninventur als Voraussetzung umweltschonender Pflanzenbauverfahren der Zukunft

Die Inventur der Böden hinsichtlich aktueller Nutzungsformen, hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften, sowie hinsichtlich ihres aktuellen biologischen Zustands, ist eine Aufgabe, die weit über die Anforderungen einer umweltorientierten Landwirtschaft hinausgeht. Nur wenn die Erfassung der genannten Eigenschaften flächendeckend und unter Berücksichtigung der großen Flächenanteile unter Wald oder Grünland erfolgt (die von besonderer Bedeutung für den Wasserkreislauf sind), ist eine effektive Datengrundlage für die Erarbeitung künftiger Nutzungskonzepte, die die Landwirtschaft miteinbinden müssen, gegeben.

Nutznießler einer solchen Entwicklung werden nicht allein die Landwirte sein, sondern die Gesamtheit der Bevölkerung, die an einer gesunden Umwelt, sauberem Wasser und rückstandsfreien Lebensmitteln interessiert ist. Eine solche bayernweite Aufnahme der Böden läßt sich nur mit georeferenzierten, halb- oder vollautomatisch arbeitenden Probenentnahme- und Dokumentationssystemen bewältigen.

Der Landwirtschaft wird nach einer solchen Inventur ein Großteil der Monitoring-Aufgaben zukommen, die nur mit Verfügbarkeit einer praktikablen, auf absoluten Koordinaten beruhenden, Ortungstechnik realisierbar sind: Die Erfassung von Daten ihrer wichtigsten Produktionsgrundlage, der genutzten natürlichen Ressourcen, kann dann auch von der Gesellschaft als Dienstleistung honoriert werden, wenn die Herkunft der Daten und die angewandten Meßverfahren eine zweifelsfreie, automatische Dokumentation erlauben. Auch diese Dokumentationsaufgabe ist ohne ein praktikables infrastrukturunabhängiges Ortungsverfahren nicht zu erfüllen.

6 Einordnung und Ausblick

Als mögliche Lösung für das Problem der Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge zeichnen sich Verbindungen von Koppelortungs- und Satellitentrilaterationssystemen ab.

- Die intensiven Versuche zur Koppelortung mittels einfacher und kostengünstiger Sensorik zeigten, daß sich unter günstigen Bedingungen bis zu einer Fahrtstrecke von ca. 100 m gute Ortungsergebnisse erzielen lassen (Fehler $\leq 5\%$). Der Einsatz einer Sensorik zur Lenkwinkelbestimmung kann die Genauigkeit noch erhöhen.
- Gegen den alleinigen Einsatz dieses Verfahrens spricht jedoch vor allem der prinzipiell mit zurückgelegtem Weg ansteigende Ortungsfehler und die Notwendigkeit der absoluten Zusatzortung (z.B. durch Losfahren von einem bekannten Punkt in einer bekannten Richtung).
- Das Satellitenortungssystem GPS arbeitet mittlerweile zuverlässig und stellt global rund um die Uhr absolute dreidimensionale Positionsdaten zur Verfügung. Die Genauigkeitsanforderungen machen auch ohne die S/A-Degradation differentiell arbeitende Meßverfahren (DGPS) notwendig. Die theoretischen Analysen von stationär ermittelten Meßwerten erbrachten erstmals Aussagen über statistische Kennzahlen der Verteilungen bei GPS-Messungen.
- S/A verschärft die Anforderungen an die Datenübertragung zwischen Referenz- und Mobilempfänger, sowie die Anforderungen an die Referenzstation selbst, vor allem hinsichtlich der schnellen Verfügbarkeit von Korrekturwerten. Aufgrund der geometrischen Unabhängigkeit ist die Pseudorange-Korrektur der Positionskorrektur als differentielles Korrekturverfahren vorzuziehen.
- Der erreichte Vollausbau des Raumsegmentes hat die Abschattungsproblematik z.B. an Waldrändern zwar entschärft, bei ungünstigen Bedingungen kann es aber nach wie vor zu kurzfristigen Signalausfällen bei GPS kommen. Für die Überbrückung dieser kurzen Ausfallzeiten scheint ein einfaches Koppelortungssystem sehr gut geeignet.
- Die intensive Beteiligung an den Versuchen zur Ertragskartierung hat neben den durchgeführten Fahrversuchen zweifelsfrei den Beweis für die Praxistauglichkeit und Zuverlässigkeit von GPS auch unter Berücksichtigung der erschwerten Bedingungen in der Landwirtschaft erbracht.
- Derzeit wird die am Institut vorhandene Ausstattung in Testversuchen zur verbesserten Bodenbeprobung (mit Ausrichtung auf die Teilschlagbewirtschaftung) und zur Steuerung und Dokumentation von Ausbringarbeiten (Gülle, Dünger, Pflanzenschutz) eingesetzt. Hier zeichnen sich für die Zukunft neben der lokalen Ertragsermittlung (Getreide, aber auch Halmgut, Grünfutter und Hackfrüchte) wesentliche Einsatzmöglichkeiten ab, die ohne eine sichere und kostengünstige Technik zur Positionsbestimmung nicht zu realisieren sind.
- Der Einsatz hochgenau arbeitender DGPS-Verfahren zur schnellen (> 500 ha / Tag) und präzisen (0,5 % bis 2%) Flächenbestimmung hat besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Dokumentationspflicht Bedeutung. Durch einfa-

ches Umfahren der Flächen lassen sich nur so preiswürdig die genutzten Nettoflächen und kurzfristige Nutzungsänderungen flächengenau dokumentieren.

- Die flächendeckende Inventur der Böden ist eine Hauptvoraussetzung für die Einführung ökologisch optimierter Pflanzenbauverfahren der Zukunft. DGPS ermöglicht die punktgenaue Zuordnung erfaßter Daten und erlaubt Landwirten, Lohnunternehmen und Maschinenringen die Einführung neuer effizienterer Arbeitsverfahren, sowie die Wahrnehmung von Monitoringaufgaben im Interesse der gesamten Bevölkerung.
- Im Sinne einer vor allem auch hinsichtlich Ihrer Umweltwirkungen wirtschaftlichen Landwirtschaft, müssen deshalb weitere Forschungsvorhaben folgen, die wichtige Fragen im Zusammenhang mit der Anwendung der Ortungstechnik abklären. Insbesondere sind dies:
 - Untersuchungen hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeiten für die verschiedenen Anwendungen.
 - Tests der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Genauigkeit von Ortungssystemen bei der vielseitigen landwirtschaftlichen Anwendung.
 - Untersuchungen über mögliche Lösungen für die flächendeckende Versorgung des ländlichen Raumes mit DGPS Korrektursignalen als Voraussetzung für die kostengünstige Nutzung von Satellitenortungssystemen.

7 Literatur

7.1 Allgemeine Literatur

- 1 **Bronstein, I.N. und K.A. Semendjajew:**
Taschenbuch der Mathematik
22. Auflage, Thun, 1985
- 2 **Bauer, M:**
Vermessung und Ortung mit Satelliten
Karlsruhe, 1993
- 3 **DGON (Hrsg):**
Zeitschrift: Ortung und Navigation, 1989-1994
- 4 **Starker, S:**
Unveröffentlichte Vortragsunterlagen, 1989.
- 5 **Hristow, Wl. K.:**
Die Gauss-Krüger'schen Koordinaten auf dem Ellipsoid.
Leipzig, 1943

7.2 Ortung in der Landwirtschaft

- 6 **Schnug, E., S. Haneklaus und J. Lamp:**
Economic and Ecological Optimization of Farm Chemical Application by
„Computer Aided Farming (CAF)“.
Technical Abstracts and Poster Abstracts on „International Conference
on Agricultural Engineering (AG ENG '90)“, VDI_AGR/MEG, Berlin,
1990, pp. 161-162
- 7 **Klöpfer, F., D. Murphy und E. Schnug:**
Ertragskartierung zur gezielteren Düngung.
In: Landtechnik 47 (1992), vol. 3, pp. 177-178
- 8 **Schueller, J.K. et al.,**
Determination of Spatially Variability Yield Maps.
St.Joseph, 1987, ASAE-Paper Nr. 87-1533
- 9 **Stafford, J.V., B. Ambler and M.P. Smith:**
Sensing and Mapping Grain Yield Variation.
Automated Agriculture for the 21st Century, St.Joseph, 1991, ASAE
Publication 11-91, pp. 356-366

7.3 Eigene Veröffentlichungen

- 10 **Auernhammer, H.:**
Umweltgerechte Düngung am Ertrag orientieren.
Der Förderungsdienst 39 (1991), H. 3, S. 87 - 92

11 Auernhammer, H.:

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

12 Auernhammer, H.:

Elektronik - der unentbehrliche Helfer für den Landwirt im Ackerschlepper.
In: Elektronik - eine unentbehrliche Hilfe für den Landwirt. DLG-Arbeitsunterlage D/90 Frankfurt 1990

13 Auernhammer, H., M. Demmel, J. Rottmeier und T. Muhr:

Future Developments for Fertilizing in Germany.
ASAE: Summer Meeting Albuquerque, St. Joseph 1991, Paper-No. 911040

14 Auernhammer, H.:

Utopie oder Hoffnung - Ernteertrag im Mähdrescher ermitteln und kartieren.
Bayer. Landw. Wochenblatt 181 (1991), H. 28, S. 26

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

Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Feld.
In: Wiegemöglichkeiten im Schlepperheckkraftheber und in Transportfahrzeugen. Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan 1991, Heft 2, S. 72-84

16 Auernhammer, H.:

Elektronik auf dem Feld und im Weltall.
DLG-Mitteilungen 106 (1991), Nr. 11, S. 42 - 46

17 Auernhammer, H.:

Elektronik in Traktoren und Maschinen.
München: BLV-Verlagsgesellschaft 1991 (Zweite, überarbeitete Auflage)

18 Auernhammer, H., J. Rottmeier und H. Stanzel:

Elektronikeinsatz in der Landtechnik zur Verringerung des Düngemittelsatzes und der Umweltbelastung im Futterbau.
Forschungsbericht: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten München 1991, Heft 38

19 Auernhammer, H. und T. Muhr:

The Use of GPS in Agriculture for Yield Mapping and Tractor Implement Guidance.
DGPS '91 - First International Symposium Real Time Applications of the Global Positioning System Düsseldorf 1991, Vol. II, pp 455 - 465

20 Auernhammer, H. and T. Muhr:

GPS in a Basic Rule for Environment Protection in Agriculture.
Proceeding of the 1991 Symposium "Automated Agriculture in the 21st Century", St. Joseph (USA) 1991, pp. 494 - 402

21 Auernhammer, H.:

Rechnergestützte Pflanzenproduktion am Beispiel der umweltorientierten Düngung.

In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge", Düsseldorf 1992, Heft 14, S. 1 - 15

22 Muhr, T. und H. Auernhammer:

Technische Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge.

In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge", Düsseldorf 1992, Heft 14, S. 49 - 56

23 Demmel, M., T. Muhr, J. Rottmeier, P.v. Perger und H. Auernhammer:

Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991.

In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge", Düsseldorf 1992, Heft 14, S. 107 - 122

24 Auernhammer, H. und T. Muhr:

Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge als Schlüsseltechnologie für eine rechnergestützte Pflanzenproduktion.

In: BML-Arbeitstagung '92: KTBL Darmstadt 1992, Arbeitspapier 167, S. 40-43

25 Auernhammer, H. und K. Wild:

La Navigation par Satellites et l'Agirculture.

In: Navigation. Paris 1993, Vol. 41, No. 162, pp. 246 - 252

26 Auernhammer, H.:

Die Bodenprobe im System "umweltorientierte Düngung" aus landtechnischer Sicht.

In: Landtechnik-Bericht: Bodenbeprobung zur Stickstoff-Untersuchung - Technische und organisatorische Voraussetzungen, Weihenstephan, 1993, S. 24 - 34

27 Wild K. und H. Auernhammer:

Ortung und Navigation in der Landwirtschaft.

SPN (Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation 1 (1992), Nr. 2, S. 72

28 Auernhammer, H.:

Rechnergestützte Düngesysteme.

In: Neue Techniken zum umweltgerechten und wirtschaftlichen Einsatz mineralischer und organischer Dünger. Landtechnik-Schrift: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1992, Nr. 2, S. 14 - 24

29 Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier und P.v. Perger:

Ortung und Ertragsermittlung in den Erntejahren 1991 und 1992.

Zeitschrift für Agrarinformatik 1 (1993), H.1, S. 26 - 29

30 Auernhammer, H.:

Agrartechnische Möglichkeiten zur optimierten Ausbringung von Betriebsmitteln.

Landtechnik 48 (1993), H. 4, S. 163

31 Auernhammer, H. und M. Demmel:

TP "Teilschlagbezogene Produktionstechnik".
In: FAM-Forum, Neuherberg: GSF 1993, H4, S. 8 - 9

32 Auernhammer, H. und M. Demmel:

Lokale Ertragsermittlung beim Mähdrusch.
Landtechnik 48 (1993), H. 6, S. 315 - 319

33 Auernhammer, H. und M. Demmel:

Einheitlicher Schlag ist die Ausnahme - Differenzierte Ertragsermittlung
beim Mähdrusch in Scheyern.
Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 183 (1993), H. 26, S. 24

34 Auernhammer, H.:

"Intelligente" Technik muß her - Entwicklungstendenzen in der Mecha-
nisierung des Ackerbaues.
Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 183 (1993), H. 26, S. 25

35 Auernhammer, H. und M. Demmel:

Erstaunlich genaue Ergebnisse - Drei Jahre differenzierte Ertragser-
mittlung in Scheyern.
Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 183 (1993), H. 31,
S. 35+45

36 Auernhammer, H.:

Satellitenortung in der Landwirtschaft ?
TUM Mitteilungen, München 1993, H. 5, S. 14 - 16

37 Auernhammer, H. und T. Muhr:

Satelliten vermessen exakt die Felder.
Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 183 (1993), H. 36,
S. 47-48

38 Auernhammer, H. und M. Demmel:

Forschungsverbund Agrarökosysteme München - Ertragsinventur - Lo-
kale Ertragsermittlung.
Neuherberg 1993, FAM-Bericht 3, S. 113 - 130

39 Auernhammer, H. und T. Muhr:

Neue Wege zu Bodenproben ?
Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 183 (1993), H. 42,
S. 32-33

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

Ortungssysteme für die Landwirtschaft im Vergleich.
Kurzfassung der Vorträge Landtechnik 1993, Braunschweig 1993,
S. 146-148

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

Vierjährige Einsatzerfahrungen mit GPS und DGPS.
In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Beiträge zur
17. Deutschen Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie
und -bekämpfung vom 22. - 24.2.1994, Stuttgart-Hohenheim.
Stuttgart: Ulmer Verlag 1994, SH XIV, S. 133 - 142. (ISSN 0938-
9938, 706 S.)

42 Wild, K. und H. Auernhammer:

Automatisierte Prozeßdatenerfassung bei elektronisch gesteuerten Arbeiten in der Außenwirtschaft.

In: Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. KTBL Arbeitspapier. Darmstadt 1994, Nr. 175, S. 196 - 199

43 Auernhammer, H.:

Perspektiven des Elektronikeinsatzes.

In: Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. KTBL Arbeitspapier. Darmstadt 1994, Nr. 175, S. 273 - 280

44 Auernhammer, H.:

Satellitennavigation in der Landwirtschaft.

In: DGON-Seminar SATNAV '93 "Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen". Düsseldorf 1994, S. 197 - 205

45 Auernhammer, H.:

Satellitenortung im Zuckerrübenanbau ?

DZZ 30 (1994), Nr. 4, S. 13

46 Auernhammer, H., T. Muhr and M. Demmel:

GPS and DGPS as a Challenge for Environment Friendly Agriculture.

3rd International Conference on Land Vehicle Navigation, 14 - 16 June Dresden, Düsseldorf 1994, ppa. 81 - 91

47 Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier, K. Wild:

Site Specific Yield Measurement in Combines and Forage Harvesting Machines.

AG-ENG '94, Mailand, Report N. 94-D-139

48 Muhr, T.:

Vergleich von berührungslos arbeitenden Geschwindigkeitssensoren für die Landwirtschaft.

Diplomarbeit am Institut für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, 1989.

49 Auernhammer, H. (Hrsg):

GPS in Agriculture

Elsevier (im Druck)

Berichte im Rahmen dieser Heftereihe:

- * 1. Mechanisierungsverfahren in der Landschaftspflege, besonders für Grünflächen
Februar 1977
- 2. Mechanisierung der Silageentnahme und Fütterung
Februar 1978
- * 3. Möglichkeiten der Strohverwertung
Dezember 1978
- * 4. Grünfütterrocknung
August 1979
- * 5. Energieeinsatz in der Landwirtschaft
Oktober 1980
- 6. Technik der Strohaufbereitung für Futterzwecke
März 1981
- 7. Futterbergung mit Großballenpressen
August 1981
- * 8. Einsatzmöglichkeiten verschiedener Energieträger in der Landwirtschaft
August 1981
- * 9. Fütterungstechnik in der Rinderhaltung
April 1982
- 10. Strohaufbereitung für Futterzwecke
Juli 1982
- * 11. Einsatzmöglichkeiten verschiedener Energieträger in der Landwirtschaft
Dezember 1982
- * 12. Strohaufschluß in Bayern und Strohaufschluß in Norditalien
Juli 1983
- * 13. BIOGAS
Januar 1984
- 14. Biogaserzeugung in landwirtschaftlichen Betrieben Bayerns
Juli 1986 - 2. Auflage -
- 15. Möglichkeiten der Abwärmenutzung mit Wärmepumpen im landwirtschaftlichen Betrieb
März 1985
- ** 16. Verbesserung der Verfahrenstechniken für die Flüssigmistaufbereitung und Ausbringung
April 1985
- 17. Flüssigfütterung bei Schweinen
Mai 1985
- 18. Wirkungen belüfteter und unbelüfteter Rindergülle unter Schnitt und Beweidung auf Dauergrünland
Dezember 1985
- * 19. Demonstrationsanlagen für die Verfeuerung von Holz und Stroh
April 1986
- ** 20. Verbesserung der Verfahrenstechniken für die Flüssigmistaufbereitung und Ausbringung
Juni 1986
- * 21. Feuchtgetreide-Konservierung
Juli 1986
- 22. Erosionsschutz
Landtechnische Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion von Reihenfrüchten in Hanglagen
Mai 1987
- * 23. Biogas
Juli 1987
- * 24. Zuckerhirse
Oktober 1987
- 25. Demonstrationsanlagen für die Verfeuerung von Holz und Stroh
November 1987
- 26. Techniken zur Erzeugung von Qualitätsheu
Dezember 1987
- 27. Biogas
Februar 1988
- 28. Techniken zur Verbesserung der Grundfütterkonservierung
November 1988
- 29. E 5 - Ottokraftstoff
Januar 1989
- 30. Getreidekonservierung und Futterschäden durch Getreide
Juli 1989
- 31. Landtechnische Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion beim Anbau von Reihenfrüchten in Hanglagen
März 1990
- ** 32. Verbesserung der Aufnahmetechnik bei der Mähdruschernte
Endberichte zur Strohfeuerungsanlage
Berichte zu Biogasanlagen
Luft-Luftkollektor für die Tabakrocknung
April 1990
- ** 33. Produktion, Aufbereitung und energetische Nutzung von Pflanzenölen
Errichtung einer Rapsölgewinnungsanlage zum Betrieb von Ackerschleppern in der Landwirtschaft
Einsatz von Pflanzenölen in Verbrennungsmotoren und Heizungsanlagen
Quantitative Erfassung von Ammoniakemissionen in den Verfahrenstechniken der Gülleverwertung
Mechanisierung der Bodenprobenentnahme
Fachliche Betreuung bei der mechanischen Bodenprobenentnahme in landw. Betrieben Bayerns
Oktober 1990

* vergriffen

** Nur für dienstliche Zwecke

Berichte im Rahmen dieser Heftreihe:

34. Entwicklung und Erprobung einer Schnellbestimmungsmethode zur Messung von Bodenverdichtungen
Februar 1991
35. Einfluß der Zumischung von Ethanol zu Dieseldieselkraftstoff auf das Emissions- und Betriebsverhalten von Nutzfahrzeugen, insbesondere auf die Freisetzung von derzeit als krebserregend geltenden Stoffen
April 1991
- ** 36. Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit von Festmistverfahren
Recycling von Kunststoffen – Erprobung von Kunststoffregeneraten für die Landwirtschaft
April 1991
- ** 37. Bodenverdichtung und Zugkraftbedarf in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte
Juni 1991
38. Elektronikeinsatz in der Landtechnik zur Verringerung des Düngemittelaufwandes und der Umweltbelastung im Futterbau
September 1991
- * 39. Energie aus der Landwirtschaft
Reststoffe und speziell produzierte Rohstoffe
Dezember 1991
40. Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht
Mai 1992
41. Arbeitswirtschaftliche Untersuchungen und Modellkalkulationen in der Zuchtsauenhaltung
Mai 1992
42. Rationelle und tiergerechte Laufstallhaltung für Pferde
April 1992
43. Erarbeitung geeigneter Verfahren zur Ernte, Lagerung und Bagasseverwertung von Zuckerhirse
Mai 1992
44. Verfahrensrelevante Untersuchungen zu Bereitstellung und Nutzung jährlich erntbarer Biomasse als Festbrennstoff unter besonderer Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und umweltbezogener Aspekte
Oktober 1992
45. Entwicklung und Erprobung neuer mechanischer Verfahren zur umweltgerechten Unkrautbekämpfung
November 1992
46. Kompostierung landwirtschaftlicher und nichtlandwirtschaftlicher organischer Reststoffe
Dezember 1992
47. Einflußfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen
März 1993
48. Einsatz überschüssiger Schafwolle für technische Zwecke
Mai 1993
49. Verfahren und Techniken zur Gruppenfütterung von Milchkühen
Mai 1993
50. Recycling von Kunststoffen
Erprobung von Kunststoff-Regeneraten für die Landwirtschaft
Dezember 1993
51. Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen – Einflußfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozeß
Februar 1994
52. Geruchsemissionen aus Rinderställen
März 1994

