

Matthias Siemes

Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten
Aussaat von Rübenpflanzen mittels
Multi-Sensor-System und Filteransatz

Matthias Siemes • **Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten Aussaat von
Rübenpflanzen mittels Multi-Sensor-System
und Filteransatz**

Matthias Siemes

Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten
Aussaat von Rübenpflanzen mittels
Multi-Sensor-System und Filteransatz

Diese Arbeit wurde im Dezember 2010 als Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn vorgelegt.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers
Korreferent: Prof. Dr. techn. Wolf-Dieter Schuh

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2011

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn <http://hss.ulb.uni-bonn.de> elektronisch und mit allen farbigen Abbildungen publiziert.

Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner
Prof. Dr.-Ing. Theo Kötter
Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kusche
Prof. Dr. Lutz Plümer
Prof. Dr. techn. Wolf-Dieter Schuh

Die Aufnahme dieser Arbeit in die Schriftenreihe wurde von den Herausgebern der Reihe einstimmig beschlossen.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt.
Abdruck auch auszugsweise nur mit Quellenangabe gestattet.
Alle Rechte vorbehalten.

Institut für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten Aussaat von
Rübenpflanzen mittels Multi-Sensor-System
und Filteransatz**

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt im Dezember 2010

von Dipl.-Ing. Matthias Siemes

aus Bonn

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolf-Dieter Schuh

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2011

Erscheinungsjahr: 2012

Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen mittels Multi-Sensor-System und Filteransatz

Zusammenfassung

Die Bestandspflege von landwirtschaftlichen Kulturen, maßgeblich geprägt durch die Unkrautkontrolle, wird heutzutage überwiegend mit chemischen Pflanzenschutzmitteln betrieben. Der gestiegene Bedarf an Bioprodukten erfordert jedoch ökologische Konzepte, die eine umfassende und wirtschaftliche Bestandspflege gewährleisten. Eine Lösung kann die Erweiterung des klassischen mechanischen Hackens auf eine umfassendere Beseitigung darstellen. Das zusätzliche Hacken, rechtwinklig zur Fahrtrichtung, ermöglicht ein Beseitigen von Unkräutern auch innerhalb der Pflanzenzwischenräume. Befahrbare Längs- und Querreihen in Form eines Rechteckverbandes sind die Voraussetzung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Lösungskonzept zur Erzeugung eines Rechteckverbandes durch eine koordinatengesteuerte Aussaat von Reihenkulturen entwickelt. Eine bekannte Methode zur Erfassung von Fahrzeugbewegungen aus dem Kfz-Bereich wird auf das landwirtschaftliche Problem übertragen und an dessen Rahmenbedingungen angepasst. Aufgrund der Komplexität des Gesamtvorgangs, gleichabständige Aussaat in Längsrichtung und Wendevorgänge, beschränken sich die Ausführungen dieser Arbeit im Wesentlichen auf die Entwicklung einer Lösung zur koordinatengesteuerten Saatkornablage in Längsrichtung durch konventionelle Einzelkornsämaschinen. Es soll kein autonom agierendes landwirtschaftliches Spezialfahrzeug geschaffen werden.

Als Grundlage eines Lösungskonzepts wird zunächst der Stand der Forschung bei der Automation von landwirtschaftlichen Prozessen und die Nutzung von geodätischen Multi-Sensor-Systemen in Kombination mit echtzeitfähigen Filteransätzen betrachtet. Eine Erörterung der unterschiedlichen Rahmenbedingungen zeigt, dass eine Genauigkeit von $\sigma < 2$ cm für die Ablage erreicht werden muss.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit besteht somit in der Erarbeitung eines geeigneten Lösungskonzepts und einer anschließenden Verifikation durch verschiedene Versuchsfahrten. Zunächst wird das eingesetzte Multi-Sensor-System unter Beachtung eines einheitlichen Koordinatenbezugs aufgezeigt und die Echtzeitfähigkeit der Datenerfassung analysiert. Dabei zeigt sich, dass nicht alle Datenquellen in ausreichender Echtzeit erfasst und verarbeitet werden können (u.a. Verzögerung bei den GPS-Koordinaten). Die Berechnung einer Führungsgröße zur koordinatengesteuerten Aussaat spaltet sich somit in einen echtzeitfähigen und einen zweiten verzögerten Teil auf. Für die echtzeitfähige Berechnung in Form einer KALMAN-Filterung ist die Modellierung des Bewegungsverhaltens des Fahrzeugs notwendig. Durch eine experimentelle Ermittlung des Modellansatzes wird gezeigt, dass das funktionale Modell einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung für Längsfahrten ausreichend ist. Eine zusätzliche Abschätzung des Systemrauschens mit ca. $0,01 \text{ m/s}^2$ und die Bildung des stochastischen Modells der Messgleichungen ist durch die Quantifizierung gegeben. Die Übertragbarkeit des bekannten Filteransatzes aus dem Kfz-Bereich auf die landwirtschaftliche Bewegung ist hiermit bestätigt.

Die Funktionalität der koordinatengesteuerten Saatkornablage im Rechteckverband, unter Einhaltung der landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen, wird durch eine Verifikation der KALMAN-Filterung gezeigt. Unter Nutzung der Ergebnisse der individuellen Sensorkalibrierungen können bei Geschwindigkeiten zwischen $1,5 - 2 \text{ m/s}$ und einem Saatabstand von $0,3 \text{ m}$ gleichabständige Ablageweiten mit einer Standardabweichung von $< 0,01 \text{ m}$ erreicht werden. Die Abweichungen der absoluten Ablagepositionen über die Gesamtlänge der Längsfahrt fallen mit bis zu $0,02 \text{ m}$ höher aus. Die Gründe liegen u.a. in der maximalen Messgenauigkeit der absoluten Positionierung (RTK-GPS) von $1 - 2 \text{ cm}$. Das vorgestellte Lösungskonzept ist somit funktionsfähig.

Vor dem Hintergrund der Gesamtproblematik (Längsfahrt + Wende) werden am Ende der Arbeit hierfür zusätzlich erste Lösungsaspekte auf der Basis des präsentierten Längsfahrtalgorithmus vorgestellt.

Coordinate steered sowing of beets by means of a multi-sensor-system and filter algorithm

Abstract

The maintenance of agricultural cultivation in Western Europe is significantly affected by weed control. Currently weed control is achieved predominantly by using chemical herbicides. The extended demand for bio-products requires ecological concepts which guarantee extensive and economical maintenance. A solution to be considered is the extension of the traditional, mechanical hoeing for an extensive maintenance. Additional hoeing laterally to the sowing direction allows the control of weeds in-between the individual plants. Driveable longitudinal and lateral lines in a rectangle grid are a precondition.

In the context of this dissertation a concept for the solution is developed producing a rectangular grid by coordinate steered sowing in strip farming. A known method used in the automotive sector for recording vehicle movements is transferred into the agriculture domain adapted to the basic conditions. The content of this dissertation is limited to developing a solution for coordinate steered sowing in longitudinal lines with conventional single-seeders, due to the complexity of the whole seeding procedure, equidistant sowing positions in longitudinal lines and turns. Not an autonomous special purpose vehicle is the subject of this research.

The basis for the solution concept taken into consideration is state of the art research from automation of agriculture processes and the use of geodetic multi-sensor-systems in combination with real-time filter algorithms. According to the analysis of the different basic conditions an accuracy for the sowing position of $\sigma < 2$ cm must be achieved.

This dissertation focuses on the realization of a suitable precise solution concept and thereafter verifying it by means of several test drives. The used multi-sensor-system will be presented taking a uniform coordinate reference into account and the real-time data acquisition capability will be analyzed. Resulting from this analysis, not all data sources could be recorded and processed in real-time (amongst others the deceleration by GPS-coordination). The calculation of a reference variable for the coordinate steered sowing process is thus separated firstly into a real time and secondly into a delayed part. For the real-time calculation in form of a KALMAN-filtering the modelling of the vehicle motion is necessary. By experimentally determining the model approach, it is shown that the functional model of a uniformly accelerated motion for longitudinal tracks is sufficient. An additional estimate for the system noise by approximately $0,01 \text{ m/s}^2$ and the stochastic model of the measurement equations are achieved with the quantification. Thus transferring the known filter attachment from the automotive scenario into the movement of agricultural vehicles is confirmed.

Verifying the KALMAN-filtering demonstrates the functionality of the coordinate steered sowing within a rectangular grid, in compliance with the agricultural conditions. Using the results of individual sensor-calibration, equidistant sowing positions of 0,3 m with a standard deviation of $< 0,01$ cm can be achieved at speeds between 1,5 - 2 m/s. The deviation from the absolute sowing position along the whole distance of the longitudinal track is up to 0,02 m, which is slightly higher. The primary contributor to this inaccuracy is the maximum accuracy of measuring the positions of 1 - 2 cm (RTK-GPS). Therefore the presented concept for the solution is proven to be viable.

Against the background of the whole sowing procedure (longitudinal track + turns) for this purpose first solution aspects based on the presented concept of the longitudinal track are considered further at the end of the dissertation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	1
1.3	Ziel der Arbeit	3
1.4	Gliederung der Arbeit	4
2.	Stand der Forschung	5
2.1	Neue Wege in der Landwirtschaft	5
2.1.1	Präzisionslandwirtschaft	5
2.1.2	Automation in der Produktion	6
2.1.3	Umweltschutz und Leistungssteigerung	11
2.1.4	Einzelpflanzenorientierte Bewirtschaftung	15
2.2	Geodätische Sensor-Systeme	16
2.2.1	Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche	16
2.2.2	Übertragbarkeit auf die Präzisionslandwirtschaft	19
3	Rahmenbedingungen	20
3.1	Anforderungen im Rübenanbau	20
3.2	Genauigkeitsanforderungen	24
3.3	Koordinatengesteuerte Aussaat im Rechteckverband	25
4	Ein Lösungskonzept	28
4.1	Strategie	28
4.2	Messwerterfassung	29
4.2.1	Das Multi-Sensor-System	29
4.2.1.1	Konzept	29
4.2.1.2	Korrelationsgeschwindigkeitsmesser	30
4.2.1.3	Drehratensensor	33
4.2.1.4	Einbindung von RTK-GPS-Messungen	35
4.2.2	Synchronisation und Echtzeit	40
4.2.3	Datenerfassung	42
4.3	Koordinatensystem	45
4.4	Modellierung und Filteraufbau	48
4.4.1	Systemtheorie	48
4.4.2	KALMAN-Filterung	52
4.4.3	Bewegungsmodell eines Fahrzeuges	55
4.4.4	Nutzungskonzept für einen experimentell ermittelten Modellansatz	57

4.4.5	Quantifizierung des Modellansatzes	59
4.4.6	Bewertung der Erkenntnisse und Möglichkeiten zur Realisierung	61
4.4.7	Ein Filteransatz für Bewegungen in der Präzisionslandwirtschaft	62
4.5	Softwarekonzept	68
5	Empirische Untersuchungen und Verifikation der Filterung	70
5.1	Sensorkalibrierung	70
5.1.1	Correvit L-400	70
5.1.2	RTK-GPS-System	75
5.2	Verifikation	82
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Verbesserungspotential	92
6	Erste Aspekte zur Wende	94
6.1	Übertragbarkeit des Lösungsansatzes zur Längsfahrt auf die Wende	94
6.2	Erste Versuche einer vereinfachten Wende/mehrreihigen Aussaat	95
6.3	Resümee der ersten Versuchsfahrten	98
7	Zusammenfassung und Ausblick	100
	Literaturverzeichnis	105

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Motivation

Das Berufsbild der Ingenieurgeodäsie befindet sich seit einigen Jahren im Wandel. Neue Aufgabenfelder aus dem Bereich der Kinematik und Dynamik entwickeln sich parallel zur klassischen Geodäsie (PELZER 1993, KUHLMANN 2004C). Ein Grund dafür liegt in der rasanten technischen Entwicklung auf dem Computer- und Sensormarkt. Multi-Sensor-Systeme sind zu einem festen Bestandteil von kinematischen Messmethoden geworden. Hierdurch können eine umfassendere Beschreibung und eine Erhöhung der Prozesssicherheit bei komplexen Bewegungsabläufen erreicht werden. Der Fortschritt im Bereich der Mess- und Auswertegeschwindigkeit moderner Messsensoren ermöglicht heutzutage eine echtzeitnahe Erfassung von Objektzuständen, was eine Grundvoraussetzung zur Steuerung von zeitnahen Prozessen darstellt (STEMPFHUBER 2004).

Neben der präzisen messtechnischen Erfassung von Bewegungsvorgängen spielen die Entwicklungen zur funktionalen und stochastischen Beschreibung eines Prozesses in Form eines angepassten Filteransatzes eine entscheidende Rolle. Bewegungen, die durch bestimmte Kräfte verursacht werden, lassen sich durch mathematisch-physikalische Gesetzmäßigkeiten modellieren und in einen Filterprozess überführen. Diese zusätzliche Informationsquelle führt zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit in Form einer erhöhten geometrischen Überbestimmung (HEUNECKE 1995). Vielfältige Forschungen im Bereich der Deformationsanalyse haben zu modernen Filterlösungen in der Geodäsie geführt, sodass eine echtzeitfähige Verknüpfung aller Informationen, und bei Strukturmodellen eine physikalische Interpretation der Zusammenhänge, möglich ist (KUHLMANN/PELZER 1997).

Moderne Mess- und Auswertetechniken lassen auch neue Aufgabenfelder in Bereichen der Präzisionslandwirtschaft erkennen. Der gestiegene Bedarf an Lebensmitteln mit hoher Qualität und die erhöhte Nachfrage nach Bioprodukten erfordert immer wirtschaftlichere Produktionsmethoden bei einer gleichzeitigen Ertragssteigerung (BÖSE-FISCHER 2007). Ein landwirtschaftlicher Bereich mit steigender Nachfrage auf dem europäischen Markt stellt der ökologische Zuckerrübenanbau dar. Dieser Trend ist durch eine geänderte EU-VERORDNUNG 178/2002 (ARTIKEL 18) bedingt, wonach Bioprodukte zu 95% ökologisch hergestellt werden müssen. Die Kosten und der Ertrag von Zuckerrüben hängen hauptsächlich von der Bestandspflege mit einer umfassenden und nachhaltigen Unkrautbeseitigung ab (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007, RIETHMULLER et al. 2007). Neue wirtschaftliche Lösungen zur schadstofffreien Unkrautbeseitigung müssen gefunden werden.

Eine Verknüpfung von modernen zukunftsorientierten Techniken aus dem geodätischen Bereich, mit gesteuerten Applikationen der Landwirtschaft, können zu akzeptablen und wirtschaftlichen Lösungen in der Präzisionslandwirtschaft führen (STEMPFHUBER 2004). Neue Verfahren für den ökologischen Zuckerrübenanbau sind denkbar. Die Basis kann die Entwicklung einer koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben mittels Multi-Sensor-System und Filteransatz darstellen. Hierdurch kann eine georeferenzierte und auch eine verlustfreie nachhaltige Bestandspflege der gesamten Feldfläche auf ökologischer Grundlage erzielt werden.

1.2 Problemstellung

Die Bestandspflege von landwirtschaftlichen Kulturen ist in den Feldkulturen Westeuropas überwiegend durch den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel geprägt. Mit der Ausbringung von Herbiziden sind hohe Einträge von Schadstoffen in den Boden verbunden, was vor dem Hintergrund des Umweltschutzes und der gestiegenen Nachfrage nach biologischen Produkten die Entwicklung von gezielten und umweltfreundlichen Bestandspflegeverfahren zum vorrangigen Ziel der agrarwissenschaftlichen Forschung macht (GERHARDS et al. 2002A).

Die schadstofffreie Unkrautbekämpfung bei Reihenkulturen - wie dem Rübenanbau - erfolgt meist konventionell in Form von maschinell Hacken entlang der Aussaatrichtung. Dabei werden die Freiräume zwischen den einzelnen Kulturpflanzen quer zur Fahrtrichtung jedoch nicht ausreichend vom Unkraut befreit, was zu negativen Einflüssen auf das Wachstum und zu nachhaltigen Ertragseinbußen führen kann (GEHRING 2006, MAY 2001). Eine möglichst einfache, effiziente und verlustfreie Lösung dieser Problematik wird in diesem Zusammenhang benötigt.

Eine Lösung stellt das zusätzliche Hacken der Reihenkulturen rechtwinklig zur Saatrichtung dar. Grundlage ist dabei die Erzeugung von befahrbaren Längs- und Querreihen in Form eines Rechteckverbandes mit ausreichender Genauigkeit (NOERREMARK/GRIEPENTROG 2004A). Weiterhin muss das rechtwinklige Bearbeiten der Feldfläche mit einem Standardhacksystem sowohl hoch effizient bei der Unkrautbeseitigung und Bodengüteverbesserung als auch möglichst verlustfrei sein, um sich auf dem Markt zu etablieren. Das verlustfreie Befahren in Längs- und Querrichtung erfordert dabei eine ausreichende Genauigkeit des Rechteckverbandes der Pflanzen.

Eine erfolgversprechende Möglichkeit zur Erzeugung eines Rechteckverbandes bei Reihenkulturen kann die präzise, gleichabständige Aussaat von Saatkörnern in Form einer Koordinatensteuerung darstellen. Dies kann jedoch zu weiteren Problemstellungen führen, welche im Rahmen der Arbeit zu berücksichtigen sind: der Einfluss des Saataufgangs auf die Pflanzenposition, Verrollungen der Saat bei der Ablage und insbesondere die Nutzung konventioneller Sämaschinen. Eine einfache und schnelle Lösung zum Umbau auf Koordinatensteuerung mit marktreifen Komponenten oder aktuell verfügbaren Entwicklungen aus dem landwirtschaftlichen Bereich ist aufgrund der vorhandenen Genauigkeitsauslegungen nicht erreichbar. In der Regel besitzen die Komponenten zur Erfassung von landwirtschaftlichen Trajektorien, wie z.B. Spurführungsassistenten, Ertragserfassungseinrichtungen oder Flottenmanagementsysteme, eine Genauigkeit im Meter- bis Dezimeterbereich und keine direkte Verknüpfung mit den gekoppelten Maschinen. Auch eine reine landwirtschaftliche GPS-Lösung kann die Anforderungen an die Genauigkeit für eine exakte gleichabständige Saatkornablage im Bereich weniger Zentimeter nicht zuverlässig erfüllen. Im präzisen RTK-Modus, mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 2 cm, sind einzelne Abweichungen bis in den Dezimeterbereich möglich (STEMPFHUBER 2004).

Der konventionelle Rübenanbau erfolgt in Form von Reihenkulturen mithilfe von gekoppelten Einzelkornsämaschinen entlang einer durch den Fahrzeugführer vorgegebenen Spur mit möglichst konstanter Geschwindigkeit von 4,5 bis 8 km/h (MERKES 2003, SCHMITZ 2001). Ein Spuranreißer liefert dabei eine „Leitlinie“ für den einheitlichen parallelen Abstand aller weiteren Säfahrten (Spuren) über die gesamte Feldbreite (vgl. Abb. 1-1).



Abb. 1-1: Längsfahrt mit einer konventionellen Mehrreihen-Einzelkornsämaschine, orientiert über Spuranreißer (Quelle: www.kvernelandgroup.com (11.2010))

Durch die Feldlänge werden die Spuren begrenzt. Dort beginnt die Wende der Maschine für die nächste Säspur in entgegengesetzter Richtung. Die Wende erfolgt in der Regel ohne Bodenkontakt der Sämaschine und mit erhöhter Dynamik in der Fahrzeugbewegung im Vergleich zur gleichmäßigen Säfahrt in Längsrichtung. Der Ablauf der Wendefahrt ist abhängig von den gegebenen Platzverhältnissen am Feldrand (Größe der Vorgewendefläche) und der eingesetzten Maschinenbreite. Dementsprechend gibt es unterschiedliche Techniken bei der Wende (vgl. Abb. 1-2), wie z.B. die „Schlüssellochwende“ oder die „Fischschwanzwende“ (KUHLMANN et al. 2008).

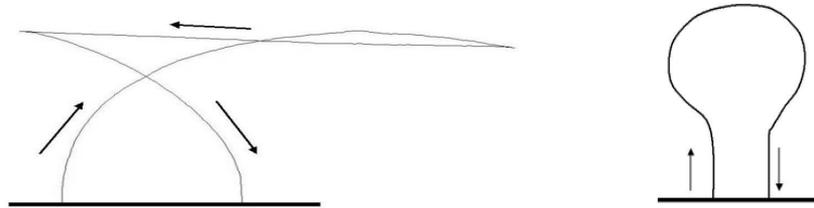


Abb. 1-2: Prinzipskizze der Fischschwanzwende (links) und der Schlüssellochwende (rechts)

Der Ablauf der konventionellen Einzelkornsaat (vgl. auch Kapitel 3.3) lässt erkennen, dass die Aussaat mehrere Arbeitsprozesse mit unterschiedlicher Bewegungsdynamik enthält. Das Problem der koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen lässt sich somit in mindestens zwei eigenständig zu behandelnde Teilbereiche strukturieren:

- **die koordinatengesteuerte Saatkornablagefahrt in Längsrichtung („Fahrt in der Spur“)**
- **die Wende mit erneuter Anfangsproblematik („Fahrt im Vorgewende“)**

Die „Fahrt in der Spur“ erfolgt im Idealfall nach einer kurzen Startbeschleunigung im Vorgewende mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit entlang eines kompletten Schlages. Das Lösungskonzept dieses Teilproblems sollte robust gegenüber Störungen und geringen Beschleunigungsänderungen der Zugmaschine sein, um eine Gleichabständigkeit der Saatkörner zu gewährleisten. Die „Fahrt im Vorgewende“ benötigt aufgrund der höheren Beschleunigungen und Richtungswechsel eine eigenständige und ggf. aufwändigere Modellierung des Bewegungsablaufs. Die Messsensorik, welche ggf. direkt auf der Sämaschine installiert ist, verliert durch das Anheben und mögliche Verkippen der Maschine im Wendevorgang den direkten Bezug zur Saatbettoberfläche. Im Gegensatz zur Längsfahrt (1D-Problem) stellt die Wende primär eine 2D-Problematik dar, um die Startposition für die erneute „Fahrt in der Spur“ zur Erzeugung rechtwinkliger Reihen zu ermitteln. Die physikalische Trägheit der Gesamtmaschine (Zugmaschine und Sämaschine) spielt bei beiden Bewegungsabläufen eine wichtige Rolle.

Aufgrund des Umfangs der Problemstellung beschränken sich die folgenden Ausführungen dieser Arbeit im Wesentlichen auf die erste Teilproblematik – „Fahrt in der Spur“ - und die damit verbundene Realisierung eines Konzeptes zur Schaffung einer präzisen, gleichabständigen Ablage des Saatgutes über die gesamte Länge einer Spur. Das Ziel der Arbeit lässt sich somit formulieren.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung einer geodätischen Führungsgröße zur koordinatengesteuerten Saatkornablage in Längsrichtung für eine modifizierte, konventionelle Einzelkornsämaschine, welche an verschiedene manuelle gesteuerte Zugfahrzeuge angekoppelt werden kann. Die Säfahrten werden dabei vom Fahrzeugführer geplant und nach dessen Vorstellungen manuell orientiert und ausgeführt. Die gleichabständige Aussaat in Längsrichtung stellt somit eine 1D-Problematik dar. Es steht somit nicht die Entwicklung eines autonom agierenden landwirtschaftlichen Spezialfahrzeuges im Vordergrund, sondern die Entwicklung einer auf Standardkomponenten basierenden Sämaschine, die gleichlange Saatkornabstände während der Längsfahrt erzielt.

Messtechnisch und filtermäßig modellierte Lösungsansätze zur Erfassung und Steuerung von Fahrzeugbewegungen sind bei Anwendungen aus der modernen Geodäsie bereits zu finden (EICHORN 2005). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Übertragbarkeit auf das Spektrum der dynamischen Bewegungen einer Sämaschine bei der Aussaat in Form eines angepassten Filteransatzes für landwirtschaftliche Problemstellungen überprüft. Hierzu sind Anpassungen und leichte Modifikationen notwendig.

Sollte das Konzept eines koordinatengesteuerten Ansatzes erfolgreich und wirtschaftlich akzeptabel sein, stünde damit eine neue, flexible Basistechnologie für moderne landwirtschaftliche Anwendungen mit Koordinatenbezug zur Verfügung.

Der Ansatz einer koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen wird vom IGG und dem Institut für Landtechnik der Universität Bonn gemeinsam bearbeitet und von der DFG gefördert.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel, welche teilweise in mehrere Unterkapitel aufgeteilt sind. Kapitel 1 umfasst zunächst eine kurze Motivation, auf deren Basis in die eigentliche Problemstellung der Arbeit eingeführt wird. Die Komplexität der Thematik erfordert eine Strukturierung in getrennt bearbeitbare Teilprobleme, sodass am Ende des ersten Kapitels das Ziel der Arbeit formuliert werden kann.

Den Stand der Forschung im landwirtschaftlichen als auch geodätischen Bereich, stellt das Kapitel 2 dar. Insbesondere die Präzisionslandwirtschaft zeigt neue Wege in der heutigen Landwirtschaft durch die verbesserte Automation von Produktionsprozessen und eine Steigerung des Umweltschutzes mit wirtschaftlichen Verfahren auf. Die Entwicklungsschwerpunkte in der Geodäsie liegen vielfach im Bereich der Sensor-Systeme. Die Möglichkeit einer Verknüpfung beider Forschungsbereiche wird diskutiert.

Die Arbeit erfordert weiterhin eine Absteckung der Rahmenbedingungen. In Kapitel 3 werden die verschiedenen Anforderungen an den modernen Anbau von Rübenpflanzen und die notwendigen Genauigkeitsanforderungen an die Aussaat und für Folgemaßnahmen zusammengetragen. Eine koordinatengesteuerte Aussaat im Rechteckverband ist für verlustfreie und nachhaltige mechanische Folgearbeiten notwendig.

Ein Lösungskonzept zur koordinatengesteuerten Saatkornablage von Rübenpflanzen wird in Kapitel 4 vorgestellt. Neben der Wahl der Komponenten des Multi-Sensor-Systems ist das Thema der Synchronisation, der echtzeitfähigen Datenerfassung sowie eines einheitlichen Koordinatensystems im Rahmen der Messwerterfassung von Bedeutung. Ein experimenteller Ansatz zur Ermittlung der Parameter des Bewegungsverhaltens der Maschine dient der Modellierung der KALMAN-Filterung. Die Quantifizierung des experimentellen Modellansatzes lässt im Weiteren eine Nutzung für die Präzisionslandwirtschaft erkennen. Auf der Basis einer bewährten KALMAN-Filterung aus dem Kfz-Bereich wird ein angepasster Filteransatz für Bewegungen in der Präzisionslandwirtschaft bereitgestellt und softwaretechnisch realisiert.

Empirische Untersuchungen und die Verifikation der Filterung unter praxisnahen Bedingungen werden in Kapitel 5 vorgestellt. Ein wichtiger Schritt zur Verifikation des in Kapitel 4 vorgestellten Lösungskonzepts ist die Kalibrierung der genutzten Sensorik unter den zu erwartenden Rahmenbedingungen, da deren Ergebnisse unmittelbar in die Kovarianzmatrix der Filterung einfließen. Die Funktionsfähigkeit des Lösungskonzepts zeigt sich im Rahmen der Verifikation der Filterung. Die Ergebnisse und mögliche Verbesserungen werden am Ende des Kapitels aufgezeigt.

Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse beinhaltet das Kapitel 6, sodass ein kurzer Ausblick und erste Aspekte zur Lösung der ausstehenden Wendeproblematik am Ende der Arbeit folgen können (7. Kapitel).

2. Stand der Forschung

2.1 Neue Wege in der Landwirtschaft

2.1.1 Präzisionslandwirtschaft

Der Begriff „Präzisionslandwirtschaft“ wird heutzutage in den verschiedensten Zusammenhängen der modernen Landwirtschaft verwendet. Er kann sowohl rein betriebswirtschaftlich betrachtet, bei einer grenzübergreifenden Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen (Gewannenbewirtschaftung), für eine „virtuelle Flurbereinigung“ (ROTHMUND 2002) als auch bei der raumbezogenen Datenverarbeitung in Form eines zusammenhängenden Informationsmanagements unter Berücksichtigung der Heterogenität des Bodens stehen (KORDUAN 2001). Der Schwerpunkt der Präzisionslandwirtschaft liegt jedoch im Bereich des technischen Pflanzenbaus. Neue und wirtschaftliche Produktionsmethoden aus dem Bereich der modernen Präzisionslandwirtschaft stellen eine Alternative zur konventionellen Landwirtschaft dar. Sie ermöglichen eine Effizienzsteigerung von Prozessen durch eine gezielte Automation in Kombination mit Datenerfassungs- und Informationsmanagementsysteme zur Optimierung von Abläufen.

Neben der Nutzung moderner Navigationstechniken (GPS) und digitaler Karten erfolgt in zunehmendem Maß eine Adaption von modernsten Steuerungs-, Sensor-, Regelungs- und Informationstechniken zur intensiveren Ressourcenausnutzung. Die Einführung und Verfügbarkeit dieser Technologien haben die Vorstellung von einer Präzisionslandwirtschaft in Deutschland erst praxistauglich gemacht. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Positionsinformation. Eine direkte Georeferenzierung von verschiedenen Ausgangsdaten wie Bearbeitungsgrenzen, Erträgen, Bodenzuständen, Fahrgassen etc. ist dadurch gegeben. Die gezielte Planung von Arbeitsabläufen und Maschineneinsätzen mit Hilfe von Positionsinformationen führt gleichzeitig zu einer nachhaltigen Transparenz bei der Kosten-/Leistungsrechnung und der Bestandsplanung. Lange Standzeiten, ungeplante Anfahrtszeiten und damit verbundene hohe Betriebskosten werden vermieden (GONDORF et al. 2006). Zu beachten ist dabei jedoch die Kompatibilität der unterschiedlichen Systeme innerhalb eines Maschinenparks, um Schnittstellenanpassungen oder Fehlereinflüsse zu vermeiden (NOACK 2007).

Gleichzeitig wächst in den letzten Jahren die Größe pro landwirtschaftlichen Betrieb und die Bearbeitungsintensität pro Flächeneinheit nachhaltig. Vor diesem Hintergrund ist der heimische Anbau ohne die Unterstützung und den Einsatz moderner Technologien vor dem internationalen Preisdruck nicht mehr möglich. Die Anbaumethoden der Präzisionslandwirtschaft sind in diesem Zusammenhang gefordert (DEUTSCHER BUNDESTAG - 16. WAHLPERIODE 2006).

Auch das Konzept, nicht das ganze Feld als kleinstmögliche Produktionseinheit, sondern kleine Schlagparzellen bzw. zukünftig sogar die Einzelpflanze und deren Wachstumsumgebung als separate Geschäftseinheit zu betrachten, gehört zur Begrifflichkeit der Präzisionslandwirtschaft. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Pflanzenposition bzw. der Anbau in gleichmäßigen Abständen oder rechteckigen Mustern (GRIEPENTROG et al. 2007). Neben der optischen Pflanzenerkennung kann die Koordinate eine neue Technologie zur individuellen Einzelpflanzenbehandlung über den gesamten Wachstumsprozess darstellen (GRIEPENTROG 2008). Bei Rübenpflanzen kann sie u.a. die Basis für eine mechanische Unkrautkontrolle sein und somit eine georeferenzierte Bestandspflege ermöglichen.

Aktuell liegt die Akzeptanz der Präzisionslandwirtschaft bei den Landwirten in Deutschland jedoch deutlich hinter den Erwartungen der Industrie und einem Vergleich mit dem Weltmarkt zurück. Umfragen haben gezeigt, dass der Anteil der Präzisionslandwirtschaft in Deutschland erst seit 2001 leicht zugenommen hat. Der Großteil der Nutzer liegt dabei flächenbedingt in den neuen Bundesländern mit einer durchschnittlichen Flächengrößen von 300 bis 400 ha. Insgesamt liegt der Anteil der Nutzer noch immer bei weniger als 10%. Dabei beschränkt sich der Einsatz der neuen Technologien hauptsächlich auf die Nutzung des GPS-Systems im Rahmen von Flächenvermessungen, Bodenqualitäts- und Ertragskartierungen. Weitere Anwendungsgebiete des GPS sind in der teilschlagspezifischen

Düngung und im Pflanzenschutz zu finden. Prognosen lassen jedoch den Einsatz von GPS-Systemen zukünftig auch in Betrieben mit deutlich kleineren Flächen erwarten (REICHARDT 2007). Von Seiten der Hersteller und aus dem Bereich der Forschung gibt es dagegen eine große Zahl neuer Trends und Entwicklungen im Bereich der Präzisionslandwirtschaft. Insbesondere werden Verfahren zur Automation von Prozessen für den Alltagsbetrieb entwickelt (ENGEL 2008).

Es ist klar erkennbar, dass eine koordinatengesteuerte Aussaat von Rübenpflanzen mittels Multi-Sensor-System und Filteransatz zu den Techniken der Präzisionslandwirtschaft gehört. Eine Automation des Saatprozesses zur individuellen Erzeugung von Pflanzabständen/Pflanzmustern sowie eine Ermittlung von Pflanzenpositionen sind durch eine solche Anbaumethode gegeben. Insbesondere die Bestandspflege im ökologischen Landbau kann von einer solchen Entwicklung profitieren. Es stellt sich die Frage, welche nutzbaren Ansätze zur Automation in der landwirtschaftlichen Produktion bereits realisiert wurden.

2.1.2 Automation in der Produktion

Die rasanten Entwicklungen auf dem Computer- und Elektronikmarkt der letzten Jahre und eine Reduktion der Größe solcher Hightech-Komponenten führen zu immer neuen Möglichkeiten einer leistungsfähigen Automation von Produktionsprozessen. Davon profitiert die Präzisionslandwirtschaft in Form von intelligenten Sensoren, steuerungsfähigen Antriebselementen und leistungsfähigen Computersystemen für Echtzeitprozesse. Dieser Verlauf ist die Basis einer modernen und nachhaltigen Präzisionslandwirtschaft, welche dem internationalen Konkurrenzkampf standhalten kann. Die angebotenen Systeme müssen dabei einfach und strukturiert sein, um Einstiegsschwierigkeiten in diese neuartigen Technologien zu minimieren und auch eine Akzeptanz bei den potentiellen Käufern zu erreichen (REICHARDT 2007). Dementsprechend haben viele Forschungseinrichtungen und auch die Hersteller landwirtschaftlicher Produkte ihre Schwerpunkte auf die Entwicklung neuer Sensorsysteme gelegt. Hierbei sind zwei Entwicklungsbereiche zu unterscheiden: die Automation einzelner landwirtschaftlicher Prozesse und die Erforschung autonomer Fahrzeuge (GRIEPENTROG 2008). Eine nähere Beleuchtung der Entwicklungsbereiche ermöglicht sowohl einen Einblick in den Stand der Forschung als auch eine Einordnung der vorliegenden Arbeit in den Kontext.

Automation von Prozessen

Die Automation von landwirtschaftlichen Prozessen basiert in der Regel auf drei Grundkomponenten: dem Datenerfassungs- oder Datenbankteil, dem echtzeitfähigen Verarbeitungsteil und unterschiedlichen Antriebs-/Sensorelementen. Dabei werden einzelne Komponenten unterschiedlicher Herkunft und Technologien in Form eines Gesamtsystems zusammengefügt. Solche Systeme kombinieren unterschiedliche Signale/Informationen eines Prozesses und bilden daraus eine Ausgangsgröße zur Führung einer automatisierten Anwendung. Erst diese Kombination von Informationen ermöglicht die Umsetzung komplexer landwirtschaftlicher Aufgaben, wie einer pflanzen- oder teilschlagspezifischen Bearbeitung mit der benötigten Genauigkeit, Sicherheit und Effizienz (OSTERMEIER et al. 2006).

Neue Möglichkeiten zur Automation von Standardprozessen findet man in vielen Teilen der Präzisionslandwirtschaft. Derzeit hat jedoch erst ein geringer Anteil die Marktreife erzielt, bzw. ist auf dem landwirtschaftlichen Markt bereits als System käuflich zu erwerben. Insbesondere Spurführungsassistenten sowie Lenk- und Wendeautomaten (Steer-by-Wire) sind bei einigen Firmen als Nachrüstsysteme mit unterschiedlicher Funktionalität zu erwerben (ENGEL 2008). Die verfügbaren Systeme sind meist modular aufgebaut und können auch bei vorhandenen Maschinen nachgerüstet werden. Sie basieren auf einer Ortungssensorik, einem Anzeigeelement und ggf. einer Antriebskomponente und bieten dabei eine Genauigkeit im Bereich von mehreren Dezimetern (HEKKERT/LENGE 2007). Das Ziel dieser Assistenten ist eine nachhaltige Unterstützung des Maschinenführers in Form von körperlicher und geistiger Entlastung sowohl bei der Bodenbearbeitung, der Saat, der Bestandspflege als auch der Ernte.

Neben den Fahrassistenten gibt es bereits einige automatisierte Anbau- und Bodenbearbeitungsgeräte für die Präzisionslandwirtschaft. Sie basieren auf einer automatischen Pflanzen- bzw. Positionserken-

nung und steuern dadurch einen speziellen Anwendungsprozess. Im Weinanbau ist dies z.B. durch eine spezielle Maschine realisiert, welche in der Lage ist, einzelne Weinstöcke mit Hilfe von GPS-Positionen zu pflanzen. Diese satellitengesteuerte Pflanzmaschine ist für den Plantagenanbau von Wein und Obst konstruiert und kann bis zu einer Arbeitsgeschwindigkeit von 4 km/h bei 1 m Pflanzabstand eingesetzt werden. Ihre Genauigkeit liegt im Subdezimeterbereich, abhängig von der kinematischen RTK-Messung und der Pflanzmechanik (FIRMA WAGNER PFLANZEN-TECHNIK GMBH 2010). Auch im Gemüseanbau gibt es erste marktreife Maschinen, welche automatisierte Anwendungen durchführen. Hierbei wird ein mechanischer Hackvorgang in den Pflanzzwischenräumen hydraulisch ausgelöst. Die Steuerung der Hydraulik erfolgt in Abhängigkeit der Pflanzenerkennung durch bodennahe Lichtschranken und der Geschwindigkeit der Maschine (FIRMA TRINKEL 2010). Auch bei den Einzelkornsäegeräten gibt es auf dem Markt Modelle mit automatisierten Arbeitsprozessen. Hierdurch können die Saatabstände in Abhängigkeit von der Fruchtbarkeit der Böden durch den Fahrzeugführer teilschlagspezifisch eingestellt werden. Auch die Erzeugung von individuellen Fahrgassen für ein verlustfreies Befahren der Nutzflächen bei Folgemaßnahmen ist durch eine gezielte Saatunterbrechung während des Gesamtprozesses möglich (SCHMITZ 2001). Neben den Komplettsystemen bieten eine Anzahl von Firmen Nachrüstmodule für konventionelle landwirtschaftliche Maschinen an, wie z.B. eine sensorgesteuerte Düngemittel- oder Spritzmittelausbringung. Anbausensoren erfassen dabei teilschlagspezifische Unterschiede und ein echtzeitfähiger Rechner steuert den Maschinenprozess (FIRMA AGRI CON 2009).

Parallel zu den marktreifen Produkten gibt es eine große Anzahl unterschiedlicher Forschungsprojekte zur Automation von landwirtschaftlichen Prozessen. Ziel der Forschungsprojekte ist die Entwicklung und Verbesserung von automatisierten teilschlagspezifischen oder pflanzengenauen Prozessen unter Beachtung einer anwenderfreundlichen Handhabung. Die entwickelten Komponenten bzw. Maschinen sollen komplexe Arbeiten mit höherer Effizienz erledigen können und den Arbeitsprozess dabei nachhaltig unterstützen. Sie sollen flexibel adaptierbar und kompatibel mit Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller sein, sodass ein teilautomatisierter oder - in Kombination mit Entwicklungen aus dem Bereich der autonomen Fahrzeuge - ein komplett gesteuerter Arbeitsprozess entstehen kann.

Ein maßgeblicher Schwerpunkt dieser Forschungen liegt im Bereich des Pflanzenschutzes und der Bestandspflege unter Beachtung ökonomischer und ökologischer Belange. Die Gründe liegen in den aktuellen EU-Richtlinien (z.B.: EU-REGULATION 2092/91). Hierdurch wird der Ressourcenverbrauch in der Landwirtschaft in Zukunft stärker beschränkt, wobei gleichzeitig die Zahl der zugelassenen Wirkstoffe im Pflanzenbau sinkt. In Deutschland wird dies durch die Vorgaben des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit realisiert, welche in den darauf aufbauenden Landesvorschriften weiter ausgeführt werden. Es gibt bereits verschiedene automatisierte Prozesse zur Reduktion bzw. Vermeidung von Herbiziden und Pestiziden. Durch eine gezielte Automation der Spritzmittelmengenausbringung und der automatischen Wahl des Wirkstoffes können z.B. 30% bis 60% der Herbizide eingespart werden. Realisiert wird dies durch Projekte mit variablen Mehrkamberspritzenanlagen, die über Informationen zum Verunkrautungsgrad und der Unkrautart agieren (PROPLANTA 2007). Die Erfassung der Verunkrautung kann im Voraus sowohl durch eine spezielle Erfassungssensorik als auch durch Koppelung eines echtzeitfähigen Erkennungsmoduls während der Ausbringung erfolgen (WEISS et al. 2008).

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist in der Automation von mechanischen Verfahren zur Beseitigung von Unkraut zu erkennen. Aktuelle Realisierungen basieren dabei auf dem Verfahren des klassischen mechanischen Hackens. In diesem Zusammenhang werden sowohl marktübliche Hacksysteme in Bezug auf eine Optimierung der Spurführung während der Längsfahrt automatisiert (GRIEPENTROG et al. 2006) als auch neue Systeme mit einer zusätzlich gesteuerten Bearbeitung der Pflanzzwischenräume entwickelt (RUCKELSHAUSEN et al. 2004). Die Grundlage der Automation liegt in der Pflanzenenerkennung bzw. der Kenntnis der Pflanzenpositionen. Dies geschieht in der Regel über verschiedene optische Sensoren bzw. Bildsensoren, kombiniert mit einer Bilderkennungssoftware (OEBEL/GERHARDS 2006). Weiterhin kommen einfache Lichtschranken für ein verlustfreies Hacken von Pflanzzwischenräumen in Reihenkulturen zum Einsatz (FIRMA TRINKEL 2010). Ein anderes System zum automatisierten mechanischen Hacken stellt die Entwicklung der sogenannten Rotorhacke dar. Auch sie dient der mechanischen Beseitigung von Unkräutern in den Pflanzzwischenräumen innerhalb

einer Reihe. In Abhängigkeit von den zuvor optisch erfassten Pflanzenpositionen und der Fahrzeuggeschwindigkeit wird bei diesem Ansatz die Umdrehungsgeschwindigkeit der Rotorhackarme geregelt, sodass ein verlustfreies, automatisches Hacken ermöglicht wird (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007, GRIEPENTROG et al. 2007).

Im Rahmen der erweiterten Bestandspflege gibt es weitere Forschungsarbeiten, wie z.B. Ansätze zur Verbesserung der gezielten Applikation von Düngemittelmengen. Die Automation der lokalen Abgabemenge soll durch Sensoren, in Kombination mit georeferenzierten Ertragskarteninformationen, verbessert und noch kleinräumiger gestaltet werden. Dies kann die Kosten und gleichzeitig die Umweltbelastung nachhaltig senken (OSTERMEIER et al. 2006). Grundlage sind hierbei Informationen zu den Pflanzenstandorten, wie z.B. Koordinaten dies ermöglichen.

Automatisierte landwirtschaftliche Prozesse sind weiterhin bei modernen Ernteprozessen oder sonstigen reihenbezogenen Applikationen zu finden. Die Grundlage dazu ist die eindeutige Reihendetektion bzw. Kantendetektion unter Feldbedingungen in Echtzeit. Laserscanner oder Kamerasysteme (u.a. Stereokamerasysteme), kombiniert mit Bildbearbeitungsalgorithmen, erfassen hierbei den Pflanzenbestand und beeinflussen die Fahrzeugrichtung direkt durch den Eingriff in die Fahrzeugsteuerung oder indirekt durch eine Visualisierung des Abstandes über eine Anzeigeeinheit. Hierdurch können beispielsweise witterungsabhängige Erntearbeiten auch bei schlechten Sichtverhältnissen zu jeder Zeit erfolgen. Unabhängig von der Fahrzeugführerkonzentration ist eine gleichmäßige, präzise und schnelle Durchführung der Erntearbeit möglich. Dies ist insbesondere für große Lohnunternehmen wichtig, um Standzeiten zu vermeiden (ROVIRA-MÁS et al. 2006).

Autonome Fahrzeuge

Die heutige Leistungsfähigkeit und die permanente Weiterentwicklung der Technik in der Automobilbranche bilden den „Innovationsmotor“ für neue Trends und Entwicklungen in der Präzisionslandwirtschaft (RATHMANN 2006). Die Entwicklungen komplett autonomer Fahrzeuge aus dem Kfz-Bereich können leicht an die Umgebungsbedingungen der Landwirtschaft angepasst werden und zur Optimierung der Produktion eingesetzt werden. Sowohl autonome landwirtschaftliche Einzelfahrzeuge als auch geführte Trabantensysteme stellen dabei einen viel versprechenden Ansatz zur Steigerung der Qualität und Quantität von Produktionsprozessen sowie einer Entlastung der Landwirte dar. Die autonomen Systeme besitzen den Vorteil durch die automatische Datenerfassung objektiver zu handeln und gleichzeitig kleinräumigere Bewirtschaftungseinheiten zu ermöglichen. Die Voraussetzungen für die Nutzbarkeit solcher Systeme liegt in einer hohen Zuverlässigkeit, kombiniert mit Benutzerfreundlichkeit und dem Sicherheitsaspekt gegenüber sich selbst und der Umwelt. Eine mögliche Schädigung von Gegenständen oder Personen würde zu unkalkulierbaren Folgen führen. Die autonomen Fahrzeuge müssen dabei in der Lage sein, sich effektiv mit der Arbeitsumgebung auseinanderzusetzen und auf räumliche und zeitliche Änderungen zu reagieren. Für ein weitgehend eigenständiges Handeln müssen die Systeme über eigene Regeln verfügen und individuelle Entscheidungen generieren können (KRAMER/SCHWARZ 2004). Diese Eigenschaften gehen somit deutlich über eine automatische Bearbeitung von Arbeits- oder Messprozessen hinaus.

Die hohen Anforderungen an die Sicherheit beim Einsatz autonomer Fahrzeuge haben dazu geführt, dass bis jetzt nur semi-autonome Fahrzeuge in Form von Master-Slave-Systemen, bzw. Trabantensysteme oder Systeme mit dezentraler Fernüberwachung von einer Leitstelle aus, realisiert wurden. Der Hauptunterschied zur komplett autonomen Fahrzeugführung besteht in der menschlichen Aufsicht, sodass das Fahrzeug keine eigenen Regeln und Entscheidungen generieren und somit, bezogen auf den Arbeitsprozess, keine künstliche Intelligenz aufweisen muss. Der gezielte und parallele Einsatz eines zweiten Arbeitssystems - sogenannter Trabanten - stellt dabei die einfachste Möglichkeit zur Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Zeiteinsparung und Entlastung bei landwirtschaftlichen Prozessen dar. Ein solches Gesamtsystem besteht aus einem führenden Mastersystem, welches die Führung und Kontrolle der Aufgaben übernimmt und einem oder mehreren Sekundärsystemen. Die Sekundärsysteme werden dabei durch eine Kommunikationsschnittstelle, z.B. durch eine Funkverbindung, vom Mastersystem geleitet und überwacht. Dadurch kann der zeitaufwändige Bearbeitungsprozess durch weitere gleichzeitige Bearbeitungsprozesse räumlich erweitert oder arbeitstechnisch ergänzt werden. In einem Projekt ist dies beispielsweise schon beim Pflügen durch einen unbemannten zweiten

Schlepper zum Drillen realisiert worden (LENGE 2007). Der Trabant wird dabei vom Hauptfahrzeug geführt und folgt diesem in einem gewissen Abstand auf identischen Fahrgassen. Die Überwachung und Steuerung des Trabanten erfolgt per Funk vom Mastersystem aus. Der Trabant kann sich dabei eigenständig über die Feldfläche bewegen und alle notwendigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen parallel erledigen.

Neben dem Einsatz von Trabantensystemen gibt es vielfältige Forschungsprojekte und Wettbewerbe zum Thema „Autonome Fahrzeuge“ und „Autonome Fahrzeugführung“. Ein Beispiel dafür ist der Einsatz eines autonomen Rasenmähers der Firma John Deere für große Flächen. Hierbei erledigt ein umgebauter „utility mower“, welcher mit einer „X-by-wire“-Technologie ausgerüstet ist, Aufgaben der Spielfeldpflege in großen amerikanischen Stadien. Die notwendige Positionierung erfolgt durch ein fest installiertes Mikrowellenreferenznetz, ergänzt durch weitere Sensoren wie Laserscanner und Inertialsensoren (ZEITZEW 2006). Die „X-by-wire“-Technologie ermöglicht sicherheitskritische Operationen - wie die Steuerung einer Maschine - nicht mehr rein mechanisch durch einen Fahrzeugführer, sondern über elektrische, elektronische, optoelektronische oder optische Steuersignale (EHRL 2007). Die Entwicklung einer in sich geschlossenen Soft- und Hardwarelösung zur Kontrolle größerer landwirtschaftlicher Maschinen, mit einem hohen Grad an Flexibilität, ist das Ziel dieser Forschung.

Im Pflanzenbau ist der Schlepper die flexibelste und am weitesten verbreitete Maschine. Deshalb wird die Entwicklung autonom arbeitender Schlepper sowohl bei den großen landwirtschaftlichen Herstellern als auch im Rahmen wissenschaftlicher Projekte vorangetrieben. Das Projekt von RESKE-NIELSEN et al. (2006) zeigt die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten autonomer Schlepper. Grundlage ist auch hierbei eine „X-by-wire“-Umrüstung in Kombination mit GPS, Fahrzeugsensorik, bzw. Inertialsensorik und Filtertechniken. Diese Maschinen sind in der Lage, durch eine zusätzliche Adaption von verschiedenen mechanischen und/oder gesteuerten Geräten, komplexe und eigenständige Aufgaben der Landbearbeitung zu übernehmen. Auch in der modernen Reisproduktion in Japan gibt es erste Projekte zum Thema der autonomen Fahrzeuge. Pflanzmaschinen, die für den Reisanbau auf überfluteten Feldern eingesetzt werden, sind dabei für einen fahrerlosen Betrieb umgerüstet worden (NAGASAKA et al. 2006). Eine Kombination aus GPS, Kreiselsystem und Software ermöglicht bei diesem Fahrzeug eine autonome Befahrung von Reisfeldern nach einer vorhandenen Applikationskarte.

Neben einem Umbau vorhandener landwirtschaftlicher Fahrzeuge nutzten andere Projekte spezielle, für einen autonomen Betrieb, entwickelte und konstruierte Versuchsträger. Diese sind jedoch nur für eine spezielle Aufgabe nutzbar. Beispiele hierzu findet man in der automatischen Bestandserfassung und/oder bei der Unkrautbekämpfung von Reihenkulturen. Die Konstruktion der Maschine muss dabei sehr beweglich sein und zur verlustfreien und gezielten Anfahrt zum Einsatzort eine große künstliche Intelligenz besitzen (OSTERMEIER et al. 2006). Eine Veröffentlichung von BAKKER et al. (2006) stellt diesbezüglich eine autonome, einzelradgetriebene Roboterplattform vor, welche eine reihenorientierte, automatische Unkrautentfernung ermöglichen kann. Basis dieser Roboterplattform ist ein Sensor-System, bestehend aus GPS, einer Kamera und einem Kompass. Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich der autonomen Fahrzeuge stellt die Weiterentwicklung der „Osnabrücker“-Querhacke dar. Auf Basis einer sensorgesteuerten Querhacke (automatisierter Prozess) sowie der Entwicklung eines autonomen Fahrzeugs zum Field Robot Event (s.u.) wird hier ein modular aufgebauter autonomer Roboter zur Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen konzipiert (RUCKELSHAUSEN et al. 2006).

Ein anderer Entwicklungsschwerpunkt aus dem Bereich der autonomen Maschinen liegt in der Konstruktion von Kleinstfahrzeugen für Aufgaben der Landwirtschaft. Sie können im Bereich der Objekterkennung, der Datenerfassung oder bei der Bestandspflege eingesetzt werden. Der Vorteil dieser Fahrzeuge liegt in ihrer Flexibilität, Wendigkeit und der geringen Größe, welche eine autonome Bearbeitung des Pflanzenbestandes ohne Verluste auch im fortgeschrittenen Wachstumsstadium erlaubt. Ein Einsatz in Gewächshäusern ist somit ebenfalls denkbar (YOUNSE./BURKS 2006). Unterstützt wird dieser Entwicklungsbereich durch den im Jahre 2003 in Wageningen (Holland) ins Leben gerufene Wettbewerb „The Field Robot Event“. Ziel dieses Wettbewerbs ist die Forcierung der verschiedenen Ingenieurtechniken in der Landwirtschaft und die Entwicklung von autonomen landwirtschaftlichen Spezialfahrzeugen. Die Aufgabe des Wettbewerbs besteht in der verlustfreien Befahrung einer bewachsenen Ackerfläche entlang der vorhandenen Pflanzreihen mit einem autonom fahrenden Kleinst-

fahrzeug im Rahmen der Unkrautdetektion (VAN HENTEN/MÜLLER 2007). Die eingesetzte Sensorik zur Steuerung und Kontrolle der Prozesse stammt bei den genannten Projekten sowohl aus der Automobilindustrie als auch aus der Vermessung und Bildverarbeitungstechnik (SCHWENKE/AUERNHAMMER 2001). Die meisten Realisierungen von autonom fahrenden und arbeitenden Fahrzeugen oder Versuchsplattformen nutzen dabei eine Kombination aus beiden Sensortypen.

Im Gegensatz zu den autonomen Fahrzeugen sind automatisierte Prozesse schon in vielen ackerbaulichen Produktionsprozessen von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte zu finden. Eine Konzentration dieser neuen Technologien ist dabei im Bereich des Pflanzenschutzes und der Pflegemaßnahmen zu erkennen. Vorteile der Automation liegen u.a. in der Reduktion von Mann-Arbeitsstunden, in der Automation von gleichen und gleichartigen Prozessen und einer kontinuierlichen Bearbeitung auch bei ungünstigen Arbeits- und Wetterbedingungen. Eine Kombination von automatisierten Prozessen mit der autonomen Fahrzeugentwicklung stellt die fortschrittlichste Technologie der Feldrobotik dar (NOERREMARK et al. 2006).

Informationsmanagement

Die Nutzung und gezielte Aufbereitung aller relevanten Einflussgrößen des Produktionsprozesses ist eine weitere wichtige Voraussetzung zur nachhaltigen Planung und Optimierung einer automatisierten Produktionskette. Sie dienen insbesondere zur Steigerung der Effizienz, zur Einsparung von Betriebsmitteln und auch zum Umweltschutz. Zudem entsteht eine verbesserte Transparenz und Kontrolle während der Produktionskette (KORDUAN 2001, LÜTTIKEN 1996). Hierbei gibt es verschiedene Arten des Informationsmanagements: die direkte Umsetzung von raumbezogenen „Real-Time“-Informationen in Form der Regelung, bzw. Steuerung von Prozessen, die Bildung von Applikationsstrategien durch gespeicherte raumbezogene Daten im Post-Processing und eine Verknüpfung und Auswertung aller Prozessinformationen mit gespeicherten Sachdaten (AUERNHAMMER 1999). Der Einsatz von modernen sensorgestützten Applikationen bedeutet aber gleichzeitig eine sprunghafte Vervielfachung der anfallenden Datenmengen. Eine Filterung und Komprimierung der Informationen ist somit zwingend erforderlich. Die Bereitstellung von Prozessdaten ist aufgrund der rechnergesteuerten Sensorik aktueller Produktionsprozesse ohne größere Zusatzkosten möglich.

Eine grundlegende Rolle bei den Aufgaben des Informationsmanagements spielt die Positionsinformation als Basis einer georeferenzierten Bewirtschaftung. Neben archivierten Informationen, wie z.B. Flurkarten für den Grenzbezug, werden aktuelle Koordinaten für eine Entscheidungsfindung benötigt. Im Pflanzenbau sind dies die Lage der Ackerflächen sowie die Positionen der einzelnen Pflanzen auf den Ackerflächen. Die Positionserfassung ermöglicht dabei eine individuelle und umweltschonende Bestandspflege sowie einen gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Idee der koordinatengesteuerten Einzelkornaussaat lässt aufgrund der Ablagepositionen eine individuelle Maßnahmenplanung, Behandlung und Kalkulation für jede einzelne Pflanze schon vor dem Aufgang zu. Weiterhin sind diese Informationen wichtig für eine automatisierte Dokumentation der ausgeführten Arbeiten und des Bestandes. Auf dieser Grundlage können u.a. Jahresbilanzen, Abrechnungen und Prognosen erarbeitet werden (STEMPFHUBER 2004).

Die generelle Bedeutung und die Notwendigkeit des Informationsmanagements für die Landwirtschaft werden durch das Projekt „preagro I+II“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstrichen. Im Rahmen des Projektes werden Hinweise über die Bedeutung einer gezielten Verknüpfung und Nutzung von Informationsquellen für die Präzisionslandwirtschaft erarbeitet und als Motivationsgrundlage präsentiert. Eine umfassendere Einführung des Informationsmanagements in der heimischen Landwirtschaft ist das Ziel des Projektes (BILL et al. 2005). Eine Nutzung von Daten im „Post-Processing“ zur Planung und Verbesserung der Bestandspflege ist bereits in landwirtschaftlichen Großbetrieben zu erkennen (KORDUAN et al. 2000). Auch erste „Real-Time“-Informationsmanagementsysteme sind heutzutage im Bereich des Flottenmanagements und der Ermittlung von Einsatzorten zu finden. Eine verbesserte Ausnutzung des betriebseigenen Maschinenparks und der benötigten Betriebsmittel wird somit möglich (AUERNHAMMER 2004).

Diese Ausführungen zeigen, dass die Realisierung einer koordinatengesteuerten Aussaat bei Reihenkulturen primär in den Bereich der Automation von landwirtschaftlichen Prozessen fällt. Der Ablage-

prozess der Saatkörner wird gesteuert, jedoch nicht ein autonomes Fahrzeug mit künstlicher Intelligenz entwickelt. Eine zukünftige Gesamtsteuerung ist jedoch denkbar. Durch die Automation des Prozesses können einerseits präzise Saatabstände geschaffen werden, andererseits die Pflanzenpositionen durch die Ablageposition über den gesamten Wachstumsprozess für eine gezielte Bestandspflege genutzt werden. Die Georeferenzierung der Einzelpflanzen ist die Basis für Informationsmanagementaufgaben mit einer gezielten Entscheidungsfindung, Planungen oder Bestandspflege.

2.1.3 Umweltschutz und Leistungssteigerung

Jede Realisierung landwirtschaftlicher Kulturen mit den Prozessen Aussaat, Bestandspflege und Ernte bewirken einen direkten und nachhaltigen Eingriff in den Naturhaushalt. Neben den positiven Aspekten wie Landschaftsstrukturierungen und Landschaftspflegemaßnahmen haben viele Maßnahmen einen nachweisbar negativen Einfluss auf die Natur und die Umwelt. Verunreinigungen des Grundwassers mit Nitraten und Rückständen von Pflanzenschutzmitteln sowie die Eutrophierung (übermäßige Nährstoffanreicherung) von Oberflächengewässern und der Rückgang der Vielfalt wildlebender Tier- und Pflanzenarten können die Folge sein. Aufgrund des gestiegenen Anspruchs der Verbraucher nach schadstofffreien und vermarktbareren Produkten und dem Wunsch nach ausreichender Verfügbarkeit ist der Einsatz von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln für den Massenmarkt unvermeidbar (DEUTSCHER BUNDESTAG - 16. WAHLPERIODE 2006).

Demgegenüber fordern neue EU-Richtlinien, wie z.B. die Pflanzenschutzrichtlinie oder die Richtlinie 2092/91, die Reduktion bzw. Unterbindung von umweltschädlichen landwirtschaftlichen Produktionsprozessen. Diese Reduktion kann nur in Kombination mit einer gezielten Applikation der Betriebsmittel im Felde und einer Senkung der Energiekosten entstehen, um den steigenden Lebensmittelbedarf zu decken. Ein Übergang zu neuen, effizienteren und gleichzeitig umweltverträglicheren Produktionstechniken ist somit gefordert.

Moderne Technologien der Präzisionslandwirtschaft besitzen das Potential, die Leistungsfähigkeit von landwirtschaftlichen Maßnahmen nachhaltig zu verbessern und gleichzeitig durch einen gezielteren Einsatz der Betriebsmittel die Umwelt zu entlasten (GANDORFER et al. 2006). Insbesondere einzelpflanzenorientierte Maßnahmen können eine großräumige Reduktion von Dünger und Pflanzenschutzmitteln bewirken. Gleichzeitig führt die individuelle Versorgung der einzelnen Nutzpflanzen zu optimalem Wachstum und höheren Erträgen über die Gesamtfläche. Die koordinatengesteuerte Aussaat kann die Grundlage für diese Anforderungen sein (ROTHMUND et al. 2007). Eine Optimierung des Saatabstandes an die Nährstoff- und Bodengefügevorkommen führt zudem zu einer Reduktion des Saatgutes und perfekten Wachstumsbedingungen (MAIDL et al. 2000). Die koordinatengesteuerte Aussaat stellt eine neue Basistechnologie für neue umweltschonende Pflanzenschutzmaßnahmen dar und führt durch eine individuelle Regelung der Saatabstände zur Ertragssteigerungen bei gleichzeitiger Bodenverbesserung (KÖNIG/KOCH 2005). Diese Tatsache in Kombination mit einer kurzen Darstellung des Stands der Forschungen im Pflanzenschutz und im ökologischen Landbau unterstreicht die Relevanz der Arbeit.

Ökologischer Landbau

Der Markt für ökologisch erzeugte Produkte gewinnt nach Aussagen des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz national wie international seit einigen Jahren zunehmend an Bedeutung. Dabei sind für die kommenden Jahre weltweit kontinuierlich steigende Wachstumsraten zu erwarten. Dies trifft auch für den Inlandmarkt mit Wachstumsraten im zweistelligen Bereich zu (BÖSE-FISCHER 2007). Der Grund hierfür liegt in der verstärkten Nachfrage der Bevölkerung nach ökologisch angebauten Produkten mit transparenten Produktionsprozessen. Gleichzeitig repräsentiert der rein ökologische Landbau eine umweltschonende Landwirtschaftsform, die auf dem Grundsatz der Nachhaltigkeit basiert. Der Schutz natürlicher Ressourcen wie Boden und Grundwasser sowie ein verantwortungsvoller Umgang mit Tieren stehen an oberster Stelle. Mit diesem Prinzip ist der ökologische Landbau ein Leitbild für die Landwirtschaft der Zukunft und unterstreicht die europäischen Bestrebungen nach erhöhtem Naturschutz.

Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz hat aus diesem Grund das Bundesprogramm ökologischer Landbau entwickelt, das die Förderung von Forschungsprojekten, die Entwicklung neuer Technologien und den entsprechenden Wissenstransfer ermöglicht. Seit dem Start dieses Bundesprogramms 2002 hat sich die Bio-Branche entschieden gewandelt. Aus dem einstigen Nischensegment ist eine Wachstumsbranche geworden, die jährlich einen zweistelligen Umsatzzuwachs (2005 ca. 15%) verzeichnet. Das Interesse der Verbraucher an Bio-Produkten ist heute so groß, dass der inländische Bio-Markt in einigen Segmenten der hohen Nachfrage nicht mehr nachkommen kann, mit der Folge, dass heimische Bio-Waren knapp werden und neue Anbaugelände geschaffen werden müssen. Des Weiteren erfordert der gestiegene Bedarf an Ressourcen im ökologischen Landbau neue und effizientere Produktionstechniken. Neue interessante Perspektiven mit gleichzeitig neuen Anforderungen an die Präzisionslandwirtschaft sind die Folge.

Der ökologische Zuckerrübenanbau ist Teil dieses aktuellen Bio-Trends. Alleine für die Herstellung vieler Biolebensmittel, wie z.B. Schokolade und Marmelade, werden in Zukunft verstärkt rein ökologisch angebaute Zuckerrüben benötigt. Der Grund liegt in der geänderten EU-Bioverordnung, nach der die Zutaten für Bioprodukte mit Biosiegel zu 95% ökologisch hergestellt sein müssen. Der sich hieraus ergebende EU-weite Bedarf an Biozucker kann zurzeit nicht gedeckt werden. Alleine in Deutschland werden erst ca. 400 Hektar Öko-Zuckerrüben angebaut. Dies entspricht nur einem Viertel der ökologischen Ackerfläche der Bundesrepublik. Die großen Zuckerkonzerne wie NORDZUCKER (2010) und SÜDZUCKER (2010) können somit den Wünschen der Großhersteller und -verarbeiter von Bioprodukten nicht ausreichend nachkommen. Alleine im Jahr 2007 hätten die Zuckerkonzerne in Deutschland mehr als 5000 Tonnen Biozucker vermarkten können, was einer doppelt so hohen Anbaufläche (800 ha) entspricht. Um die Nachfrage an Biozucker decken zu können, importiert die verarbeitende Industrie kostenintensiven Biorohrzucker aus Ländern wie z.B. Brasilien. Gründe für das Produktionsdefizit von Bio-Zucker in der EU liegen in den erhöhten Anbaukosten ohne chemischen Pflanzenschutz und den Verzicht auf Wachstumsbeschleuniger. Gleichzeitig sind die Abnahmepreise geringer als bei der Erzeugung anderer Bioprodukte wie dem ökologischen Kartoffel- und Gemüseanbau (BÖSE-FISCHER 2009). Vor diesem Hintergrund ist das Potential für den ökologischen Landbau deutlich zu erkennen. Ein Kernpunkt für eine wirtschaftliche heimische Produktion von Biozucker liegt in der Entwicklung eines funktionierenden, kostensenkenden und gleichzeitig ökologischen Pflanzenschutzes (OEKOLANDBAU 2008). Eine Lösung kann die Aussaat von koordinatenbasierten Saatemustern als Grundlage für einen verbesserten mechanischen Pflanzenschutz und gleichzeitig geringeren Arbeitskosten sein. Der Biozucker kann somit zu einer durchaus lohnenden Kultur für den heimischen Landwirt werden (ROTHMUND et al. 2007).

Pflanzenschutz

In Deutschland ist der Pflanzenschutz vorrangig durch die Regulierung der Verunkrautung auf den Anbauflächen geprägt. Das Maß der Verunkrautung beeinflusst die Entwicklung und das Wachstum der Rüben maßgeblich. Ertragseinbußen sind die Folge. Eine nachhaltige und kostengünstige Unkrautkontrolle bildet deshalb die Grundlage für eine hohe Wirtschaftlichkeit im Rübenanbau (OEKOLANDBAU 2008). Ein Großteil der Unkrautkontrolle erfolgt durch die Applikation von zugelassenen Herbiziden (BAYLFU 2009), wobei die zugelassenen Herbizide im ökologischen Landbau in Deutschland deutlich beschränkter oder ggf. vollständig ausgeschlossen sind. Die Bedeutung des Pflanzenschutzes auf die landwirtschaftliche Produktion zeigt der Kostenanteil des Pflanzenschutzes an den Gesamtproduktionskosten. Die Herbizidkosten sind im konventionellen Rübenanbau mit etwa 40% der Gesamtproduktionskosten anzusetzen (SCHMITTMANN/SCHULZE LAMMERS 2004). Im Ökolandbau kann sich der Kostenanteil des Pflanzenschutzes aufgrund eines höheren mechanischen Arbeitsanteils noch wesentlich erhöhen.

Ungeklärt ist beim Einsatz von Herbiziden die Langzeitwirkung auf den menschlichen Organismus. Aus diesem Grund ist beabsichtigt die EU-Pflanzenschutz-Richtlinien zu novellieren und somit die zugelassenen Wirkstoffe weiter zu reduzieren (WELT ONLINE 2007). Das hat zur Folge, dass viele Unkräuter überhaupt nicht oder nicht mehr wirkungsvoll chemisch bekämpft werden können. Beispiele hierfür sind die Samtpappel und der Stechapfel, die mit zugelassenen Herbizidstrategien nicht nachhaltig bekämpft werden können (EBER/MÜLLER 2007).

Die Effektivität der Pflanzenschutzmaßnahme hat dabei einen großen Einfluss auf die Ertragsleistung und die Erntequalität der Rübenpflanze. Eine Unkrautbekämpfung von 96% ist notwendig, um eine Restverunkrautung mit negativem Einfluss auf den Ertrag, die Ernte- und Verarbeitungsfähigkeit zu vermeiden (GEHRING 2006). Das Unkrautvolumen ist dabei abhängig von vielen Faktoren, wie der Bearbeitung des Feldes, der Jahreszeit, der Witterungs- und Wachstumsbedingungen und der Konkurrenzkraft der Deckfrucht. Dies führt zu einer heterogenen Verteilung der Unkräuter auf den Feldflächen, sodass eine lokale Anpassung des Pflanzenschutzes von Vorteil ist. Die Nachhaltigkeit und der Beseitigungsgrad der Unkrautkontrolle spielen somit eine entscheidende Rolle in der Rübenproduktion (GARBURG 2004).

Der heutige Pflanzenschutz kann in drei unterschiedliche Methoden unterteilt werden:

- die chemische Unkrautbekämpfung
- die physikalische Unkrautbekämpfung und
- eine Kombination aus beiden Methoden

Von den drei Methoden findet die chemische Unkrautbekämpfung in der modernen Landwirtschaft die überwiegende Anwendung (BAYLFU 2009). Aktuell werden die chemischen Pflanzenschutzmaßnahmen durch zwei Grundverfahren realisiert: die einheitliche Applikation von Herbiziden über den gesamten Feldbereich mit normalen Einkammerspritzen ohne Aufwandsmengenregulierung und die teilschlagspezifische Applikation mit einer individuellen Anpassung der Dosis und/oder des Wirkstoffes an die Unkrautsorte und die Unkrautmenge. Nach dem Pflanzenschutzgesetz von 1998 ist der Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln jedoch unter Berücksichtigung biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer, anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen auf das notwendige Maß zu beschränken; ggf. sind alternative Maßnahmen zu nutzen. Trotz erhöhter Resistenzen der Unkräuter gegenüber zugelassenen Wirkstoffen, ist die chemische Unkrautbekämpfung seit Jahren auch bei der Rübe durch den Einsatz gleichbleibender Wirkstoffe gekennzeichnet. Die Neuzulassungen sind aufwändig und selten geworden. Dies zeigt, dass neben den Entwicklungen des chemischen Pflanzenschutzes zukünftig auch wirtschaftlich alternative Pflanzenschutzmaßnahmen entwickelt werden müssen (EBLER/MÜLLER 2007). Eine Reduktion und eine gezieltere Dosierung der Spritzmengen ist dabei das Ziel der aktuellen Entwicklungen aus dem Bereich des chemischen Pflanzenschutzes (GERHARDS 2005). Eine Reduktion der Aufwandmenge kann sowohl durch eine flächendeckende Reduktion der Herbizidaufwandmenge eines Einzelstoffes pro Applikation als auch in Form einer gezielten bzw. teilschlagspezifischen Applikation der Herbizidaufwandmenge erfolgen (STAFFORD/MILLER 1993). Eine positionsgesteuerte Teilbreitenabschaltung verringert die ausgebrachte Gesamtmenge an chemischen Wirkstoffen weiterhin. Erste Realisierungen sind bereits in Form moderner Mehrkammerspritzsysteme kombiniert mit einer sensorgesteuerten Aufwandmengen- und Wirkstoffregulierungstechnik verfügbar (DICKE 2005). Eine Voraussetzung für diese Verfahren ist die Kenntnis über die Unkrautverteilung bzw. den Pflanzenzustand des Bestandes (WEIS et al. 2008). Aktuelle Forschungsprojekte sehen eine Erfassung dieser Größen in Echtzeit mit speziellen echtzeitfähigen Kamera- und Steuerungskomponenten während der Herbizidapplikation vor (GERHARDS et al. 2000). Eine Voraussetzung für die Echtzeitfähigkeit solcher Systeme ist eine schnelle Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern in der Fahrt (GERHARDS et al. 2002A/2002B). Hier ist weiteres Potential der koordinatengesteuerten Aussaat als Basis für eine schnelle und gezielte Erfassung der Nutzpflanzen zu erkennen.

Die EU-weiten Anforderungen an den Umweltschutz und der Anstieg von Resistenzen gegen genehmigte Spritzmittel führen zur Entwicklung alternativer Pflanzenschutzmethoden (KAYA/BUZLUK 2006). Aktuell werden in Deutschland lediglich 9% der landwirtschaftlichen Flächen durch physikalische Verfahren vom Unkraut befreit (MERKES 2003). Ein Grund dafür liegt im erhöhten Arbeitsaufwand und der geringeren Nachhaltigkeit der Maßnahme. Die physikalische Unkrautbeseitigung benötigt zur Erzielung eines nachhaltigen Erfolgs eine häufigere Wiederholung als der chemische Pflanzenschutz (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007). Aufgrund der aktuellen Umweltverordnungen (z.B. EU-REGULATION 2092/91) steigt der Anteil der physikalischen Verfahren als Alternative zur chemischen Unkrautbeseitigung in Zukunft weiter. Von großer Wichtigkeit bei der Entwicklung solcher nicht-chemischen Methoden ist eine ähnliche Wirtschaftlichkeit, Praxisreife und Nachhaltigkeit der

Maßnahmen (GARBURG 2004). Eine Optimierung bekannter physikalischer Verfahren kann dabei die Grundlage für eine Akzeptanz der Verfahren in der Landwirtschaft sein (GOBOR 2007). Insbesondere die aktuellen Entwicklungen der mechanischen Verfahren, unter Verwendung von Einzelpflanzenpositionen, ergeben eine vielversprechende Alternative zu den chemischen Verfahren (NOERREMARK/GRIEPENTROG 2004A). In Form von Rotorhacksystemen (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007) oder hydraulisch variable und koordinatengesteuerte Hackmaschinen versprechen sie einen Unkrautvernichtungsanteil bis zu 90% (GRIEPENTROG et al. 2006). Das Kreuzhackverfahren stellt eine weitere Möglichkeit der mechanischen Unkrautbekämpfung mit hoher Effizienz und geringen Kosten dar (NOERREMARK/GRIEPENTROG 2004A). Dazu muss ein präziser Rechteckverband der Pflanzen vorhanden sein. Durch ein rechtwinkliges Befahren können die Unkräuter sowohl in den Pflanzreihen als auch in den Pflanzenzwischenräumen durch einfache mechanische Hacksysteme beseitigt werden (vgl. Abb. 2-1). Die Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis oder Ermittlung der Pflanzenpositionen sowie die Aussaat mit definierten Saatabständen/Saatmustern (NOERREMARK/GRIEPENTROG 2004B). Dies kann sehr wirtschaftlich in Form einer koordinatengesteuerten Aussaat erfolgen (ROTHMUND et al. 2007).

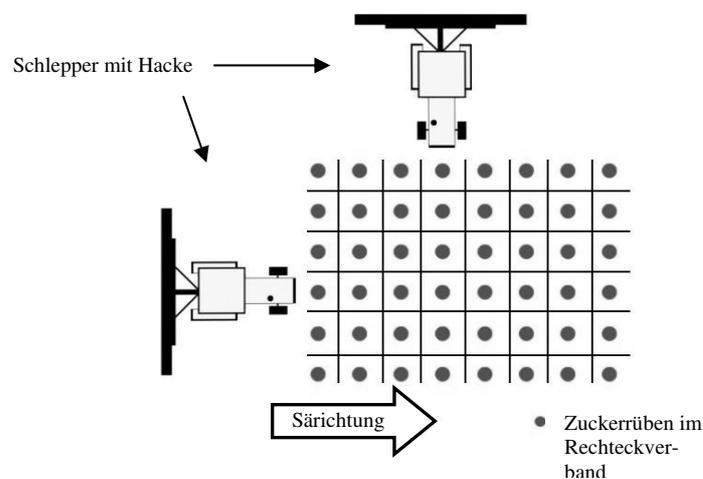


Abb. 2-1: Prinzipskizze zum Kreuzhackverfahren

Neben den koordinatengebundenen Hackverfahren gibt es auch Entwicklungen mit einer optischen Pflanzenerkennung. Die FIRMA TRINKEL (2010) hat beispielsweise ein Hacksystem mit Lichtschranken zur Pflanzenerkennung auf den Markt gebracht. Neben dem klassischen Längshacken in Aussaatrichtung erfolgt bei dieser Methode ein pneumatisch gesteuerter Querhackprozess zur umfassenden Unkrautbeseitigung in den Pflanzenzwischenräumen. Alternativ werden auch bildbearbeitende Systeme zur Pflanzenerkennung bei den mechanischen Verfahren eingesetzt (GOBOR 2007). Problematisch ist, dass die Verfahren durch die Pflanzendetektion nicht über den gesamten Wachstumsprozess nutzbar sind. Gerade Jungpflanzen sind optisch schwer von Unkräutern zu unterscheiden. Eine Unkrautentfernung zu diesem Zeitpunkt ist aber besonders wichtig, da die Jungpflanzen den Unkräutern im Konkurrenzkampf um Licht, Wasser, Boden und Nährstoffen deutlich unterlegen sind (PARISH 1990). Weiterhin befinden sich auf dem Markt Verfahren, wie Fingerhacken oder Torsionssysteme, welche aber erst ab einem gewissen Wachstumsstadium der Nutzpflanze ohne Verluste genutzt werden können (CAVALIERI et al. 2001).

Die aktuellen Forschungen verdeutlichen, dass die Aspekte Umweltschutz und Leistungssteigerung durch neue Methoden der Präzisionslandwirtschaft kombinierbar sind. Die Kenntnis der Pflanzenpositionen bzw. präzise Saatabstände in Form von Rechteckverbänden sind ausschlaggebend für eine Minimierung der Kosten, eine nachhaltige Bearbeitung und einen verbesserten Umweltschutz (ROTHMUND et al. 2008). Weiterhin wird durch die Nutzung einer koordinatengesteuerten Aussaat auch der Übergang von der teilschlagspezifischen zur einzelpflanzenorientierten Bewirtschaftung geschaffen.

2.1.4 Einzelpflanzenorientierte Bewirtschaftung

Traditionell ist die gesamte Ackerfläche oder der sogenannte landwirtschaftliche Schlag die kleinste wirtschaftliche Einheit in der Pflanzenproduktion. Dabei werden Dünger und Pflanzenschutzmittel gleichmäßig über den ganzen Schlag ausgebracht. Aufgrund der Heterogenität in der Oberflächenstruktur und der Bodenqualität der zu bewirtschaftenden Flächen zeigen sich jedoch klare Nachteile in Bezug auf die Ökonomie und die Ökologie des Anbaus. Kuppen, Senken oder Hanglagen mit unterschiedlicher Neigung führen nachweislich zu unterschiedlichen Wachstumsbedingungen. Auch unterschiedliche Bodenqualitäten innerhalb eines Schlages haben einen direkten Einfluss auf die Wasser- und Nährstoffversorgung, das Unkraut- und Krankheitsvorkommen und folglich auf die Erträge der angebauten Kulturpflanzen (BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT – JAHRESBERICHT 2003). Die aktuellen Forschungen in der Landwirtschaft sind durch den Einsatz präziser pflanzenspezifischer Technologien geprägt. Eine Veränderung in der Vorstellung und der Dimension der kleinsten zu betrachtenden Bewirtschaftungseinheit eines landwirtschaftlichen Betriebs zur Optimierung des Ertrags ist die Folge. Die hierzu erforderlichen Maßnahmen fallen unter die Begrifflichkeit der Präzisionslandwirtschaft, Teilschlagbewirtschaftung, lokales Ressourcenmanagement oder auch kleinräumige Feldbewirtschaftung (RÖMER 2001). Zu diesen Entwicklungen ist auch die koordinatengesteuerte Aussaat von Rübenpflanzen zu zählen. Neben den Vorteilen einer individuellen Aussaat sind die Positionen der einzelnen Saatpillen für eine einzelpflanzenorientierte Bestandspflege nutzbar. Die einzelpflanzenorientierte Bewirtschaftung führt dabei zu einer höheren Nachhaltigkeit der Maßnahme und zu einer besseren Umweltverträglichkeit. Die Bearbeitungsintervalle werden reduziert, Ressourcen eingespart und die Gesamtkosten des Produktionsprozesses gesenkt (GRIEPENTROG/NOERREMARK 2001).

Die Karten der Reichsbodenschätzung verdeutlichen z.B. diese Heterogenität anhand der unterschiedlichen Ackerzahlen. Die dort eingetragenen Ackerzahlen stehen für die Qualität und Fruchtbarkeit des Bodens. In Abbildung (2-2) sind die unterschiedlichen Bodenqualitäten exemplarisch für eine heimische Ackerfläche mit einer Größe von ca. 73 ha zu erkennen.

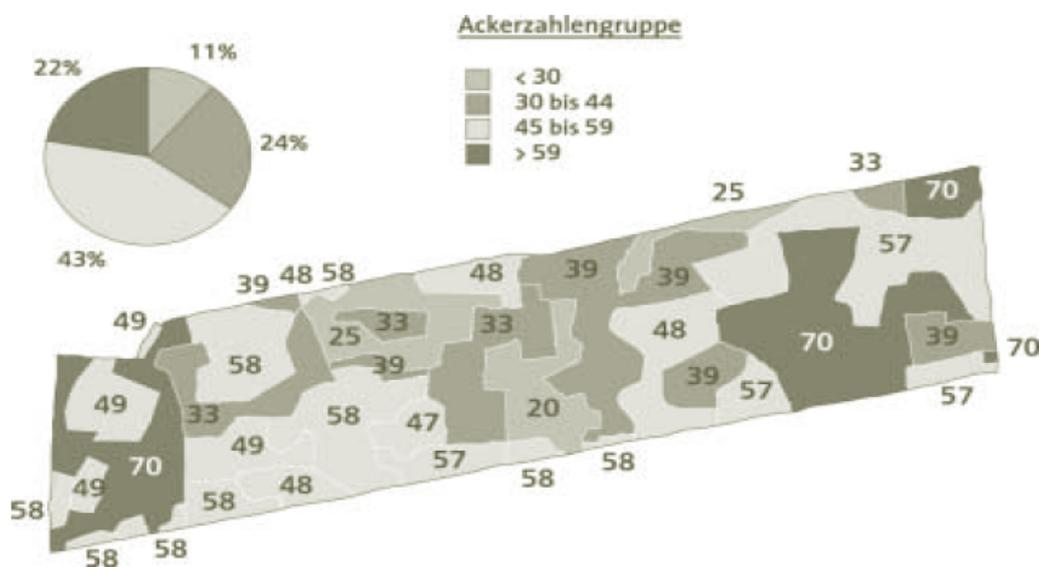


Abb. 2-2: Kartenausschnitt aus der Reichsbodenschätzung, Feldgröße 73 ha (Quelle: DEUTSCHER BUNDESTAG (2006))

Ein Übergang zur einzelpflanzenorientierten Bewirtschaftung ist die Voraussetzung für eine höhere Effektivität und Qualität des Produktes. Basis für die einzelpflanzenorientierte Bewirtschaftung ist wiederum die Kenntnis aller Pflanzenstandorte auf der Feldfläche in Abhängigkeit von einem Bezugssystem mit Genauigkeiten im Zentimeter- bis Dezimeterbereich (vgl. Kapitel 3.2). Dies kann einerseits durch eine Erfassung der Pflanzenstandorte nach dem Aufgang durch optische Sensoren und einer Bildverarbeitungssoftware erfolgen oder über den gesamten Wachstumsprozess durch die Erfassung der Koordinaten von Säpositionen. Beide Verfahren haben gewisse Einschränkungen in der Realisierung. Die Hauptproblematik der Pflanzenstandortbestimmung durch die Koordinaten der Saatposition

besteht darin, dass die Ablageposition u.U. nicht ausreichend genau mit dem späteren Pflanzenstandort übereinstimmt. Verrollungen des Saatkorns und das unterirdische Wachstum des Keimlings sind nur schwer erfassbare bzw. prognostizierbare Parameter. Eine Reduktion der Verrollung unter 1 cm ist bei einer entsprechenden Saatbettbearbeitung und einer an die Säscheibendynamik angepassten Geschwindigkeit des gesteuerten Säprozesses möglich (GRIEPENTROG/NOERREMARK 2001). Die geringsten Verrollungen werden bei einer Aussaat mit der sogenannten Nullgeschwindigkeit über Grund erreicht. Die Umfangsgeschwindigkeit der Säscheibe entspricht dabei der entgegengesetzten Fahrgeschwindigkeit der Maschine (HEEGE/BILLOT 1999).

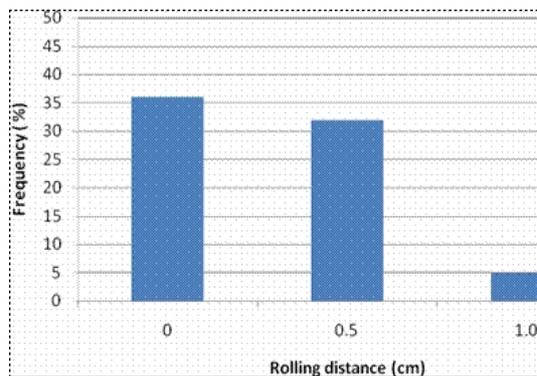


Abb. 2-3: Ergebnisse zur Verrollung von Saatkörnern des Institutes für Landtechnik Bonn 2009 (Quelle: Prof. Dr. Schulze Lammers)

Versuche des Institutes für Landtechnik der Universität Bonn zeigen für diese Parameter insgesamt Abweichungen bis max. 1 cm unter guten Saatbettbedingungen und leichten Böden (vgl. Abb. 2-3). Diese Einflüsse müssen in Form eines zusätzlichen Sicherheitsabstandes bei der Bestandspflege berücksichtigt werden (SCHULZE LAMMERS et al. 2010).

Die Alternative der optischen Pflanzenerkennung und die daraus abgeleitete Koordinatenbestimmung hat in Feldversuchen nur eine sichere Erkennung der Einzelpflanze mit etwa 75% gezeigt. Zudem sind praxisreife Realisierungen bei feldtypischen Fahrgeschwindigkeiten aufgrund der verringerten Arbeitsqualität unter Feldbedingungen (u.a. Verschmutzung, hohe Geschwindigkeit) weitgehend ausgeblieben (GRIEPENTROG/NOERREMARK 2001).

Der Trend zum einzelpflanzenorientierten Anbau verdeutlicht die Relevanz der vorliegenden Arbeit als neue Basistechnologie. Die Georeferenzierung auf dem Feld wird zukünftig die Grundlage für eine gezielte Bewirtschaftung darstellen und die Arbeiten im Pflanzennahbereich ermöglichen. Eine zuverlässige Positionsbestimmung der Einzelpflanze und die Möglichkeit zur Generierung von individuellen Saatabständen/Saatmustern ist somit maßgeblich für eine wirtschaftliche Nachhaltigkeit (GRIEPENTROG et al. 2005). Die technische Basis der modernen Präzisionslandwirtschaft wird dabei verstärkt durch vernetzte Sensor-Systeme in Kombination mit einer Steuerungssoftware geprägt, dessen Genauigkeitsansprüche mit der Präzision der Aufgaben ansteigen. Diese geodätische Mess- und Auswertetechnik kann der Schlüssel zur präzisen Georeferenzierung von Einzelpflanzen auf den Feldflächen werden. Das nächste Kapitel gibt einen kurzen Einblick in den Stand der Forschung geodätischer Sensor-Systeme.

2.2 Geodätische Sensor-Systeme

2.2.1 Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche

In der Geodäsie ist seit einigen Jahren ein Übergang von der rein beschreibenden Erfassung von Objektzuständen zu Aufgaben der Prozessbeeinflussung und -steuerung zu erkennen (KUHLMANN 2004C). Diese Tatsache lässt neue Entwicklungsschwerpunkte im Bereich der kinematischen bzw. dynamischen Messwerterfassung entstehen, die gleichzeitig neue und zuverlässige Mess- und Auswertetechniken bis in den Bereich der Echtzeitmesstechnik erfordern (KUHLMANN/EICHHORN 2003, ALKHATIB et al. 2008). Insbesondere die Kombination von schnellen und präzisen Messsensoren bzw. Sensorgruppen mit echtzeitfähigen optimalen Schätzverfahren stellt ein leistungsfähiges geodätisches Instrument dar (KUSCHE 1994). Die zusätzliche Kombination von relativ und absolut messenden Einzelsensoren als Multi-Sensor-System ergibt weitere Vorteile bzgl. der Genauigkeit, der Zuverlässigkeit und der Flexibilität des Messsystems. Zu beachten sind jedoch die unterschiedlichen Verzögerungszeiten der Einzelkomponenten, um eine zeitgenaue Erfassung eines bestimmten Objektzustandes zu er-

halten. Die Auswertungen erfolgen sowohl in „harter“ Echtzeit oder in zeitlich größeren Abständen in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit und der Aufgabenstellung (GLÄSER/SCHOLLMEYER 2004). Diese Möglichkeiten einer echtzeitfähigen und synchronen Erfassung mehrerer Objektzustände haben (Multi-)Sensor-Systeme zum Entwicklungsschwerpunkt der modernen Ingenieurgeodäsie gemacht. Selbst geodätische Einzelsensoren beinhalten heutzutage verschiedene Einzelkomponenten, die den Gesamtmeßsensor bilden. Weiterhin spielt der Nachweis der Qualitätssicherung der Ergebnisse eine immer wichtigere Rolle (KUHLMANN 1999).

Die folgenden Entwicklungs- und Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der geodätischen (Multi-)Sensor-Systeme verdeutlichen, dass insbesondere GNSS-Empfänger (SCHWIEGER/HEMMERT 2008), motorgetriebene Tachymeter (KIRSCHNER/STEMPFHUBER 2008), sowie Neigungs-, Winkel-, Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgeber (HEISTER et al. 2007) in unterschiedlichen Kombinationen ihren Einsatz finden. Für extrem schnelle und dichte 3D-Punktaufnahmen werden diese Systeme durch Laserscanner (GRÄFE 2007) oder auch Lasertracker (ELING/KUTTERER 2007) ergänzt. Kamerasysteme im Zusammenhang mit Bildverarbeitungssoftware sind eine weitere Systemmöglichkeit für eine gezielte berührungslose Datenerfassung von Objekten (STEFFEN/FÖRSTNER 2008).

Die GNSS-Technik wird in Abhängigkeit vom Anwendungsfall und den Anforderungen an die Messaufgabe als Einzelsensor oder als Bestandteil eines Sensorsystems eingesetzt (STEMPFHUBER 2004). Die absolute Koordinatenbestimmung des GNSS-Systems im 3D-Raum spielt bei vielen geodätischen Sensorsystemen eine wichtige Rolle zur eindeutigen und drifffreien Positionierung. Bei der alleinigen Nutzung von relativen Sensoren reduziert sich in Abhängigkeit von der Güte des Sensors mit der Zeit die Koordinatenqualität in Form von Drifteffekten. Auch bei der Maschinensteuerung (SCHREIBER et al. 2008, KAUFMANN/ANDEREGG 2008) und beim Monitoring von Prozessen (BORCHERS/HEER 2002) werden GNSS-Sensoren in Kombination mit weiteren Komponenten zur Positionierung genutzt.

Moderne Tachymetersysteme als auch Laserscanner sind durch die interne Kombination von mehreren Sensoren und der Software bereits an sich ein eigenständiges Sensor-System (KIRSCHNER/STEMPFHUBER 2008). Eine kinematische Nutzung der Tachymetersysteme findet heutzutage u.a. im Bereich des Verkehrswegebau und der damit verbundenen Baumaschinensteuerung mit geringeren Anforderungen an die Prozessgeschwindigkeit verbreitete Anwendung. Funktionsfähige Lösungskonzepte aus diesem Bereich gibt es bei der gesteuerten und überwachten Einbringung der einzelnen Tragschichten einer Fahrbahndecke im Straßenbau, im Bereich des modernen Eisenbahngleisbaus oder bei der Herstellung von komplexen Fahrzeugversuchstrecken (ZIMMERMANN 2004, BAYER 2004, JUNG 2008). Im Straßenbau ist die Überwachung und Steuerung von Graderbewegungen mit Genauigkeitsforderungen von 5 mm ein weiteres Aufgabenfeld von 3D-Roboter-Tachymetrie (MATTIVI 2008). Applikationen im Tunnelbau zur Steuerung von Aushöhlungsmaschinen oder Tunnelvortriebsmaschinen sowie zur permanenten Profilüberwachung basieren in der Regel auf einer Koordinaten- bzw. Orientierungsbestimmung von Totalstationen oder auf einer Kombination eines Robottachymeters mit weiteren Sensoren (CLARKE-HACKSTON et al. 2008). In Kombination mit weiteren externen Sensoren werden moderne Totalstationen im Bereich der fahrbaren Multi-Sensor-System-Plattformen genutzt. Solche Systeme werden beispielsweise als Gleismesswagen (Swisstrolley oder Racer) im Gleisbau und bei Sanierungsmaßnahmen von Schienentrassen eingesetzt (GLAUS et al. 2004), (HEISTER et al. 2007). Eine intelligente Führung bzw. Steuerung von Maschinen und Fahrzeugen mit Genauigkeiten im Subzentimeterbereich stellt ein weiteres Aufgabenspektrum geodätischer Lösungskonzepte dar. BEETZ/SCHWIEGER (2008) zeigen die Möglichkeiten eines modernen Robottachymeters in Kombination mit einer echtzeitfähigen KALMAN-Filterung für langsame bis mittlere Geschwindigkeiten. Ein weiterer Einsatzbereich von Totalstationen zur Erfassung von Bewegungen liegt im Bereich des Deformationsmonitorings bzw. der Deformationsanalyse von Bauwerken oder Landschaften. Geodätische Hangrutschungsüberwachungen dienen z.B. der Katastrophenvorsorge. Epochenmessungen über ein terrestrisches Punktnetz und daraus abgeleitete Deformationsanalysen führen zur Bildung von Deformationsmodellen, welche in Zukunft im Rahmen von Frühwarnsystemen genutzt werden sollen (BURGHAUS et al. 2009). Die Aufgabenfelder von Laserscanner sind aufgrund der hohen Punktdichte und der hohen relativen Punktgenauigkeiten sehr vielfältig (GRÄFE/HEISTER 2004). Neben der Nutzung dieser Technologie zur Dokumentation von kinematischen Prozessen in Form von Baufortschritten, bzw. bei der Deformationsanalyse während der Bauphase

(ELING/KUTTERER 2007, SCHÄFER/THOMSEN 2007), werden diese Messsysteme zur präzisen Vermessung in der kinematischen Bewegung genutzt (GRÄFE 2007). Im Gegensatz zu statischen Messungen mit einer festen Position des Laserscanners im Raum erfolgt der kinematische Einsatz der Geräte auf sich bewegenden Fahrzeugen. Die Fahrbewegung ergibt dann 3D-Punktwolken in Form wendelförmig verbundener Querprofile (METTENLEITER et al. 2008). Auf dieser Basis werden sie u.a. zur Straßenraumaufnahme und Durchfahrtsraumbemessung, zur Unfallforschung im Automobilbereich z.B. durch die VW AG und insbesondere auch zur Schienentrassen- und Gleisumgebungsvermessung eingesetzt (MILEV 2008), (RIEMENSCHNEIDER 2008). Auch Deformationsanalysen von Oberflächen mit unterschiedlicher Belastung von bewegten Objekten sind mit Laserscannern aufgrund der hohen Punktdichte detailliert möglich (ZOGG/GRIMM 2008). Eine mehrdimensionale Erfassung der Oberflächenverformung ist das Resultat. Erste Lösungskonzepte auf Laserscannerbasis zur Erfassung und Steuerung von schnellen kinematischen Prozessen sind in der Industrie zu erkennen. Dort können sie beispielsweise zur Kollisionsverhütung auf Transportwegen in der Produktion eingesetzt werden. In der Produktion bewegen sich die produzierten Objekte auf verschiedenen Förderbändern oder Schienensystemen über große Strecken mit hohen Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Produktionsstationen. Laserscanner können bei Kreuzungen oder Problembereichen die bewegten Objekte aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit in Echtzeit vollständig erfassen und nach einer intelligenten Punktwolkenverarbeitung ggf. steuernd eingreifen (HEISTER et al. 2007). Im industriellen Nahbereich mit sehr hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit werden vielfach Laser-Tracker benutzt. Im kinematischen Bereich dienen sie u.a. der Justierung (Verschiebung) von Bauteilen während der Fertigung oder der Kontrolle einer zeichnungskonformen Fertigung von Bauteilen und Strukturen (LOSER 2004).

Geodätische Multi-Sensor-Systeme mit mehreren Gerätetypen sind beispielsweise in Form von universellen Messfahrzeugen der Universität der Bundeswehr München „KISS“ und „MOSES“ entwickelt und realisiert worden (HEISTER et al. 1995, HEISTER/GRÄFE 2004). Diese Spezialfahrzeuge sind in der Lage während der Bewegung die Fahrzeugumgebung zu erfassen und georeferenziert zu dokumentieren. Aufgaben im Bereich des Straßen- und Schienennetzes wie die Bauwerkserfassung oder eine detaillierte Aufnahme der unmittelbaren Umgebungen können ohne Einfluss auf den Betriebsablauf bearbeitet werden. Weitere Entwicklungen von Sensor-Systemen sind im Rahmen von kartenunabhängigen Ortungs- und Kraftfahrzeugführungsaufgaben zu erkennen (Navigation ohne MapMatching). Eine Kombination von relativen und absoluten Sensoren ermöglicht die permanente Ortung des Fahrzeugs auch bei Ausfall einzelner Messsysteme (RAMM/SCHWIEGER 2004). Weitere Lösungskonzepte im Bereich Echtzeit-Multi-Sensor-Systeme finden bei Prozesssteuerungsaufgaben im Hoch- und Tiefbau sowie im Braunkohletagebau ihre Anwendung (BULOWSKI 2002, BAYER 2004). Die Fertigungs- oder Abbaumaschinen werden dabei durch die verschiedenen Messinformationen entlang einer Solltrajektorie im Rahmen der Genauigkeitsanforderungen gesteuert. Der moderne Gleisbau von Hochgeschwindigkeitsstrecken („Feste Fahrbahn“) und die Überwachung bestehender Gleisnetze erfordern präzise, flexibel und prozessintegriert einsetzbare kinematische Messsysteme. Hierzu werden multifunktionale Gleismesswagen genutzt, die eine Dokumentation des Zustandes bzw. die Bauvermessungen durchführen können (MÖHLENBRINK et al. 2004, HEISTER et al. 2007, GLAUS et al. 2005). Kombinationen verschiedener geodätischer Sensoren können auch zur Überwachung von Bauwerken bzw. zum Katastrophenschutz eingesetzt werden. Eine umfassendere und zuverlässigere Analyse der Situation ist hierdurch erst möglich (NEUNER et al. 2004). Interessante Anwendungen von modernen Sensorsystemen finden auch im Entwicklungsbereich der Fußgängernavigation statt. Die Zuverlässigkeit und Effizienz der Zielführung kann durch den verknüpften Einsatz mehrerer Informationsquellen gesteigert werden (MAYERHOFER et al. 2007).

Neben den dargestellten Beispielen aktueller geodätischer Lösungskonzepten zur Erfassung bewegter Objekte bzw. Prozesse gibt es eine Vielzahl weiterer Anwendungen aus dem kinematischen Bereich. Die dargestellten Entwicklungen lassen erkennen, dass die meisten geodätischen Lösungskonzepte auf Multi-Sensor-Systemen kombiniert mit abgestimmten Auswertestrategien aufbauen. Selbst moderne Einzelsensoren beinhalten bereits mehrere, verknüpfte Einzelkomponenten, welche das Gesamtmesssystem bilden. Die verknüpfte Auswertung unterschiedlichster Informationen kann eine nachhaltige Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit bewirken. Vorrangig kommen dabei zwei Grundkonzepte bei der Entwicklung von Multi-Sensor-Systemen zum Einsatz: Sensor-Systeme auf der Basis

von GNSS (z.B. RTK-GPS), kombiniert mit präzisen relativen Sensoren oder Robot-Tachymetersysteme.

2.2.2 Übertragbarkeit auf die Präzisionslandwirtschaft

Die in Kapitel 2.2.1 aufgeführten Anwendungen verdeutlichen, dass geodätisch geprägte Multi-Sensor-Systeme bereits erfolgreich in verschiedensten Bereichen der Automation, Steuerung und Dokumentation anderer Fachbereiche eingesetzt werden. Die Nutzung geodätischer Messsysteme, kombiniert mit problemorientierten Filteransätzen und geeigneten Testverfahren, stellt eine präzise Basis für unterschiedliche Problemstellungen dar, welche auch in der Landwirtschaft zu finden sind.

Ein Übergang einheitlicher Bewirtschaftungsformen auf teilschlagspezifische Anwendungen ist in der modernen Landwirtschaft bereits erfolgt. Ein weiterer Schritt zur Sicherung der heimischen Landwirtschaft im internationalen Wettbewerb stellt eine einzelpflanzenorientierte Präzisionslandwirtschaft dar, dessen Grundlage eindeutige und genaue Positionskordinaten der Einzelpflanzen auf dem Feld sind. Eine dezimeter- bis zentimetergenaue Positionierung von Maschinen und Maschinenkomponenten in Echtzeit und ein Grenzbezug für Planungs- und Kalkulationszwecke ist die Voraussetzung zur Realisierung dieser einzelpflanzenorientierten Produktionsverfahren. Die Entwicklung und Vermarktung von georeferenzierten Systemen durch Gerätehersteller aus dem Bereich geodätischer Messsysteme belegen die Übertragbarkeit auf die Landwirtschaft (FIRMA TRIMBLE 2010). Durch den Einsatz von Multi-Sensor-Systemen werden Genauigkeiten bis in den Subdezimeterbereich ermöglicht, was eine Entlastung des Fahrzeugführers und eine Steigerung der Produktivität zur Folge hat (REKOW 2001, KUTZBACH/STOLL 2004). Weitere Entwicklungen mit Mehrantennen-GNSS-Systemen zeigen zudem die Möglichkeit der Fahrzeuglage- und Fahrzeugrichtungserkennung. Hierdurch können Rollbewegungen von Landfahrzeugen gleichzeitig detektiert und in die Auswertung zur Fahrzeugsteuerung einbezogen werden (KELLAR et al. 2008). Eine Nutzung geodätischer GNSS-Systeme als Teil eines landwirtschaftlichen Sensorsystems zeigt sich auch bei vielfältigen Anwendungen des Flottenmanagements (STEMPFHUBER 2002) oder der möglichen Fahrzeugnavigation/Steuerung ohne Kartenbezug (SCHWIEGER/HEMMERT 2008). Wichtige Voraussetzung für diese Anwendungsbereiche ist eine hinreichende Synchronisation der Einzelkomponenten sowie die Echtzeitfähigkeit aller Teilsysteme (STEMPFHUBER 2004). Untersuchungen von Steinmayr et.al. (2000) bestätigen eine Übertragbarkeit bzw. Funktionalität auf Prozesse der Präzisionslandwirtschaft, welche standardmäßig eine geringe bis mäßige Geschwindigkeit aufweisen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für eine Übertragbarkeit geodätischer Systeme in die Präzisionslandwirtschaft ist der störungsfreie Betrieb der Messtechnologie unter landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen. Durch den außendiensttauglichen Aufbau der Geräte und die Einhaltung militärischer Spezifikationen bei vielen geodätischen Lösungskonzepten ist eine landwirtschaftliche Nutzung erkennbar (FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS 2010, FIRMA TRIMBLE 2010).

Die Ausführungen verdeutlichen, dass eine Übertragbarkeit geodätischer Mess- und Auswertetechnik auf viele Bereiche der Präzisionslandwirtschaft möglich ist. Eine präzise und zuverlässige Erfassung von Prozessen sowie ein Koordinatenbezug für die Durchführung von georeferenzierten Folgemaßnahmen wird ermöglicht. Auch eine Verknüpfung mit dem amtlichen Vermessungswesen und somit mit den eigentumsrechtlichen Begrenzungen der Feldflächen ist denkbar. Für eine erfolgreiche Übertragung auf die Belange der Präzisionslandwirtschaft bzw. des Rübenanbaus ist nun eine Sondierung der Rahmenbedingungen notwendig.

3 Rahmenbedingungen

3.1 Anforderungen im Rübenanbau



Abb. 3-1: Zuckerrübenpflanze

In Deutschland ist die Zuckerrübe mit ihren bis zu 30 cm langen Blättern und einer Wurzeltiefe von bis zu anderthalb Metern (vgl. Abb. 3-1) die vorrangige Kulturpflanze des Rübenanbaus. Aufgrund dessen zählt Deutschland neben Frankreich zu den größten Zuckerproduzenten in der EU. Eine erfolgreiche Massenproduktion von Rüben ist dabei von den unterschiedlichen Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen der Landwirtschaft als auch von der verarbeitenden Industrie geprägt. Eine Betrachtung der relevanten Rahmenbedingungen ist für die Konzeption/Entwicklung einer neuen Technologie und für die spätere Akzeptanz auf dem hartumkämpften Markt von entscheidender Bedeutung (SONTHEIMER 2008, WOLLENWEBER 2007). Die Einflussfaktoren des Anbaus, die Nutzung maschineller Standards und die Abschätzung der benötigten Genauigkeit für die Ablage des Saatgutes werden im Folgenden betrachtet.

Der Erfolg des Anbaus von Zuckerrüben hängt zunächst von einer gezielten Bodenbearbeitung im Herbst des Vorjahres ab. Sie ist die Grundlage für das spätere Saatbett und somit für einen zuverlässigen Aufgang der Saat wichtig. In Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit erfolgt die Bodenbearbeitung in Form eines gezielten Um- bzw. Aufbrechen des Bodens durch einen Pflug mit ausreichender Tiefe für Pfahlwurzler. Der Boden wird durch diese Maßnahme durchlüftet, gezielt bewässert und kann bis zum Frühjahr Nährstoffe aufnehmen. Die abschließende Saatbettbereitung findet anschließend im Frühjahr kurz vor der Aussaat mittels einer Kreiselegge statt. Diese Feinbearbeitung erreicht eine Tiefe von 3 – 4 cm, um das Rüben Saatgut auf festem Untergrund mit ausreichender Wasserführung ablegen zu können. Die Struktur des Saatbettes sollte dabei eben und nicht zu feinkrümelig sein. Um unbeabsichtigte Bodenverdichtungen zu vermeiden, stellt neben der Auswahl der Bearbeitungsmaschinen die Vermeidung von Bodenverdichtungen durch einen reduzierten Reifendruck oder spezielle Breitreifen eine wichtige Voraussetzung für die optimale Saatbettbereitung dar. Der Zeitpunkt für die Aussaat ist anschließend so früh wie möglich zu Beginn eines Jahrs anzusetzen, um eine schnelle Entwicklung der Blattfläche mit optimaler Nutzung der Sonnenenergie im Sommer zu erlangen. Jede Verspätung verschenkt dabei Volumen und Zuckerqualität der Rübe aufgrund der kürzeren Vegetationszeit der Nutzpflanze. Eine witterungsbedingte Bodenverdichtung wird bei der Planung des Saatzeitpunktes zusätzlich berücksichtigt. Die klassische Aussaat der Zuckerrübe erfolgt anschließend durch sogenannte Einzelkornsäegeräte (vgl. Abb. 3-2), die in der Regel zu einer Mehrreihen-Einzelkornsämaschine gruppiert werden.

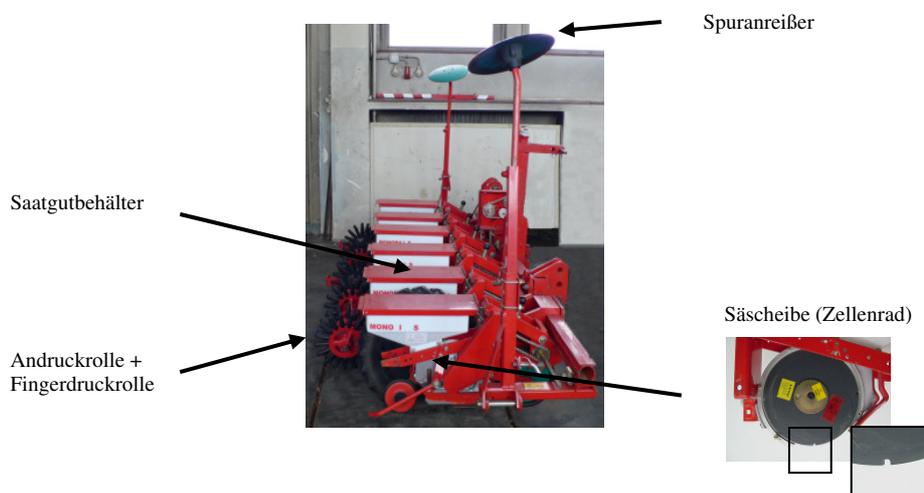


Abb. 3-2: Exemplarische Abbildung einer Mehrreihen-Einzelkornsämaschine

Die Säschar an den Pflanzgeräten erzeugt während der Aussaat eine scharf gezogene, keilförmige Saatsfurche, welche eine punktgenaue Ablage des Saatgutes ermöglicht. Ein Zellenrad sorgt für die Vereinzelung der Saatkörner und somit für eine gesicherte Einzelablage in der Saatsfurche entlang der Fahrtrichtung. Die angestrebte Erdbedeckungshöhe der Saatkörner wird durch die Andruck- und Fingerrollen der Sämaschine erzeugt. Eine wichtige Voraussetzung für einen positionsgenauen Aufgang und ein optimales Wachstum der Saat ist eine auf die Bodenqualität abgestimmte Ablagetiefe sowie Bedeckungshöhe (im Durchschnitt ca. 2 cm) und eine auf die Fahrgeschwindigkeit der Zugmaschine angepasste Säscheibengeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.1.4).

Die Kombination von Einzelkornsämaschinen zu Mehrreihen-Einzelkornsämaschinen ermöglicht eine gleichzeitige Aussaat mehrerer paralleler Reihen nebeneinander. Diese Sämethode erhöht die Wirtschaftlichkeit der Aussaat und kann gleichzeitig als Grundlage zur Erzeugung von Rechteckverbänden mit gleichmäßigen Saatabständen dienen. Untersuchungen von ROTHMUND et al. (2007) zeigen, dass insbesondere Rechteckverbände aufgrund eines einheitlichen Wachstumsradius die Erträge pro Hektar bei Zuckerrüben nachhaltig verbessern. Diese Art der Aussaat ist auch schon im Maisanbau als Gleichsaat bekannt (DEMMELE et al. 2002). Ein weiterer Vorteil liegt in einer umfassenderen mechanischen Bestandspflege in Form von rechtwinkligem Hacken bis in den Pflanzennahbereich schon während des Aufgangs der Saat, sodass die neuen Richtlinien der EU-Bioverordnung beim Anbau von Zuckerrüben erfüllt werden (vgl. Kapitel 2.1.3). Zudem entfällt während des weiteren Wachstums im Rahmen der Bestandspflege eine Pflanzenerkennung in Echtzeit. Pflanzenverluste können trotz Verringerung des Sicherheitsabstandes bei der mechanischen Bearbeitung reduziert werden (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007). Weiterhin weisen Rechteckverbände aufgrund eines deutlich kräftigeren Rübenwachstums auch eine geringere Restverunkrautung auf (BÜRCKY/LANG 2000). Aufwendige Umbauten von Maschinen während der Bestandspflege aufgrund unterschiedlicher Spurweiten können bei einer gleichabständigen und rechtwinkligen Aussaat entfallen. Die vorhandene Akzeptanz der Landwirte in Bezug auf bekannte Standardgeräte im Gegensatz zum Einsatz von kostenträchtigen Spezialmaschinen sollte zudem in die Konzeption einer koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen einfließen.

Eine weitere Rahmenbedingung bildet die sogenannte Schlagkraft. Mit ihr lässt sich beschreiben, wie viele Saatkörner pro Zeit auf einer bestimmten Fläche ausgebracht worden sind. Die Grundlage ist eine optimal angepasste Geschwindigkeit der Säscheibe an die Saatkornform, die Fahrgeschwindigkeit und die vorhandenen Bodenverhältnissen. Dabei hat die Erhöhung der Schlagkraft durch eine gesteigerte Sägeschwindigkeit mechanische Grenzen, insbesondere durch die Separation der Saatkörner für den Sävorgang. Eine exakte Vereinzelung des Saatgutes ist Voraussetzung für die Vermeidung von Fehlstellen oder Doppelpflanzungen. Die Anpassung erfolgt entweder mechanisch durch Änderung der Getriebeübersetzung oder bei elektronisch gesteuerten Maschinen durch die Anpassung der Motordrehzahl des Säscheibenantriebs an die Separationsfähigkeit der Mechanik und an die Fahrgeschwindigkeit. Die Anzahl der Kammern in der Säscheibe hängt wiederum vom angestrebten Saatabstand für Zuckerrüben ab (SCHMITZ 2001). Diese Aspekte ergeben eine Fahrgeschwindigkeit für die Aussaat der Zuckerrübe mittels Einzelkornsämaschinen von etwa 6 - 7 km/h. Dies entspricht einer mechanischen Ablage zwischen 9 und 15 Rübenpillen je Sekunde. Zusätzlich ist bei dieser Geschwindigkeit die Grenze der Funktionalität der Andruckrolle und Fingerdruckrolle erreicht. Eine ausreichende Bedeckung beeinflusst wiederum den Aufgang der Saat und damit den wirtschaftlichen Erfolg nachhaltig (BÜRCKY/LANG 2000).

Auch die Pflanzendichte ist ein weiteres Kriterium für den wirtschaftlichen Anbau von Zuckerrüben. Dabei sind gleichmäßige dichte Bestände für hohe und qualitativ gute Erträge von Vorteil. Zur Ermittlung der „richtigen“ Pflanzenzahl sind umfangreiche Versuche durchgeführt worden. Eine optimale Pflanzendichte zur Erntezeit liegt bei:

- 75.000 - 85.000 Pflanzen/ha für einen maximalen Zuckerertrag
- 70.000 - 75.000 Pflanzen/ha für einen maximalen Rübenenertrag
- 85.000 Pflanzen/ha für einen maximalen Zuckergehalt

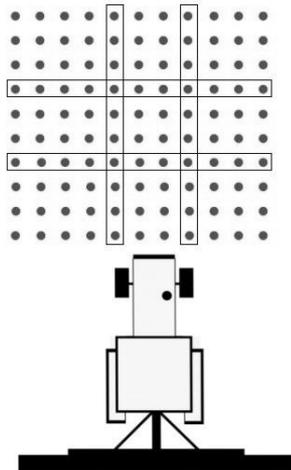


Abb. 3-3: Prinzipskizze zur Anlage von Fahrgassen

Eine optimale Zuckerrübenproduktion erfordert somit eine Pflanzendichte von etwa 80.000 Pflanzen/ha. Der Saatgutbedarf entspricht dabei jedoch nicht unbedingt der Bestandsdichte zur Ernte. Neben mangelndem Feldaufgang des Saatgutes (kalkuliert werden 20 – 30%) können weitere Pflanzenverluste während des Wachstums zu einem zusätzlichen Ertragsverlust von max. 10% führen (KASTEN 2005). Zur sicheren Erstellung einer Pflanzendichte von etwa 80.000 Pflanzen/ha wird ein erhöhter Saatgutbedarf von etwa 1,1 - 1,2 U/ha (1U entspricht 100.000 Saatkörnern) benötigt (BÜRCKY/LANG 2000). Aus dieser Anforderung lässt sich der standardmäßige Saatkornabstand bei Rübenpflanzen von 20 cm bei 45 cm Reihenweite bzw. 18 cm Abstand bei 50 cm Reihenweite begründen.

Der Anbau in Form von Rechteckverbänden erfordert eine Anpassung des typischen Reihen- und Saatkornabstands auf gleichweite Abstände. Um weiterhin eine optimale Pflanzendichte bei der Ernte von 80.000 Pflanzen/ha zu erzielen, ist eine Änderung des Saatkornabstandes auf etwa 30 cm bei 30 cm Reihenweite anzustreben (SCHMITTMANN/SCHULZE LAMMERS 2004). Eine Anpassung von standardmäßigen Sä- und Hacksystemen auf den benötigten Saatkornabstand von 30 cm ist prinzipiell möglich. Probleme ergeben sich jedoch in Form einer verlustfreien, späteren Befahrbarkeit der Feldflächen mit Maschinen. Im Gegensatz zu Reihenweiten von 45 – 50 cm ist bei einem Rechteckverband der Abstand von 30 cm für den Einsatz von üblichen Pflegebereifungen zu gering. Auf dem Markt befindliche Pflegereifen haben eine Breite zwischen 260 - 358 mm, sodass kein ausreichender Sicherheitsabstand zu den Pflanzen mehr gewährleistet werden kann. Außerdem bedeutet die Anschaffung von Sonderreifen zusätzliche Produktionskosten (KUHLMANN et al. 2008).

Eine kostengünstige und zweckmäßige Lösung zur Befahrbarkeit ist die Herstellung von gesonderten Fahrgassen (STEINBERGER 2007). Hierbei werden keine Spezialreifen benötigt und es entfallen die Umrüstzeiten auf spezielle Pflegereifen an den benötigten Maschinen. Die Anlage solcher Fahrgassen hat im Zuckerrübenanbau in den letzten Jahren an Zuspruch gewonnen. Ihre Anlage kann entweder durch gezieltes Überfahren einzelner Pflanzreihen mit Pflanzenverlusten erfolgen oder ökonomischer durch eine direkte Aussparung von einzelnen Pflanzreihen bei der Aussaat (vgl. Abb. 3-3). Eine Parallelsaat von Rübenpflanzen benötigt sowohl Fahrgassen in Längsrichtung als auch in Querrichtung, um auch ein rechtwinkliges Befahren des Feldes zu realisieren (SCHMITTMANN/SCHULZE LAMMERS 2004). Eine weitere Notwendigkeit der Anlage von Fahrgassen ist in der zunehmenden Größe und Funktionalität von landwirtschaftlichen Maschinen zu sehen. Diese Entwicklung führt zu einem Anstieg des Gesamtgewichtes der Maschinen mit der Folge einer erhöhten Bodenverdichtung der obersten Bodenschichten (BRANDHUBER 2006). Um die flächenbezogene Bodenbelastung bzw. Verdichtung nicht zu erhöhen, muss das Gewicht auf immer breitere Reifen mit einer größeren Auflagefläche verteilt werden. Zudem kann eine Verringerung des Reifeninnendrucks zu einer Erhöhung der Auflagefläche und besseren Verteilung des Gewichtes auf den Boden führen. Erst die Anlage von speziellen Fahrgassen erlaubt den Boden mit diesen Reifenbreiten ohne erhöhte Verluste zu bearbeiten. Ein weiterer Aspekt für die Bildung von Fahrgassen liegt in der gestiegenen Maschinenbreite mit einer reduzierten Übersichtlichkeit. Ohne die Anlage von Fahrgassen ist der exakte seitliche Anschluss an die vorherige Fahrspur bei der Feldbearbeitung erschwert. Die Fahrgasse dient somit neben der verlustfreien Befahrung gleichzeitig der Orientierungshilfe bei der großflächigen Bearbeitung (BRÜCKY/LANG 2000). Die koordinatengesteuerte Aussaat stellt in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit zur Planung und Realisierung von Fahrgassen dar. Durch den Koordinatenbezug kann das Särad während der Aussaat entsprechend abgebremst und anschließend wieder beschleunigt werden, um Lücken für die Anlage von rechtwinkligen Fahrgassen zu erzeugen. Dabei ist die Massenträgheit der Maschine zu beachten, welche ein beliebiges Beschleunigen der Särscheibe ausschließen. Eine gezielte

Fahrgassenabschaltung bei der Anlage von Fahrgassen ist somit eine weitere Anforderung für eine erfolgreiche Konzeption von modernen Sämaschinen im Rübenanbau (SCHMITZ 2001).

Weitere Rahmenbedingungen an den Rübenanbau ergeben sich durch die Form/Begrenzung der Feldflächen. Die Parzellierungen von landwirtschaftlichen Flächen als auch die Formgebung der natürlichen Feldbegrenzungen führen vielfach zu keinen rechteckigen Anbauflächen. Eine Aussaat parallel bzw. rechtwinklig zu den Feldgrenzen als Rechteckverband ist somit selten möglich. Zudem kommen bei der Einzelkornsaat sehr breite Mehrreihensämaschinen mit einer flexiblen Reihenzahl von bis zu 18 Reihen zum Einsatz (SCHMITZ 2001). Eine Folge der Maschinenbreite und einer nicht rechteckigen Feldstruktur ist, dass nicht alle Säaggregate der Maschine gleichzeitig die Feldbegrenzung bzw. die Grenze zur Wendefläche der Zugmaschine für die nächste Saatspur (Vorgewendefläche) erreichen (vgl. Abb. 3-4).

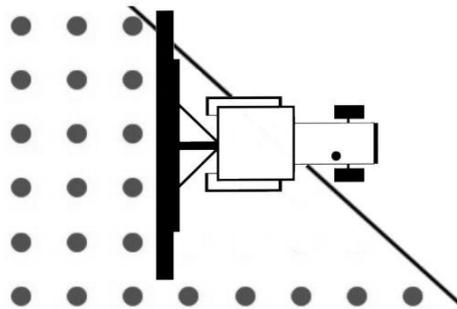


Abb. 3-4: Prinzipskizze zur Teilflächenabschaltung an Feldgrenzen

Eine effektive Flächenausnutzung verlangt jedoch ein Einsäen jeder Reihe bis zur Bearbeitungsgrenze. Um ungenutzte Freiflächen zu vermeiden, sollte eine mechanische oder elektronische Abschaltung der einzelnen Säaggregate zu unterschiedlichen Zeitpunkten möglich sein. Die Ermittlung von Ablagekoordinaten für jedes einzelne Säaggregat und der Koordinatenbezug zu den Bearbeitungsgrenzen sind hierzu erforderlich. Voraussetzung ist ein einheitlicher Koordinatenbezug der Säaggregate und der Bearbeitungsgrenzen.

Für die Konzeption einer koordinatengesteuerten Aussaat von Reihenkulturen können sich weitere Anforderungen durch Neigungsunterschiede der Feldoberfläche ergeben. In der Regel sind die Feldoberflächen trotz einer ausgeprägten Saatbettbereitung nicht eben. Längs- oder Querneigungen der Feldoberflächen sowie lokale Mulden oder Erhebungen führen zum Kippen der Maschine. Auch ein Einsinken einzelner Räder in die frisch bearbeitete Feldoberfläche lässt Neigungseffekte entstehen (vgl. Abb. 3-5).

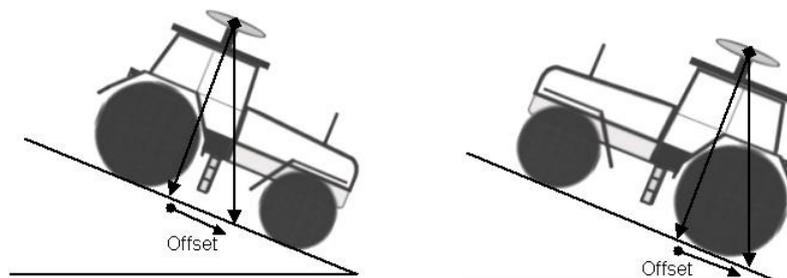


Abb. 3-5: Prinzipskizze zu den Fehlereinflüssen in der Positionsbestimmung bei konstanter Neigung

In Abhängigkeit von der Montagehöhe und -position der koordinatenerzeugenden Sensoren ist eine Korrektur des Koordinatenbezugspunktes gegenüber dem theoretischen Bezugspunkt erforderlich. Die Thematik der Verkippung der Sensorik auf der Maschine bei der Aussaat ist somit ggf. bei der Positionsberechnung einer koordinatengesteuerten Aussaat zu berücksichtigen, um einen Versatz in den Reihen zu vermeiden (KUHLMANN/HEISTER 2006). Die Größenordnung kann der Tabelle (1) anhand

eines Beispiels entnommen werden. Grundlage für diese Abschätzungen ist ein Achsabstand von 5,5 m, eine Spurweite von 2 m und eine Sensormontagehöhe (z.B. GPS-Antenne) von 3 m über der Mitte der Hinterachse.

Situation	Horizontale Abweichung
Höhenunterschied von 10 cm zwischen linkem und rechtem Rad der Maschine	15 cm
Höhenunterschied von 10 cm zwischen hinterer und vorderer Achse der Maschine	5 cm
Höhenunterschied bei 10% Feldneigung	30 cm

Tabelle 1: Geometrische Neigungseinflüsse bei einer Sensorhöhe von 3 m über der Feldoberfläche

Liegt jedoch eine konstante Neigung der Maschine über den gesamten Säprozess vor, so entsteht ein konstanter Versatz, der keinen relevanten Einfluss auf die Bildung von gleichmäßigen Saatzeilen bzw. eines Rechteckverbandes hat. Erst bei der Nutzung absoluter Säpositionen für weitere landwirtschaftliche Maßnahmen ist eine Korrektur der Ablagepositionen nötig.

Neben den Anforderungen an einen optimalen und wirtschaftlichen Anbau von Rübenpflanzen ist bei der Konzeption eines neuen Verfahrens der erforderliche Genauigkeitsrahmen von Bedeutung.

3.2 Genauigkeitsanforderungen

Die Abgrenzung des Genauigkeitsrahmens für die koordinatengesteuerte Aussaat ist eng mit den Genauigkeitsanforderungen bzw. der maximalen Pflanzennähe der landwirtschaftlichen Folgeprozesse gekoppelt. Alle Folgeprozesse sollen nachhaltig, jedoch ohne Verluste, durchführbar sein. Dies erfordert eine Aufteilung der Anbaufläche in verschiedene Bearbeitungsbereiche (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007). In der Fachliteratur wird die Feldoberfläche bei der Bearbeitung von Reihenkulturen, wie dem Zuckerrübenanbau, in drei unterschiedliche Bereiche mit abweichender Bearbeitungsfähigkeit unterteilt (vgl. Abb. 3-6).

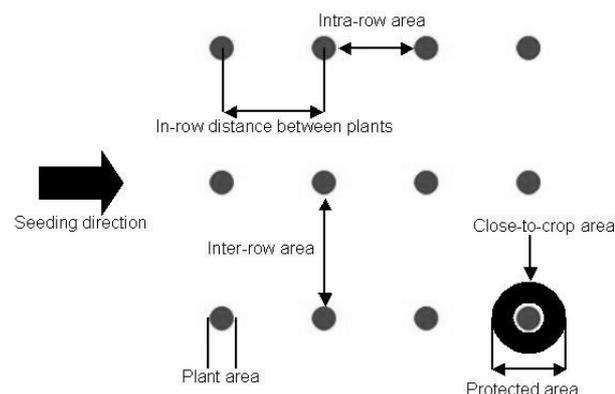


Abb. 3-6: Bearbeitungsbereich bei Reihenkulturen

Der erste Bereich ist zwischen den einzelnen Reihen in Aussaatrichtung („inter-row area“). Dieser Bereich ist unproblematisch zu bearbeiten und aufgrund der Aussaatrichtung befahrbar, sodass verschiedene Bearbeitungsverfahren, wie das mechanische Hacken, in diesem Bereich effektiv und nachhaltig durchgeführt werden können. Der zweite Bereich umfasst die Fläche in den Pflanzzwischenräumen innerhalb einer Reihe („intra-row area“), welcher nur mit speziellen Verfahren verlustfrei bearbeitet werden kann. Das Kreuzhackverfahren oder das Rotorhacksystem, in Kombination mit bekannten präzisen Pflanzenpositionen, können hier eingesetzt werden. Der dritte Bereich ist der Pflan-

zennahbereich in Form eines Kreises um die Nutzpflanze („close-to-crop area“). Dieser Bereich wird wiederum in zwei schutzbedürftige Flächen („protected area“) unterteilt: der Wachstumsbereich der Nutzpflanze im Zentrum („plant area“), welcher von der Pflanze an sich (Wurzel und Phyllotaxis) in Anspruch genommen wird und der umgebende Schutzring. Die Größe des inneren Schutzbereichs ist sowohl von der Pflanzenart, der Robustheit als auch von der Bodenbeschaffenheit und den eingesetzten Maschinen abhängig. Außerdem variiert sie aufgrund des Pflanzenwachstums (NOERREMARK/GRIEPENTROG 2004B).

Bei modernen Anbauprozessen mit hohen Ertragsanforderungen ergibt sich bei der Bearbeitung bis in den Pflanzennahbereich ein Konflikt zwischen der optimalen Pflanzennähe und der Vermeidung von Pflanzenverlusten oder -beschädigungen. Ein ungestörtes Wachstum der Pflanze erfordert eine Bekämpfungsleistung im Rahmen der Unkrautkontrolle von über 90%. Somit muss auch eine Bekämpfung in den Zwischenraumflächen gewährleistet sein (GEHRING 2006, MAY 2001). Zur Vermeidung von Einbußen darf in der „close-to-crop area“ jedoch keine tiefere Bodenbearbeitung erfolgen (BLACKMORE et al. 2005).

Diese Aspekte zeigen eine Abhängigkeit der Genauigkeitsanforderungen einer koordinatengesteuerten Aussaat vom Streben nach einer umfassenden Bearbeitung bis an die schutzbedürftigen Zonen. Um größere Pflanzenverluste oder geringere Hackbreiten mit einer geringeren Effektivität zu vermeiden, sollte die Genauigkeit der Pflanzenpositionen höher oder gleich der minimalen Ausdehnung der zweiten Schutzzone ausfallen. Die Größe dieser Schutzzone ist wiederum abhängig von der Art der mechanischen Bearbeitung und der Nutzpflanze. Beim mechanischen Hacken von Zuckerrüben beträgt die Breite dieser Schutzzone etwa 2 cm. Selbst bei Jungpflanzen werden 2 cm angesetzt, da sich ansonsten das Risiko einer Entwurzelung durch Pflegemaßnahmen erhöht (NOERREMARK et al. 2006).

Hieraus kann eine Genauigkeitsanforderung an die Pflanzenstandorte von max. 2 cm abgeleitet werden, um Pflanzenverluste bei einer mechanischen Bearbeitung möglichst gering zu halten. Diese hohen Genauigkeitsansprüche werden durch Versuche zur mechanisch Unkrautbeseitigung mit einem Saatabstand von wenigen Dezimetern (beispielsweise bei Zuckerrüben ca. 0,3 - 0,4 dm) durch das Institut für Landtechnik der Universität Bonn (GOBOR 2007) und durch weitere Publikationen bestätigt (GRIEPENTROG et al. 2003). Eine umfassende Unkrautbeseitigung („inter-row area“ und „intra-row area“) in Reihenkulturen mit mechanischen Verfahren wird somit möglich. Diese hohe Genauigkeitsanforderung muss bei einer üblichen Saatgeschwindigkeit von ca. 6 km/h (2 m/s) realisiert werden.

Die Genauigkeitsanforderung an die Pflanzenstandorte enthält wiederum folgende relevante Einflüsse:

- die koordinatenmäßige 2D-Positionsabweichung der Maschine
- ggf. Steuerungsdefizite des Sägeräts
- das zufällige Rollen/Fallen der Saatkörner auf der Ackerkrume < 1 cm

Auf der Grundlage dieser Einflüsse muss für die koordinatengesteuerte Aussaat von Zuckerrüben eine reine Lagegenauigkeit der Maschine von $\sigma < 2$ cm erzielt werden. Voraussetzung dafür ist neben einer ausreichenden mathematisch-physikalischen Modellierung der Trägheit des Systems ein geeignetes Sensorsystem zur messtechnischen Erfassung der Bewegung in Echtzeit. Ein geodätisches Sensorsystem zur Steuerung der koordinatengesteuerten Aussaat im Rechteckverband stellt eine messtechnische Lösung in Bezug auf die gestellten Anforderungen dar. Die koordinatengesteuerte Aussaat von Zuckerrüben im Rechteckverband als Basis einer mechanischen Bearbeitung der Pflanzenzwischenräume von > 90% wird im folgenden Kapitel näher vorgestellt.

3.3 Koordinatengesteuerte Aussaat im Rechteckverband

Der Trend zur Aussaat in Saatmustern und zur Betrachtung der Einzelpflanzen als kleinste wirtschaftliche Einheit ist für die zukunftsfähige Landwirtschaft schon heute zu erkennen (RUCKELSHAUSEN et al. 2006). Insbesondere für eine ökologische Bestandspflege ist dies Voraussetzung (vgl. Kapitel 2.1).

Die Ermittlung der Pflanzenstandorte kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- durch eine optische Echtzeiterkennung der Pflanze während der Maßnahme
- durch eine gesonderte Erkennung und Kartierung in Applikationskarten
- durch die Ermittlung des Pflanzenstandortes über die Ablagepositionen einer koordinatengesteuerten Aussaat bei Reihenkulturen

Die koordinatengesteuerte Aussaat bei Reihenkulturen ist neben einer Georeferenzierung von Teilflächen bzw. Einzelpflanzen in der Lage gleichzeitig individuelle Saatmuster, wie den Rechteckverband, zu bilden (RÖMER 2001). Die Georeferenzierung erfolgt durch eine direkte oder spätere Nutzung der Koordinaten zum Zeitpunkt der Ablage. Auf diese Weise kann eine spätere Ermittlung der Pflanzenpositionen für georeferenzierte Folgemaßnahmen entfallen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Durchführung gezielter Pflanzenschutz- oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen bereits vor dem Auflaufen der Pflanzen über die exakten Ablagepositionen (GRIEPENTROG et al. 2003). Beispielsweise sind ein nachhaltiges mechanisches Hacken mit großer Effizienz (GOBOR/SCHULZE LAMMERS 2007) sowie die automatisierte Anlage von Fahrgassen erst hierdurch möglich (vgl. Kapitel 3.1). Durch die gleichmäßigen Reihenabstände über die Feldfläche können außerdem zeitintensive Anpassungen der Arbeitsbreite im laufenden Betrieb entfallen.

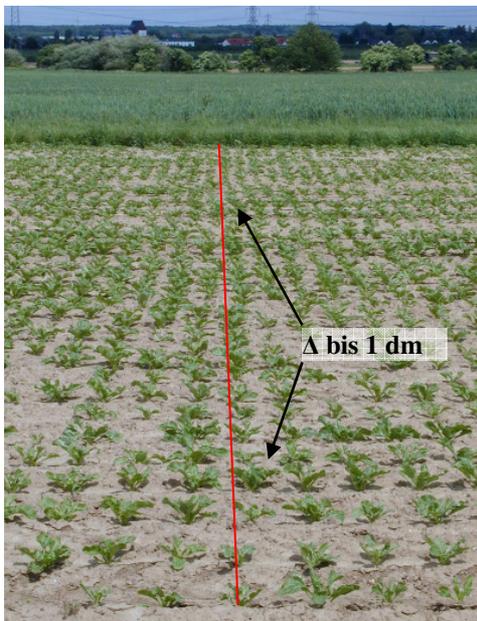


Abb. 3-7: Herkömmliche Anbauversuche von Zuckerrüben des Instituts für Landtechnik Bonn 2002

Die konventionelle Aussaat führt hingegen konstruktionsbedingt durch die rein mechanische Ablage zu zufälligen Abweichungen in den Saatabständen, welche insbesondere bzgl. der Wasser- und Nährstoffverteilung und der abstandsbedingten Unkrautunterdrückung Nachteile erzeugen. Das Defizit von ungesteuerten, konventionellen Sämaschinen zur Erzeugung von Rechteckverbänden liegt in der starr gekoppelten Ablagemechanik. Der Antrieb und die Synchronisation der Säaggregate erfolgen in der Regel durch mechanische Antriebe. Abweichungen in Form von „Schlupf“ oder Einsinken können nicht kompensiert werden (WIESEHOFF/KÖLLER 2004). Außerdem ist ein exakter Reihenanschluss einer neuen Säspur an das vorherige Sämuster konventionell nur unzureichend möglich. Ein Versatz der Gesamtspur sowie ein Verlust der Rechtwinkligkeit sind die Folge. Versuche des Institutes für Landtechnik der Universität Bonn mit einer mechanisch synchronisierten Mehrreihensämaschine und mechanisch positionierten Anschlussfahrten nach der Wende haben im Vorfeld dieser Arbeit keine zufriedenstellenden Resultate bzgl. verlustfrei nutzbarer Querreihen ergeben (vgl. Abb. 3-7). Es zeigte sich ein deutlicher Versatz der Zuckerrüben zwischen den einzelnen Aussaatspuren bis

in den Dezimeterbereich, sodass ein rechtwinkliges Befahren der Reihenkulturen ohne Verluste nicht möglich ist.

Erst moderne Antriebstechniken in Form von leistungsstarken Schrittmotoren und Motorsteuerungen bilden die Grundlage für die Umsetzung von ausreichend gleichabständigen Saatmustern mit ausreichender Genauigkeit (GRIEPENTROG et al. 2005). Der Säabstand der Kulturpflanzen kann dabei sehr einfach und flexibel innerhalb eines Feldes auf die Anforderungen des Wachstums, die Örtlichkeit und die bearbeitenden Maschinen durch eine kurzfristige Variation des Säabstandes abgestimmt werden.

Eine (koordinatengesteuerte) Aussaat im Rechteckverband mittels einer mehrreihigen Einzelkornsämaschine, wie sie z.B. bei Zuckerrüben mit einem Saatabstand von 30 cm bis 45 cm zum Einsatz kommt, hat folgenden prinzipiellen Ablauf (vgl. Abb. 3-8):

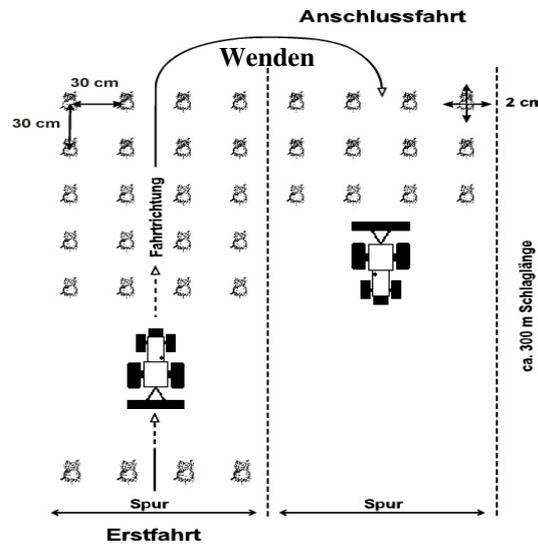


Abb. 3-8: Prinzipskizze einer (koordinatengesteuerten) Parallelsaatschleife mit Einzelkornsämaschinen

Ausgehend von einer bestimmten Startposition erfolgt die Aussaat mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von ca. 6 km/h entlang einer Richtung ggf. mehrreihig über die gesamte Schlaglänge (Erstfahrt in Längsrichtung). Am Ende des Schlags wird die Sämaschine ausgehoben und es erfolgt eine Wendefahrt bis zum Start der Anschlussfahrt. Die angestrebten durchschnittlichen Schlaglängen in Deutschland betragen dabei mehr als 300 m Länge (DIETZEL et al. 2000). Im weiteren Verlauf des Prozesses wird die Sämaschine wieder eingesetzt und es beginnt die erneute Längsbewegung der Maschine (Anschlussfahrt). Die Längsbewegung erfolgt im Idealfall gleichmäßig entlang eines Schlags. Sie benötigt dabei sehr genaue, relative Positionsinformationen in Fahrtrichtung, um eine exakte Führungsgröße für die Ablage der Saatkörner zu garantieren. In diesem Zusammenhang spielt sowohl das Genauigkeitspotential der Sensoren als auch die physikalische Trägheit der Gesamtmaschine eine wichtige Rolle.

Die koordinatengenaue Ablage der Saatkörner stellt somit eine erfolgsversprechende Lösung für viele Ideen und Entwicklungen aus dem landwirtschaftlichen Bereich dar. Eine ausreichende Genauigkeit von $\sigma < 2$ cm (vgl. Kapitel 3.2) kann erst durch ein geodätisches Sensorsystem in Kombination mit einer mathematisch-physikalischen Modellierung der Bewegung bzw. Trägheit der Maschinenbewegung in Form einer Filterung erreicht werden (vgl. Kapitel 4).

4 Ein Lösungskonzept

4.1 Strategie

Die Realisierung eines Lösungskonzepts zur Erzeugung von gesteuerten Längs- und Querreihen unter Beachtung der in Kapitel 3 vorgestellten Rahmenbedingungen erfordert zunächst eine strukturierte Lösungsstrategie. Abbildung (4-1) stellt diese in Form eines Flussdiagramms dar.

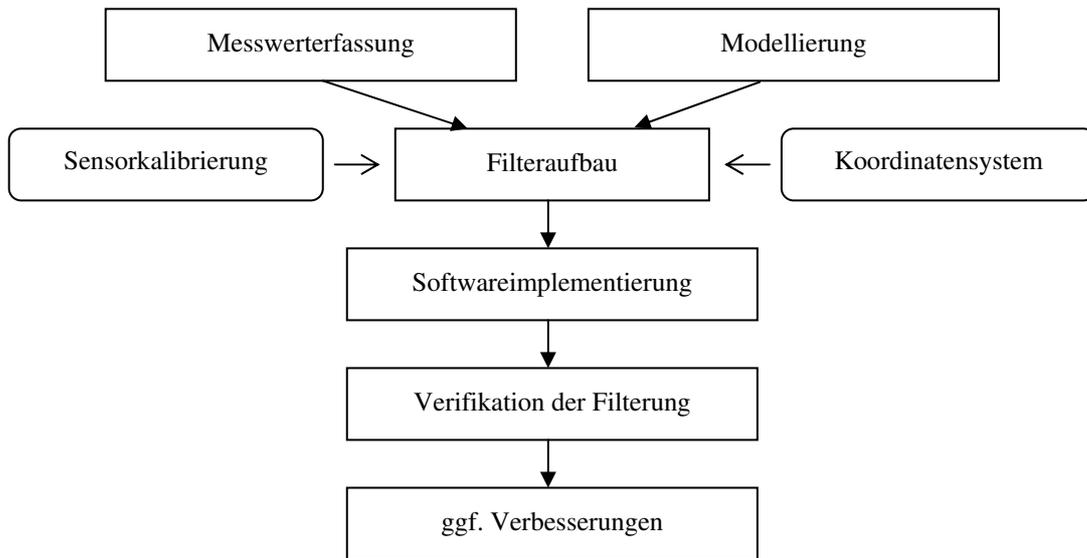


Abb. 4-1: Teilschritte zur Umsetzung des Projektes

Neben einer messtechnischen Erfassung des bewegten Säprozesses werden weitere Informationen über das Bewegungsverhalten benötigt (Modellierung). Der Grund hierfür liegt in der geringen bzw. fehlenden messtechnischen Überbestimmung der Positionsbestimmung innerhalb einer Bewegung (ein Messwert pro Sensor und Trajektorienposition). Weiterhin ist eine Übertragung der unterschiedlichen Koordinaten bzw. Messdaten in ein geeignetes gemeinsames Gebrauchskoordinatensystem erforderlich, um die unterschiedlichen Messdaten direkt miteinander verknüpfen zu können. Dabei muss eine echtzeitfähige und synchronisierte Messdatenerfassung mit entsprechend geringen Verzögerungszeiten realisiert sein. Bei Geschwindigkeiten von etwa 2 m/s während der Einzelkornsaat wirken sich Defizite in der Echtzeitforderung und Synchronisation von > 1 ms schon negativ auf die Ablagesteuerung aus. Um die geforderte Genauigkeit von $\sigma < 2$ cm für die Ablageposition einzuhalten, sollten diese Fehlereinflüsse um den Faktor 5 bis 10 geringer ausfallen (WITTE/SCHMIDT 2006). Die Messwerte und die modellierte Fahrzeugbewegung in Form von Systemgleichungen werden zusammen mit dem stochastischen Modell in einer gemeinsamen Filterung ausgewertet. Dies führt zu einer Verbesserung bzw. Glättung der Bewegung entlang der Fahrzeugtrajektorie.

Die Kalibrierung und Genauigkeitsanalyse unter den späteren Rahmenbedingungen liefern die Parameter des stochastischen Modells der KALMAN-Filterung (Messrauschen). Für die Aussaat in Längsrichtung ist die Untersuchung des Weg- bzw. Geschwindigkeitssensors und des absoluten Positionssensors von primärer Wichtigkeit. Unter Beachtung der unterschiedlichen Koordinatensysteme und des Bewegungsmodells erfolgt der Aufbau einer geeigneten Filterung. Eine erste Softwareimplementierung zur Bestimmung der Ablagekoordinaten und die Erzeugung der Führungsgröße für den Ablagevorgang in Echtzeit wird mit Hilfe einer hardwarespezifischen Programmiersprache (LabView) realisiert (FIRMA NATIONAL INSTRUMENTS 2010). Die Verifikation des Gesamtsystems unter Feld- oder feldähnlichen Bedingungen zeigt die Funktionalität der Filterung für die Längsfahrt und lässt eventuelle Schwächen erkennen. Die Erkenntnisse aus den ersten Versuchsfahrten zeigen das Potential dieses Ansatzes zur koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben und lassen zukünftige Verbesserungen erkennen.

4.2 Messwerterfassung

4.2.1 Das Multi-Sensor-System

4.2.1.1 Konzept

Vor dem Hintergrund der geforderten Genauigkeit für die Positionsbestimmung von $\sigma < 2$ cm bei Geschwindigkeiten von $v = 2$ m/s (vgl. Kapitel 3.2), der Echtzeitfähigkeit und der Dynamik der Sämaschine ist zu erkennen, dass eine Einzelsensordlösung z.B. alleine durch GPS nicht ausreicht. Erst eine geeignete Kombination von Einzelsensoren und eine echtzeitfähige Auswertung können diese Genauigkeiten in der Bewegung erreichen. Hierdurch wird eine vollständige Bestimmung der Bewegung zu jedem Zeitpunkt ermöglicht. Einzelsensoren können meist nur einen bestimmten Teil der Bewegung eines Objektes mit der benötigten Genauigkeit erfassen, jedoch nicht die vollständigen Bewegungsabläufe. Die Frage nach der Genauigkeit, bezogen auf den Messbereich des Sensors, spielt eine wichtige Rolle, sodass kurzzeitig genaue Einzelsensoren für die absolute Lage des Objektes im Raum nicht ausreichen. Somit hat jeder Sensor sein spezielles Anwendungsspektrum. Durch eine kombinierte Auswertung der verschiedenartigen Messwerte und eine zusätzliche Glättung dieser, durch ein Bewegungsmodell, kann erst eine realitätsnahe Erfassung der Umwelt ermöglicht werden (EICHORN 2005). Charakteristisch für aktuelle Entwicklungen aus dem Bereich der Multi-Sensor-Systeme ist der Übergang von zeitdiskreten Einzelmessungen mit niedrigen Erfassungstaktraten zu quasi kontinuierlichen Messungen bei der Erfassung von kinematischen Bewegungen (KUHLMANN 2004B).

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist das folgende geodätische Multi-Sensor-System (vgl. Abb. 4-2) zur koordinatengesteuerten Parallelsaats bzw. zur koordinatenbasierenden, mechanischen Unkrautbekämpfung bei Reihenkulturen (insbesondere bei Zuckerrüben) zusammengestellt worden:

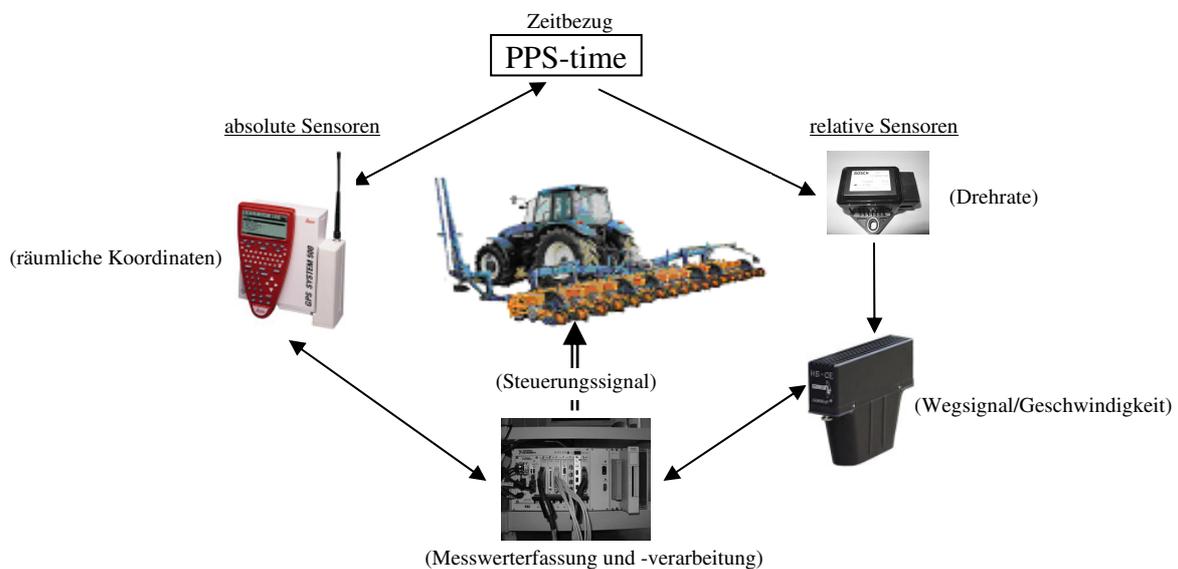


Abb. 4-2: Konzept eines Multi-Sensor-Systems für die Längsfahrt

Als absoluter Sensor kommt ein geodätischer 2-Frequenzempfänger im „RealTimeKinematik“-Modus zum Einsatz, welcher die Möglichkeit der Ausgabe eines hochgenauen, systemgestützten Zeitsignals („PulsePerSecond“-Signal) zur zeitlichen Synchronisation der unterschiedlichen Messsysteme besitzt. Bei der geforderten Genauigkeit von $\sigma < 2$ cm und dem aufgezeigten Geschwindigkeitsbereich muss eine zeitliche Zuordnung von weniger als 5 ms erreicht werden. Dies ist mit Hilfe des PPS-Signals leicht zu erreichen (STEMPFHUBER 2004).

Zwei schlupffreie, relative Messsensoren aus dem Automobilbereich ergänzen die echtzeitfähige Koordinatenbestimmung für eine präzise Aussaat. Aufgrund der hohen relativen Genauigkeit dienen sie

der Verbesserung und Stabilisierung der reinen GPS-Positionierung im Kurzzeitbereich. Zum Einsatz kommt ein berührungsloser Korrelationsgeschwindigkeitsmesser, welcher die Geschwindigkeit bzw. die zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs mit Hilfe eines optischen Verfahrens über dem Untergrund bestimmt. Der Messbereich liegt zwischen 0,5 km/h bis 400 km/h. Der andere relative Sensor ist ein „low-cost micro-machined“-Drehratensensor, welcher die Drehgeschwindigkeit über die Corioliskraft senkrecht zu zwei angeregten seismischen Massen bestimmt. Es können Drehgeschwindigkeiten ab 0,2 °/s gemessen werden. Zusätzlich enthält der Sensor noch einen 1D-Beschleunigungssensor, welcher aber von der Genauigkeit nicht für diese Zwecke ausreicht (RAMM/SCHWIEGER 2004).

Die Kommunikation, eine getriggerte Erfassung und die Verarbeitung der Daten erfolgen durch eine Industrierechnerplattform auf Windows Basis. Sie bietet verschiedene Schnittstellen über echtzeitfähige Einschubkarten, sodass eine flexible Erfassung der unterschiedlichen Sensorsignale gegeben ist. Eine direkte Verarbeitung der Daten mit anschließender Ausgabe einer Führungsgröße wird durch die integrierte Rechereinheit ermöglicht. Die Führungsgröße dient der Steuerung der Saatkornablage.

Das vorgestellte Multi-Sensor-System bildet somit den technischen Lösungsansatz für die beabsichtigte Realisierung einer koordinatengesteuerten Aussaat in Längsrichtung. Dieser Lösungsansatz kann bedarfsbedingt durch weitere Sensoren ergänzt werden. Um die gemessenen Positionen zu glätten und gleichzeitig die Genauigkeit zu steigern, muss neben dem Aufbau eines optimalen Messsystems auch die physikalische Trägheit des sich bewegenden Objektes (Sämaschine mit Traktor) in Form eines entsprechenden Filteransatzes (vgl. Kapitel 4.4) ausgenutzt werden (KUHLMANN 2004C). Für die Entwicklungszeit wurde das vorgestellte Multi-Sensor-System aus Gründen der Flexibilität auf einem fahrbarer Versuchsträger in Form eines Handwagens befestigt (vgl. Abb. 4-3).



Abb. 4-3: Versuchsträger mit montiertem Multi-Sensor-System

In der Ingenieurgeodäsie wurden in den vergangenen Jahren bereits mehrere vergleichbare Multi-Sensor-Systeme entwickelt und zur Lösung spezieller Messaufgaben in Echtzeit eingesetzt, wie z.B. bei HEISTER et al. (1995), GLAUS et al. (2005) oder KUHLMANN/EICHHORN (2003). Die Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten, speziell aus dem PKW-Bereich, sind in die Realisierung dieses Lösungsansatzes zusätzlich eingeflossen. Die einzelnen Komponenten des Multi-Sensor-Systems zur koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben in Längsrichtung werden in den nächsten Kapiteln erläutert.

4.2.1.2 Korrelationsgeschwindigkeitsmesser

Eine zuverlässige und genaue Strecken- bzw. Geschwindigkeitsmessung unter landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen spielt bei der koordinatengesteuerten Parallelsaart eine wichtige Rolle für den Zeitpunkt der nächsten Ablage. Die relative Messgröße des eingesetzten Korrelationsgeschwindigkeitsmessers ist insbesondere für die Qualität der Gleichabständigkeit bei der Aussaat entlang einer

Spur (Längsproblematik) verantwortlich. Die Saatkornablage in einem Rechteckverband benötigt sowohl eine präzise, gleichabständige Aussaat innerhalb einer Spur als auch einen exakten Anschluss der Spuren zueinander. Diese Aspekte zeigen, dass die Bildung der Ablagepositionen eine hochwertige Weginformation erfordert, welche aus den entsprechenden Messsensoren des Multi-Sensor-Systems abgeleitet werden muss.

Die gleichabständige Aussaat in Längsrichtung stellt primär ein 1D-Problem dar, so dass die gemessene Strecke bzw. die Geschwindigkeit pro Zeiteinheit die Messgröße bildet. Zur messtechnischen Bestimmung der Strecke bzw. der Geschwindigkeit gibt es auf dem Markt verschiedene Arten von Wegsensoren. Bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen werden vorrangig spezielle Inkrementalgeber, Radarsysteme oder spezielle Kamerasysteme eingesetzt. Auch die fahrzeuginternen Odometer (Inkrementalgeber) können als Weginformationsquelle zur Positionsbestimmung genutzt werden (ROTHMUND 2006). Alle Inkrementalgeber besitzen den Nachteil, eine direkte, mechanische Verbindung zum Untergrund in Form eines Antriebrades zu benötigen. Dies kann insbesondere bei weichen und zur Aussaat vorbereiteten Feldoberflächen zu Schlupf-effekten führen. Verfälschungen der relativen Weg- bzw. Geschwindigkeitsinformation sind die Folge. Optische Systeme, wie Kamerasysteme, arbeiten hingegen berührungslos und sind frei von dieser Problematik. Für die Güte der optischen Messung spielt die Bildverarbeitungsqualität und -geschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Eine hinreichende Strukturierung des Untergrundes, welche durch eine Optik auf einen lichtempfindlichen Sensor abgebildet wird, ist die Voraussetzung einer fehlerfreien Messung. Ein weiterer schlupffreier Ansatz zur Strecken- bzw. Geschwindigkeitsmessung besteht in der Nutzung des Dopplereffektes der einzelnen GPS-Satelliten (WIESER 2007).



Abb. 4-4: Corrvit L-400 Seiten- und Unterseitenansicht

Im Rahmen des hier eingesetzten Multi-Sensor-Systems kommt für die Streckenmessung der berührungslose, optische Weg- und Geschwindigkeitssensor Correvit L-400 der FIRMA CORRSYS-DATRON (2010) zum Einsatz (vgl. Abb. 4-4). Dieser eindimensionale Sensor stammt aus dem Entwicklungsbereich der Automobilindustrie, wird aber aufgrund der Flexibilität und des großen Messspektrums auch in anderen Forschungsbereichen erfolgreich eingesetzt (RAMM/SCHWIEGER 2004).

Der Geschwindigkeitssensor basiert dabei auf folgendem Messprinzip: Der Korrelationsgeschwindigkeitssensor Correvit L-400 misst die Geschwindigkeit und den Weg von unmarkierten Objekten (einer Struktur) gegenüber einem Bezug berührungslos. Hierzu besitzt der Sensor eine spezielle Halogenbeleuchtungsquelle, welche die Struktur des Untergrundes lotrecht bestrahlt. Das reflektierte Licht der Struktur wird in Form eines Bildes in der Mitte des Sensors abgebildet. Dort fällt das Bild auf ein 90° Prismengitter, welches die Bildinformation in zwei um 180° phasenverschobene Signale aufspaltet. Die beiden Bildanteile werden anschließend durch Sammellinsen auf zwei fotoempfindliche Sensoren geleitet. Durch diese Anordnung „sehen“ die Photodetektoren zwei komplementäre Gitter, durch die zwei gegenphasige Signale entstehen (vgl. Abb. 4-5).

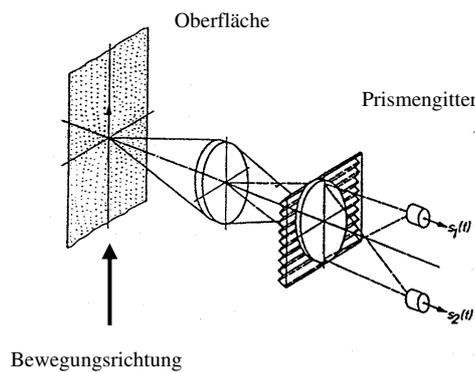


Abb. 4-5: Prinzipskizze (Quelle: FIRMA CORRSYS-DATRON 2009)

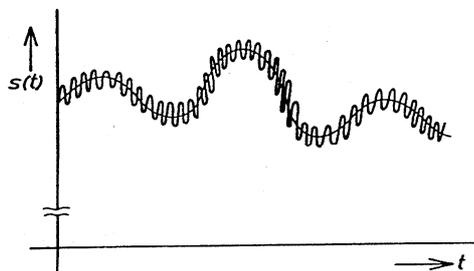


Abb. 4-6: Signalverlauf s über die Zeit t (Quelle: FIRMA CORRSYS-DATRON 2009)

Die Abbildung eines Objektdetails (Bildpunktes) erzeugt bei der Bewegung quer zum Gitter eine sinusförmige Modulation des Fotostroms (Wechselstrom auf dem Detektor). Dieses Gesamtsignal besteht aus einem niederfrequenten Signalanteil (Grundhelligkeit) und einem aufmodulierten hochfrequenten Signalanteil (Objekthelligkeit) (vgl. Abb. 4-6). Die Signalperioden des hochfrequenten Signalanteils, die im Mittel dem Geschwindigkeitssignal des Objektes entsprechen, werden durch den Einsatz eines Differenzverstärkers aus den gegenphasigen Signalen der beiden Photodetektoren herausgefiltert. Nach der Entfernung der Gleich- und Niederfrequenzkomponenten wird der reine Wechselanteil an einen Bandpassfilter mit nachgeschaltetem Pulszähler übergeben.

Die aus dem hochfrequenten Signalanteil ermittelbare Frequenz ist wiederum proportional zur Geschwindigkeit des Sensors (4-1):

$$f = (M / g) \cdot v \quad (4-1)$$

mit	f	=	Signalfrequenz
	M	=	Reproduktionsmaßstab der Optik
	g	=	Gitterkonstante
	v	=	Objektgeschwindigkeit

Das skizzierte Messprinzip der berührungslosen Geschwindigkeitsmessung beruht auf dem sogenannten Ortsfrequenzfilterverfahren und wird bei DELINGAT (1976) ausführlich erläutert.

Der Correvit L-400 besitzt folgende Spezifikation: Der mögliche Geschwindigkeitsmessbereich liegt, bei einem Arbeitsabstand von $400 \text{ mm} \pm 130 \text{ mm}$, zwischen $0,5 \text{ km/h}$ bis 400 km/h . Die maximal mögliche Wegauflösung beträgt dabei $1,9 \text{ mm}$. Die Genauigkeit ist mit weniger als $\pm 0,1\%$ der zurückgelegten Strecke über der werkseitig verwendeten Kalibriertestoberfläche angegeben. Der Sensor besitzt sowohl einen Digitalausgang als auch einen Analogausgang zur Messdatenübertragung mit $1 \dots 1000 \text{ Pulsen/m}$ bzw. $0 \dots 10 \text{ V}$ Spannung. Über ein Softwaretool (CeCalWin) der FIRMA CORRSYS-DATRON (2010) können mehrere Voreinstellungen am Sensor vorgenommen werden. Dabei kann abweichend von den Default-Werten die Anzahl der Pulse pro Meter eingestellt, die Kalibrierdaten für den Sensor angepasst sowie verschiedene Filterungszeiten für die Signalverarbeitung eingestellt werden.

Die Spezifikationen des Herstellers werden in Kapitel 5.1.1 mittels unterschiedlicher Kalibrierungsmessungen verifiziert. Der Grund für diese Überprüfungen liegt einerseits in der Genauigkeitsforde-

runge von $\sigma < 2$ cm bei der Positionsbestimmung des Sägerätes als auch andererseits im Einsatz und Verhalten auf landwirtschaftlichem Untergrund.

4.2.1.3 Drehratensensor

Wie bereits in der Einleitung zur Arbeit erläutert, lässt sich die Gesamtproblematik in zwei Teilbereiche aufteilen: in die gleichabständige Aussaat in Fahrtrichtung (primäres 1D-Problem) und die Wende der Maschine. Am Ende der Wende werden dann die Koordinaten einer Startposition für die parallele Anschlussfahrt (erneute Längsfahrt) benötigt. Dies ermöglicht einen versatzfreien Anschluss an die vorherige Spur. Hierdurch entsteht das für ein Kreuzhackverfahren notwendige Saatmuster auf der Feldoberfläche. Das Fahrzeug führt während der Wende eine räumliche Bewegung aus, sodass für die Bestimmung dieser Startkoordinaten die Streckenerfassung alleine nicht ausreicht. Im Gegensatz zur Aussaat in Fahrtrichtung (Geradenfahrt) benötigt das Gesamtprojekt der koordinatengesteuerten Saatkornablage somit 2D-Lagekoordinaten. Außerdem basieren die Erfassung und Kartierung der einzelnen Pflanzpositionen zur Planung und Durchführung von landwirtschaftlichen Folgemaßnahmen ebenfalls auf 2D-Koordinaten. Diese Aspekte zeigen, dass für das Gesamtprojekt eine Bildung von Lagekoordinaten sinnvoll ist.

Die Drehrate pro Zeiteinheit, bzw. der daraus abgeleitete Winkel, den die Sämaschine während der koordinatengesteuerten Parallelsaat auf dem Feld beschreibt, ist neben der zurückgelegten Strecke die Basis für genaue, relative, zweidimensionale Ablagekoordinaten. Die Bestimmung der Drehrate während der Geradenfahrt bedeutet somit keinen Nachteil und kann zudem die absoluten GPS-Messungen des Multi-Sensor-Systems kontrollieren bzw. glätten.

Die technologische Realisierung von Drehratensensoren ist je nach Anwendung unterschiedlich. Die älteren Messsysteme basierten auf piezoelektronischen Drehratensensoren, wobei ein Metallzylinder piezoelektrisch angeregt und die Schwingungsmoden entsprechend erfasst werden. Moderne Drehratensensoren sind mikromechanische Messelemente, welche die Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehrate von bewegten Objekten kontinuierlich mit hohen Abtastraten messen können. Sie werden aufgrund ihrer Größe und Messqualität in vielfältigen Bereichen eingesetzt. Bekannte Beispiele hierfür sind Navigationssysteme (Flugzeuge, Autos), Fahrstabilitätssysteme (ESP), als auch Bildstabilisierungssysteme in Video- und Fototechnik. Das für die Parallelsaat eingesetzte Multi-Sensor-System besitzt einen MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) Drehratensensor der FIRMA BOSCH (2010) mit der Bezeichnung DRS-MM1.0 (vgl. Abb. 4-7).



Abb. 4-7: Drehratensensor DRS-MM1.0 der Firma Bosch

Dieser Sensor ist in Fahrzeugsicherheitssystemen unterschiedlicher Automobilhersteller zu finden. Aufgrund des guten Preis/Leistungsverhältnisses und der Zuverlässigkeit wird dieser Sensor auch für unterschiedliche geodätische Multi-Sensor-Systeme genutzt. Zur Anwendung kommt er z.B. bei Forschungsprojekten zur Koppelnavigation von Fahrzeugen (RAMM/SCHWIEGER 2004).

Der Aufbau und das physikalischen Messprinzip des DRS-MM1.0 basiert auf folgendem Zusammenhang: Der DRS-MM1.0 umfasst neben dem Gehäuse mit den entsprechenden Anschlüssen einen Dämpfer zur Vermeidung mechanischer Überlastung, das Sensormodul und eine Leiterplatte mit der Auswerteelektronik. Die Elektronik beinhaltet zusätzlich eine Kompensation der Sensorabweichungen sowie eine Eigendiagnosemöglichkeit.

Der Aufbau des mikromechanischen Drehratensensors ist anhand der Abbildung 4-8 zu erkennen.

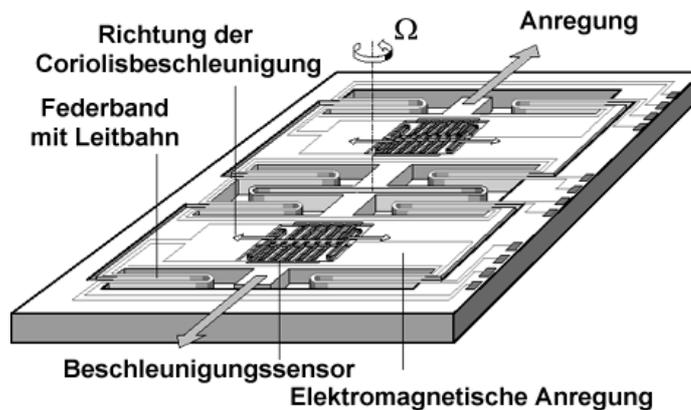


Abb. 4-8: Aufbau des DRS-MM1.0 (Quelle: FIRMA BOSCH (2010))

Das Sensormodul besteht aus zwei mikromechanischen Beschleunigungssensoren, die getrennt in zwei Messzellen angeordnet sind. In jeder Messzelle ist eine seismische Masse federnd aufgehängt, sodass dieser Schwingkörper eine aktive Primärbewegung durch eine gegenphasige Schwingung ausführen kann. Auf den beiden Schwingkörpern befindet sich jeweils ein Beschleunigungsmesser, welcher die Beschleunigung quer zur Schwingungsrichtung misst. Hierzu werden feste und bewegliche, kammförmig angeordnete Elektroden auf dem Chip benutzt. Die Anordnung von feststehenden und beweglichen Elektroden ergibt prinzipiell eine Reihenschaltung von zwei Kondensatoren. Eine lineare Beschleunigung in Messrichtung ergibt eine Änderung des Abstandes zwischen den beweglichen und festen Elektroden und damit auch eine Kapazitätsänderung in den Kondensatoren. Die Differenz der Signale beider Beschleunigungssensoren ist dabei direkt proportional zur Drehrate des Sensorgehäuses. Die Kapazitätsänderung wird von der Elektronik gefiltert und anschließend noch verstärkt. Neben der Drehrate kann der DRS-MM1.0 ebenfalls eine lineare Beschleunigung messen und ausgeben. Diese ist für geodätische Anwendungen qualitativ aber zu ungenau und zu träge. Der Anwendungsbereich für diesen Beschleunigungssensor liegt konstruktiv eher bei der Airbagauslösung von Fahrzeugen.

Das Funktionsprinzip des Drehratensensors der FIRMA BOSCH (2010) nutzt die Wirkung der Coriolis-Kraft (vgl. Abb. 4-9).

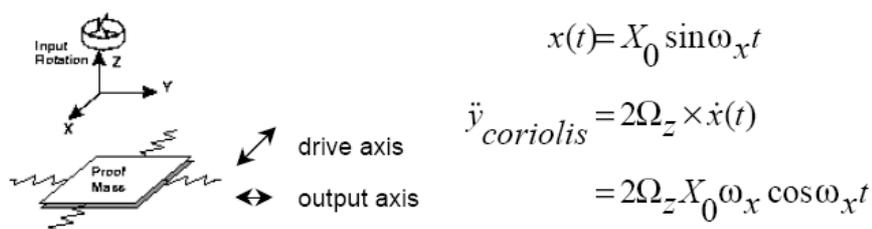


Abb. 4-9: Funktionsprinzip des DRS-MM1.0 (Quelle: FIRMA BOSCH (2010))

Die Coriolis-Kraft $F = m \cdot \ddot{y}_{coriolis}$ wirkt dabei auf eine Masse m , die sich wiederum in dem rotierenden Bezugssystem mit der Geschwindigkeit $\dot{x}(t)$ bewegt (Primärschwingung). Neben dieser Primärschwingung in Fahrtrichtung („drive axis“) wird durch die Rotation des Sensors eine Sekundärschwingung senkrecht zur Primärschwingung („output axis“) erzeugt. Aus der Sekundärschwingung ist somit die Drehrate des Sensors ableitbar. Der Drehratensensor benötigt für die Messung der Drehrate somit einen Aktor (Erzeugung der Primärschwingung) als auch einen Detektor, um die resultierende Sekundärschwingung zu erfassen.

Der DRS-MM1.0 besitzt folgende Spezifikation: Der Messbereich des Sensors liegt für die Drehrate bei maximal ± 100 °/s (0,65 V bis 4,35 V) und bei $\pm 1,8$ g für die Beschleunigungsmessung. Das Auflösungsvermögen des Sensors ist mit $\pm 0,2$ °/s bei einer Empfindlichkeit von ± 18 mV/°/s für den Drehratenmesswert angegeben und bei der Beschleunigungsmessung mit ± 2 mg bei einer Empfindlichkeit von ± 1 V/g bei gleicher Ausgabespannung wie bei der Drehrate. Untersuchungen zur Genauigkeit des Sensors unter praktischen Bedingungen haben eine Standardabweichung von $\pm 0,3$ °/s für die Drehrate des DRS-MM1.0 ergeben (RAMM/SCHWIEGER 2004). Diese Größe fließt in Form der Varianz unmittelbar in das stochastische Modell der Filterung ein (vgl. Kapitel 4.4.7).

4.2.1.4 Einbindung von RTK-GPS-Messungen

Die Grundlage für eine gleichbleibende hohe Genauigkeit der absoluten Positionsbestimmung eines bewegten Systems über eine längere Fahrtstrecke bildet neben dem Einsatz der relativen Sensoren die Einbindung eines zusätzlichen absoluten Messensors. Durch die zusätzliche Erfassung von absoluten Positionsinformationen können somit systematische Langzeitfehleranteile der kurzzeitig sehr genau messenden relativen Sensoren über die Gesamtmesszeit des Multi-Sensor-Systems reduziert bzw. ausgeschaltet werden. Das bedeutet, dass die auf relativen Messwerten basierende Ist-Trajektorie, welche nur am Startpunkt fixiert ist, durch zusätzliche absolute Messwerte kontinuierlich auf die Soll-Trajektorie zurückgezogen werden kann. Die Genauigkeit und Dynamik dieses Einflusses hängen dabei vom verwendeten Absolutsensor und dem genutzten Filtersystem (z.B. KALMAN-Filter) des Multi-Sensor-Systems ab. Auch die Anbindung aller Ablagepositionen an ein lokales oder übergeordnetes Bezugssystem ist durch die Nutzung eines absoluten Messensors möglich. Durch diese Anbindung an ein Bezugssystem können georeferenzierte Informationen der Messfahrt für Aufgaben aus dem Bereich des Datenmanagements und für die landwirtschaftliche Folgebearbeitung bereitgestellt werden. Insbesondere Bestandspflegemaßnahmen und Erntearbeiten können durch ein gezieltes Anfahren der koordinatenmäßig erfassten Einzelpflanzen unterstützt werden.

Eine Methode zur Absolutpositionierung ist durch die Nutzung der verschiedenen verfügbaren GNSS-Verfahren gegeben. Am weitesten verbreitet ist dabei das amerikanische NAVSTAR-GPS-System, welches für eine zivile Nutzung kostenfrei zur Verfügung steht. Das NAVSTAR-GPS bezieht sich auf ein geozentrisch gelagertes, weltweit bestanpassendes Bezugssystem. Die primären Messergebnisse, welche an der Geräteschnittstelle zur Verfügung gestellt werden, sind 3D-Koordinaten, bezogen auf einen globalen oder lokalen Koordinatenrahmen (z.B. aktuelles ITRF oder daraus abgeleitetes ETRF) mit dem Ursprung im Geozentrum der Erde.

Die Satelliten senden ihre Informationen auf mindestens zwei unterschiedlichen Trägerfrequenzen (L1/L2-Frequenz), um lauffzeitbedingte Fehlereinflüsse zu reduzieren. Die Funktionalität und die Aktualisierung des Systems werden durch die amerikanische Regierung (US-Verteidigungsministerium) gewährleistet, sodass eine hohe Zuverlässigkeit des Gesamtsystems gegeben ist. Neben militärischen Anwendungen gibt es einen hohen Anteil ziviler Nutzer. Dies führt zu einem breitgefächerten Markt mit vielen unterschiedlichen Sensorplattformen für die unterschiedlichsten Anwendungsfelder. Aufgrund der einfachen Nutzung, der Verfügbarkeit und der großen Verbreitung des NAVSTAR-GPS-Systems kommt es neben der Nutzung als Einzelsensor auch bei vielen Sensorsystemen zur absoluten Stützung zum Einsatz.

Im zivilen Bereich des NAVSTAR-GPS-Systems gibt es verschiedene Messmethoden mit unterschiedlichen Genauigkeiten. Für geringere Anforderungen reichen die reinen Codemessverfahren mit einer Genauigkeit im Bereich von 3 - 10 m für die Lage aus (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001). Differentielle Phasenmessverfahren erreichen dagegen Genauigkeiten von wenigen Zentimetern, bei geodätischen Präzisionsmessungen über längere Zeit sogar bis in den Subzentimeterbereich. Die Auswertung ist von der Messmethode bzw. der Genauigkeitsanforderung abhängig. Sie kann im sogenannten „Echtzeit“ oder im „Post Processing“ Verfahren erfolgen. Eine hohe Verbreitung bei präzisen Echtzeitanwendungen haben Messungen im *RealTimeKinematic*-Modus (vgl. Abb. 4-10).

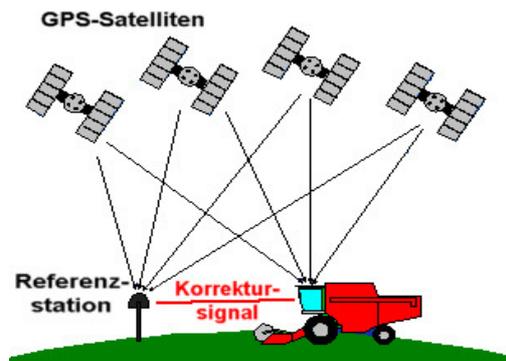


Abb. 4-10: Funktionsprinzip der RTK-Messung (Quelle: <http://www.topagrar.com> 2008)

Wichtig ist hierbei, dass die Qualität und Aktualität der genutzten Korrekturdaten die Genauigkeit der RTK-Messung nachhaltig beeinflusst. Die Art der Korrekturdatenberechnung (*VirtuelleReferenzStation/FlächenKorrekturParameter*) ist dabei irrelevant. Bei der Nutzung von präzisen Phasenkorrekturdaten (HEPS-Dienst) mit geodätischen Zweifrequenzempfängern können Lagegenauigkeiten im Bereich von ca. 2 - 5 cm bei bewegten landwirtschaftlichen Prozessen in Echtzeit ermöglicht werden. Zu beachten sind dabei aber auch mögliche Ausreißer bis in den Dezimeterbereich (STEMPFHUBER 2004).

Die Phasenkorrekturdaten können einerseits durch den Einsatz einer lokalen Referenzstation in Form eines zweiten Empfängers bereitgestellt werden oder durch die Nutzung von verschiedenen auf dem Markt verfügbaren Korrekturdatendienste. Die Korrekturdaten der Referenzstationsbetreiber werden durch Messungen in einem vernetzten Referenzstationsnetz erzeugt und anschließend dem Nutzer für seinen Rover-Empfänger bereitgestellt. Dadurch kann die benötigte räumliche Nähe der Referenzstation mit näherungsweise identischen Fehlereinflüssen künstlich erzeugt werden. Dies ist für die Genauigkeitsforderungen bei RTK-Messungen wichtig. Der Datenfluss zum Rover wird in Echtzeit durch Telemetrikomponenten wie Datenfunkmodems oder ein GSM-Modem ermöglicht. Die Höhenmessung ist in Bezug auf die Lagekomponente durch die schlechtere Geometrie um den Faktor 2 bis 3 geringer anzunehmen. Der Grund dafür liegt in der Undurchlässigkeit der Satellitensignale durch den Erdkörper, sodass nur die Satelliten bis maximal zum Horizont genutzt werden können.

Bewegte Multi-Sensor-Systeme nutzen in der Regel das RTK-GPS-Verfahren zur absoluten Positionierung, da es aktuell eines der genauesten zivilen Echtzeitverfahren ist. Durch eine Kombination der ganzzahligen Phasenzyklen (Satellit->Receiver) und der Phasenreststücke von mindestens zwei Trägerphasen werden hierbei die Entfernungen zwischen dem Satelliten und den beiden Empfängern (Referenz und Rover) berechnet (ZEBHAUSER 2000). Unter Einbezug von Korrekturdaten können Dopplendifferenzen gebildet werden, was zu den gesuchten Standpunktkoordinaten führt. Die Hauptschwierigkeiten der RTK-Messungen liegen zum einen in der erstmaligen Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeit (ambiguity) sowie in der Eliminierung auftretender Phasensprünge (cycle slips). Der Verlust der GPS-Trägerphase sowie cycle slips erfordern eine Neuberechnung der Phasenmehrdeutigkeiten. Zur schnellen Lösung der Mehrdeutigkeiten gibt es verschiedene Verfahren. EULER/LANDAU (1992) stellen in ihrer Veröffentlichung z.B. das vielfältig genutzte „on the fly“-Verfahren zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in der Bewegung vor. Heutzutage benötigen die Empfänger nur noch wenige Sekunden zur Lösung der Mehrdeutigkeiten (CZAJA et al. 2001). RTK-Messungen ermöglichen somit eine zeitnahe Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten, woraus die aktuellen Koordinaten des Standortes direkt in der Örtlichkeit abgeleitet werden können. Für diese differentielle Lösung werden Phasenkorrekturdaten für beide Frequenzen über eine Telemetrieinheit in nahezu Echtzeit an den Rover-Empfänger übermittelt. Dieser wertet die empfangenen Daten zusammen mit seinen eigenen Messdaten aus und bestimmt die Positionskoordinaten zum Messzeitpunkt (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001).

Die Grundgleichung (4-2) der Trägerphasenbeobachtungen nach GUOCHANG (2003) lässt neben der Mehrdeutigkeitsproblematik die weiteren Einflussgrößen einer GPS-Messung erkennen:

$$\lambda \Phi_i^k(t_r, t_e) = \rho_i^k(t_r, t_e) - (t\delta_r - t\delta_e)c + \lambda N_E^{S,i} - c_{iono} + c_{trop} + c_{tide} + c_{mp} + c_{rel} + c_{Rauschen} \quad (4-2)$$

mit	$\Phi_i^k(t_r, t_e)$	Phasenmessung zwischen Satellit und Empfänger
	$\rho_i^k(t_r, t_e)$	geometrische Strecke zwischen dem Satelliten und Empfänger
	$(t\delta_r - t\delta_e)$	Uhrenfehler
	c	Lichtgeschwindigkeit
	$\lambda_{L1, L2}$	Wellenlänge der beiden Trägerphasen im L1/2-Band
	$N_E^{S,i}$	Mehrdeutigkeiten
	c_{iono}	Ionosphäreneinfluss
	c_{trop}	Troposphäreneinfluss
	c_{tide}	ozeanischer Einfluss
	c_{mp}	Mehrwegeeinfluss
	c_{rel}	relativistischer Einfluss
	$c_{Rauschen}$	Signalrauschen

Die Genauigkeit von GPS-Messungen und damit auch von RTK-GPS-Messungen hängt direkt von diesen äußeren Einflüssen wie Abschattungen, Signalreflexionen (Multipath), Ionosphäre und Troposphäre, den Umgebungsverhältnissen und der Satellitenkonstellation ab. Für präzise Messaufgaben müssen diese systematischen Anteile durch entsprechende Messtechniken oder Korrekturmodelle weitestgehend reduziert werden.

Die Ionosphäre ist in einer Höhe von 10-1000 km definiert. Dort befinden sich freie Elektronen der Atmosphäre, welche bei Mikrowellen eine dispersive Laufzeitverzögerung und eine Strahlkrümmung verursachen. Die zeitliche und räumliche Verteilung der Elektronen ist stark variabel, da sie in erheblichem Maße von den Parametern wie Sonnenflecken, geomagnetischen Aktivitäten, Tages- und Jahreszeit sowie der geographischen Breite abhängt (HOFMANN-WELLENHOF 2001). Kurzzeitige ionosphärische Störungen bei RTK-Anwendungen führen zu einem verstärkten Auftreten von Phasensprüngen.

Unter der troposphärischen Refraktion versteht man die nicht dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung von Mikrowellen in der Tropo- und Stratosphäre. Die aktuell gebräuchlichen Trägerwellen des GPS-Systems mit einer Wellenlänge von 19 cm bzw. 24 cm liegen im Mikrowellenbereich. Selbst bodennahe Feuchte, wie der Feuchtegehalt einer Feldrandbewaldung in der Landwirtschaft, kann eine kinematische RTK-GPS-Messung nachhaltig beeinflussen (HAMBERGER/CZAJA 2001).

Bei der Doppeldifferenzauswertung hängt der Einfluss dieser beiden Fehleranteile von der Entfernung zwischen Rover- und Referenz-Empfänger ab. Im Nahbereich erfahren beide Empfänger (Rover/Referenz) ähnliche Fehlereinflüsse, die durch Differenzbildung eliminiert werden. Die Nutzung von entsprechenden Korrekturmodellen kann die systematischen Einflüsse reduzieren. Bei der Troposphäre bilden „Ein-Schicht-Modelle“ oder „Mehr-Schicht-Modelle“ die Grundlage der Modellierung (HOPFIELD 1971). Bei der Ionosphäre ist der effektivste und einfachste Weg zur Reduktion des Einflusses eine Mehrfrequenzmessung. Der Mehrwegeeinfluss hingegen sollte schon durch den Messaufbau bzw. die Wahl der Adaptionsumgebung minimiert werden.

Weitere Fehlereinflüsse von RTK-GPS-Messungen bei bewegten Prozessen sind durch eine variierende Verkippung der Antenne in Abhängigkeit der Geländeformen zu finden (vgl. Abb. 3-5). Die Ein-

flüsse müssen ggf. sensorisch erfasst und bei der Maschinensteuerung und -führung durch Korrekturen berücksichtigt werden.

Auf weitere Details zu den systemrelevanten Fehlereinflüssen soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht im Einzelnen eingegangen werden, da bei einer großräumigen Einzelkornsaat in der Regel von optimalen Bedingungen des Satellitenempfangs auszugehen ist. Ansonsten müssen diese Einflüsse vorweg minimiert werden, um die geforderte hohe Genauigkeit bei der Aussaat zu gewährleisten.

Die Messtaktraten geodätischer Empfänger liegen für den bewegten Echtzeitbetrieb maximal zwischen 10 bis 20 Hz. Zur Erfassung schneller Bewegungen mit hoher Genauigkeit sind jedoch wesentlich höhere Messtaktraten von Vorteil. Solche Empfänger werden auf dem Markt von einigen nicht geodätischen Geräteherstellern angeboten. Ein Grund für die Beschränkung der Taktraten im geodätischen Bereich liegt, neben der maximalen Prozessierungsgeschwindigkeit, im Anstieg der Korrelation der Einzelmessungen untereinander. Die Einzelmessungen stellen keine unabhängigen Messwerte mehr dar. Die Ursache hierfür liegt in der geringen geometrischen Änderung der Satelliten, bezogen auf den Empfänger, wodurch Systematiken nicht erkannt und ausgeschaltet werden können. Bei gleicher Geometrie ist der Einfluss der äußeren Fehler annähernd gleichartig, sodass zeitlich stark benachbarte Messungen keinen Informationsgewinn bereit stellen.

Die Koordinaten einer RTK-GPS-Messung besitzen ferner einen eindeutigen und präzisen Zeitstempel des jeweiligen Erfassungs- bzw. Messzeitpunktes, bezogen auf die Systemzeit. Dies ermöglicht die eindeutige Zuordnung jeder Messung bezüglich eines Empfangszeitpunktes. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt bezüglich des Empfangszeitpunktes durch die interne Prozessierungszeit im Empfänger mit einer gewissen Verzögerungszeit. Bei der Nutzung im Rahmen von bewegten Prozessen muss diese zeitliche Verzögerung berücksichtigt werden. Da die Verarbeitungszeiten wesentlich kürzer als die maximalen Messtaktraten sind, bekommt jede RTK-GPS-Messung einen eindeutigen Zeitbezug.

Zur Synchronisation weiterer Sensoren bzw. des gesamten Multi-Sensor-Systems kann die GPS-Zeit gleichzeitig in Form des PPS-Signals genutzt werden. Hierbei sendet der Empfängerquarz, korrigiert durch die Uhrinformationen der empfangenen Satelliten, einen digitalen Impuls als Zeittakt aus. Der Messzeitbezug einer GPS-Messung zu anderen Messsensoren wird durch diesen Bezug zur Systemzeit zur Verfügung gestellt (vgl. Kapitel 4.2.2).

Die geodätischen Empfänger besitzen verschiedene Datenschnittstellen zur Koordinatenausgabe. Neben seriellen Schnittstellen stehen Daten-Busse zur Verfügung. Über diese Schnittstelle können die Messwerte binär oder in ASCII-Format weiterverarbeitet werden. Bei den hier verwendeten Geräten der FIRMA LEICA-GEOSYSYSTEMS (2009) wird das sogenannte OWI-Protokoll zur Kommunikation mit externen Geräten genutzt. Dieses Protokoll ist sowohl in binärer Form (LeicaBinäry2) für große und schnelle Datenperformance als auch durch ASCII-Datenpakete (genormter NMEA-String) für einfache Aufgaben nutzbar.

Für eine Verknüpfung der geozentrischen GPS-Koordinaten mit den Oberflächenmesswerten der relativen Sensoren ist ein gemeinsames Bezugssystem notwendig. Ein Erdoberflächenbezug und die Trennung von Lage- und Höhenkomponente sind durch die höhere Anschaulichkeit von Vorteil. Dies bedeutet, dass die geozentrischen Koordinaten in ein topozenrisches, kartesisches Koordinatensystem bzw. in ein ebenes Gebrauchskordinatensystem (Gauss-Krüger, UTM) überführt werden müssen. Die Genauigkeit einer solchen Überführung ist bei Gebieten mit einigen hundert Metern Ausdehnung (landwirtschaftliche Schlaglängen >300 m) im mm-Bereich möglich (vgl. Kapitel 4.3).

Der für die Rübensaat eingesetzte RTK-GPS-Empfänger ist ein geodätischer Zweifrequenzempfänger der 500er Serie, welcher präzise Phasenmessungen bei bewegten Prozessen mit Messraten bis 10 Hz ermöglicht. Diese hohe Messrate ist aufgrund der Sägeschwindigkeit von etwa 2 m/s und der hohen Genauigkeitsforderung erforderlich. Für einen Echtzeitbetrieb ist dieser Empfänger mit zusätzlichen Schnittstellen und einem Funkmodem ausgestattet, wodurch der Empfang von Korrekturdaten einer lokalen Referenzstation möglich ist (vgl. Abb. 4-11).



Abb. 4-11: Abbildung des RTK-GPS-Empfängers SR530 und Antenne AT502 der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010)

Bei der Antenne wird die standardmäßige Rover-Antenne AT502 verwendet, welche Bestandteil des verwendeten Sets ist. Der Empfänger (Abbildung 4-11) verfügt neben den Standardanschlüssen zur Stromversorgung, Schnittstellen zum Datenaustausch und ein Display zur Visualisierung über zwei zusätzliche Anschlüsse: Der erste Anschluss ermöglicht den Abgriff des *PulsePerSecond*-Signals zur Synchronisierung von Prozessen mit den empfangenen Satellitensignalen und auch von externen Prozessen. Dieses PPS-Signal besteht beim SR530 Receiver aus einem positiven TTS-Signal mit einer Spitze von 3,3 V bei 50 Ohm-Widerstand. Die positive Spannungslänge beträgt 25 ms, wobei die aufsteigende Flanke des Pulses den Beginn der Epoche angibt. Die zweite Schnittstelle stellt einen Event-Eingang zur gezielten Abfrage der aktuell verfügbaren Koordinaten bereit. Diese gezielte Koordinatenabfrage hat jedoch keinen Einfluss auf die Messtaktrate und den Messzeitpunkt des Empfängers.

Die Messtaktrate von bis zu 10 Hz wird beim SR530 originär aus dem internen Quarz des Gerätes abgeleitet. Beim Empfang von mindestens 4 Satelliten wird der Quarztakt mit der globalen GPS-Zeit synchronisiert, sodass auch das *PPS*-Signal synchronisiert ist. Die GPS-Systemzeit entspricht dann - bis auf eine Konstante von 19 Sekunden - der internationalen Atomzeit (*TAI*). Die internationale Atomzeit *TAI* (*TempsAtomiqueInternational*), ist eine koordinierte Zeitskala im Sinne der allgemeinen Relativitätstheorie, definiert in einem geozentrischen Bezugssystem. Die Sekunde im internationalen Zeitsystem (SI-Sekunde) wird hierbei auf das rotierende Geoid durch den Korrekturparameter $-1,09 \cdot 10^{-16}$ (h/m) mit der Variablen h als Höhe über dem Geoid reduziert. Der Anfangspunkt von *TAI* wurde zudem willkürlich auf den 01.01.1958 um 0:00 Uhr festgelegt (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>, Stand: 11.2010).

Der Empfänger besitzt des Weiteren eine interne Speicherkarte auf der alle Messdaten strukturiert abgespeichert werden können. Alternativ sind die Messdaten direkt über ein RS232-Datenkabel übertragbar.

Alle in Kapitel 5 vorgestellten Messungen zur koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben basieren auf RTK-GPS-Ausrüstungen und der Nutzung einer lokalen Referenzstation. Die lokale Referenzstation besteht dabei aus einer zweiten, identischen Ausrüstung der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010). Der Empfänger wird als Referenzstation konfiguriert und berechnet die benötigten Phasenkorrekturdaten. Die Übermittlungsrate und das Protokoll der Korrekturdaten können den Anforderungen entsprechend im Referenzempfänger gewählt werden. Die lokale Referenzstation wird grundsätzlich in der Nähe der späteren Feldfläche standsicher aufgebaut werden, um entfernungsabhängige Fehlereinflüsse in den Ergebnissen zu vermeiden. Bei steigendem Abstand der Empfänger zueinander ist der Signalverlauf vom Satelliten zum Empfänger nicht mehr als hinreichend identisch zu betrachten, sodass die Fehlereinflüsse auf dieses Signal differieren und das Ergebnis verschlechtern (s.o.).

4.2.2 Synchronisation und Echtzeit

Die zeitgleiche bzw. zeitdeterministische Erfassung und Auswertung der unterschiedlichen Komponenten eines bewegten Multi-Sensor-Systems stellt eine grundlegende Problematik dar. Eine unzureichende Synchronisation einzelner Subsysteme führt bei der gegebenen Problemstellung zu systematischen Koordinatenverschiebungen entlang der gefahrenen Trajektorie bzw. Genauigkeitsverlusten für die Ablageposition. Die Größe des Fehlereinflusses hängt direkt proportional mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Objektes zusammen. Dies gilt insbesondere für bewegte Prozesse mit höheren Geschwindigkeiten. Neben der Erfassung der Messdaten wird für eine Synchronisation der Bezug aller Sensoren zu einem bestimmten Messzeitpunkt mit identischen Rahmenbedingungen benötigt. Die Synchronisation kann dabei direkt oder indirekt erfolgen. Ist eine direkte Synchronisation der Messwerte in Form einer zeitgleichen Erfassung nicht möglich oder der daraus resultierende Fehlereinfluss nicht akzeptierbar, so kann im Anschluss an die Messungen eine rechnerische Synchronisation erfolgen (FOPPE et al. 2004). Die Erfassung von Zeitmarken (Zeitstempel) für jede Einzelmessung und die zusätzliche Kenntnis des Bewegungsverhaltens ist die Basis dieser indirekten Synchronisation der Einzelmesswerte. Der Zeitstempel gibt an, für welchen Zeitpunkt der entsprechende Messwert seine Gültigkeit hat. Diese Zeitinformation über den Erfassungszeitpunkt liegt dabei immer in der Vergangenheit, sodass es zwangsläufig zu einer Verzögerung in der Bereitstellung der Ergebnisse kommt. Eine entsprechende Inter- bzw. Extrapolation der Daten auf den gleichen Bezugszeitpunkt ergibt dann wiederum die Synchronisation der Einzeldaten. Ein identisches Zeitbezugssystem für alle Einzelinformationen eines komplexen Meßsystems ist eine Grundvoraussetzung zur Realisierung von Steuerungs- und Regelungsaufgaben, wie sie z.B. bei der koordinatengesteuerten Aussaat gegeben sind.

Hierzu ist ein eindeutiger Startpunkt, die Zählrichtung und die Dauer der Zeiteinheit festzulegen. Erst dadurch ist es möglich, verschiedene Informationen im Sinne der Gleichzeitigkeit betrachten zu können. Zur Herstellung dieser Zeitgleichheit sind eine Vorschrift sowie ein Verbreitungsverfahren nötig, wie es durch das PPS-Signal des GPS-Systems in Form einer Spannungsflanke gegeben ist (STEMPFHUBER/MAURER 2001).

Das PPS-Signal des GPS-Empfängers basiert primär auf dem geräteinternen Oszillatorbaustein, welcher mit dem UTC-Zeitimpuls der GPS-Systemzeit ständig abgeglichen wird und somit eine Möglichkeit zur genauen weltweiten Zeitmessung bzw. zeitlichen Synchronisation bietet. Die Stabilität hängt dabei vom Empfang von mindestens 4 Satelliten und der hierdurch möglichen Synchronisation mit dem GPS-Zeitsystem ab. Zur Vermeidung einer signifikanten zeitlichen Drift während der Rübensaat sollte diese in der gleichen Größenordnung wie die Genauigkeit des PPS-Zeitsignals von 10^{-8} bis 10^{-9} liegen (STEMPFHUBER/MAURER 2001). Diese hohe Genauigkeit konnte im hausinternen Elektroniklabor durch einen Vergleich mit einem hochgenauen DCF77 Empfänger bestätigt werden. Mithilfe der GPS-Systemzeit können weitere Messtakte eines Multi-Sensor-Systems generiert und abgeglichen und stabilisiert werden. Nach STEMPFHUBER (2004) erfordert der Einsatz kinematischer Messinstrumente in der Präzisionslandwirtschaft hinsichtlich des Zeitverhaltens für Echtzeitanwendungen ein zeitliches Bezugssystem im Genauigkeitsbereich von ± 1 ms. Bei Geschwindigkeiten von ca. 5 km/h während der Rübensaat würde dies zu einem Fehler von 1 bis 2 mm führen, was bei der Genauigkeitsforderung von $\sigma < 2$ cm für die Positionierung zu vernachlässigen ist. Aufgrund der Zeitdrift von 10^{-8} bis 10^{-9} ist eine Neusynchronisation mit der GPS-Zeit bei den Genauigkeitsansprüchen erst wieder nach mehreren Stunden nötig.

Die geräteinterne Vorverarbeitungszeit einzelner Messsignale und die entsprechenden Rechenzeiten zur Bildung von Messwerten führen hingegen zu zeitlichen Fehlereinflüssen (z.B. Leica SR530 bis zu 50 ms), welche nicht vernachlässigt werden können (STEMPFHUBER 2004). Sie müssen entweder rechnerisch beachtet oder ins Genauigkeitsbudget des Projektes einkalkuliert werden. Auch die anschließende Bildung von Führungs- oder Regelungsgrößen kann zu weiteren kritischen Verzögerungszeiten führen. Diese schwer erfassbaren und korrigierbaren Verzögerungszeiten müssen schon bei der Konstruktion eines Multi-Sensor-Systems beachtet werden. Im Gegensatz zur Regelungstechnik, in der solche kritischen Einflüsse als Tot- und Bearbeitungszeiten bezeichnet werden (ZÖBEL/ALBRECHT 1995), werden diese in der kinematischen Messtechnik als Latenzzeit bezeichnet (STEMPFHU-

BER 2004). Je nach Bewegungsart und -geschwindigkeit können diese Latenzzeiten zu erheblichen systematischen Fehleranteilen und ggf. zum Scheitern einer Regelungsaufgabe führen.

Neben den Latenzzeiten auf die Genauigkeit ergibt sich die Frage nach der notwendigen Synchronisationsgenauigkeit für einen bestimmten Prozess. Fehler in der Synchronisation haben wiederum einen direkten Einfluss auf die Latenzzeit. Gekoppelt ist diese Frage mit der Definition eines Zeitintervalls, in welchem das System mit Sicherheit reagiert haben muss. Je nach Art und Trägheit der Anwendung kann sich dieser Anteil an der gesamten Latenzzeit innerhalb eines weiten Bereiches bewegen. Schnelle digitale Regelungen, Steuerungen, Filterungen und Überwachungen benötigen Echtzeit-Systeme, die bis in den Mikrosekundenbereich verzögerungsfrei arbeiten. Ausgeprägte Latenzzeiten durch Synchronisationsfehler sind bei solchen Anwendungen nicht tragbar. Die Fragestellung ist eindeutig prozessabhängig zu klären und lässt sich erst über die Begrifflichkeit der „Echtzeit“, bezogen auf die Geschwindigkeit des Prozesses definieren.

Durch den Begriff „Echtzeit“ wird festgelegt, dass ein System so schnell arbeitet, dass nachfolgende Aufgaben nicht in ihrer Ausführung beeinflusst werden können. Die Zeit zur Erstellung einer Zielgröße darf also keinen negativen bzw. ungewollten Folgeeinfluss hervorrufen (GLÄSER/SCHOLLMAYER 2004). Dies ist für die moderne Ingenieurvermessung von großer Bedeutung, um bei Steuerungsaufgaben keine kritischen und unvorhersehbaren Situationen (sogenannte Katastrophen) zu erzeugen. Zu diesen zeitkritischen Aufgabenfeldern zählt auch der Bereich der Präzisionslandwirtschaft (STEMPFHUBER 2004). Der Begriff der Echtzeitfähigkeit, der bei landwirtschaftlichen Multi-Sensor-Systemen insbesondere durch die Güte der zeitlichen Synchronisation gegeben ist, sagt aber nichts über die Schnelligkeit des Gesamtprozesses aus. Auch bei trägen Prozessen, wie der Deformationsanalyse von Hangrutschungen, wird der Begriff der Echtzeitfähigkeit in Form einer zeitdeterministischen Messung bzw. Bearbeitung der Eingangsgrößen benutzt. „Nicht-Echtzeitfähige“ Systeme sind dagegen gekennzeichnet durch den fehlenden Anspruch eine Messgröße innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls und damit rechtzeitig zur Verfügung zu stellen.

Echtzeitsysteme werden nach BRINKSCHULTE/UNGERER (2002) in Hauptklassen unterteilt, wobei die Einteilungsgrundlage der Genauigkeit bei der Einhaltung des vorgegebenen Zeitintervalls entspricht. Bei „harten“ Echtzeitanforderungen darf die vorgegebene Zeitschranke nicht überschritten werden, da ansonsten gravierende Folgeschäden auftreten können. Die „feste“ Echtzeit beschreibt Systeme, bei denen eine Überschreitung der Zeitschranke nur ein unbrauchbares Ergebnis bewirkt, aber keine unmittelbaren Katastrophen auslöst. Ist eine Überschreitung in gewissem Rahmen unerheblich für die Auswertung bzw. alle Folgeprozesse, so handelt es sich um die „weiche“ Echtzeit. Eine Überschreitung der Zeitschranke hat keinen Informationsverlust oder eine Katastrophe zur Folge. Dies ist in der Regel bei sehr trägen Prozessen der Fall, bei denen die Änderung der Messgröße nur sehr langsam auftritt.

Die koordinatengesteuerte Rübensaat ist in die Klasse der „harten“ Echtzeit einzuordnen. Falls einige Rübenpflanzen in Folge einer zu großen Latenzzeit nicht an der Sollposition gepflanzt werden, so kommt es zu Ertragsschäden durch den Verlust dieser Pflanzen bei pflanzenbaulichen Folgemaßnahmen. Zur Realisierung einer solchen synchronen Messwerterfassung gibt es mehrere Möglichkeiten.

In der Praxis haben sich zwei wesentliche Verfahren etabliert (GLÄSER/SCHOLLMAYER 2004):

- die Messwerterfassung über eine Messtaktquelle mit äquidistanten Zeitabständen (Triggerung)
- die ereignisgesteuerte Erfassung von Messwerten eines Multi-Sensor-Systems

Voraussetzung für die erste Lösung ist, dass das Triggersignal an allen Sensoren gleichzeitig vorliegen muss, um Verzögerungszeiten zu vermeiden. Zusätzlich kann der Messzeitpunkt ungleich der getriggerten und damit zeitlich starren Messwertabfrage sein. Der Vorteil dieser Methode liegt in den äquidistanten Zeitabständen, was eine einfache Implementierung der Auswertung ermöglicht. Bei der ereignisgesteuerten Erfassung führen individuelle Prozessereignisse zur sensorspezifischen Messwerterfassung. Somit gibt es kein starres Zeitraster, wie bei der Triggerung mittels einheitlichen Taktsignals,

sondern jeder Sensortyp wird ereignisgesteuert abgefragt und stellt sein Signal dem Auswerteprozess individuell zur Verfügung. Die gleichzeitige Erfassung eines modulübergreifenden, einheitlichen Zeitstempels ist notwendig, um eine Synchronisation der Ereignisse zu erreichen. Eine übergeordnete Uhrquelle dient der Bildung des Zeitstempels.

Die Synchronisation der einzelnen Prozesse erfolgt hier in Form einer Triggerung über den präzisen 10 Hz PPS-Puls des GPS-Empfängers. Alle für die Rübensaat notwendigen äquidistanten Messtaktraten und Zeitsignale werden über dieses PPS-Signal synchronisiert und damit an die weltweit verfügbare, präzise GPS-Zeit (UTC) gebunden. Die Ableitung unterschiedlicher äquidistanter Messtaktraten erfolgt durch das PXI-Erfassungssystem der FIRMA NATIONAL INSTRUMENTS (2010). Eine synchronisierte Timer/Counter-Karte (PXI-6608) auf Basis eines ofenstabilisierten Oszillators bildet die Grundlage. Der Oszillator besitzt eine Stabilität von 75 ppb bei einer Grundfrequenz von 10 MHz. Er liegt somit in der gleichen hohen Genauigkeitsstufe wie das PPS-Signal.

Der GPS-Empfänger SR530 ist, im Gegensatz zu den relativen Messsensoren, auf eine maximale Messgeschwindigkeit von 10 Hz begrenzt. Die Generierung von Messtaktraten mit höherer Frequenz ermöglicht eine schnellere Abtastung der relativen Sensoren, was eine detailliertere Erfassung des Bewegungsverhaltens und der sich daraus ergebenden Trajektorie zur Folge hat. Bei einem Messtakt von 10 Hz und einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h werden pro Messwert Wegstücke von etwa 0,14 m zurückgelegt, was im Rahmen der Genauigkeitsforderung nicht ausreicht und eine schnellere Messwerterfassung bei den relativen Sensoren erforderlich macht.

Weiterhin ist die zufällige Latenzzeit bei der Koordinatenausgabe des GPS-Empfängers zu beachten. Diese entsteht durch die geräteinterne Verarbeitung der Primärsignale zu Positionskoordinaten. Die Koordinaten und somit auch die absoluten Ablagen haben beim SR530 ein maximales „Alter“ bzw. Verschiebung in Fahrtrichtung von bis zu 0,1 s. Über den Zeitstempel der PPS-getriggerten Messwerterfassung des GPS-Empfängers ist eine exakte Berücksichtigung gegeben.

Die relative Positionsbestimmungen mit einer möglichen Mess- und Auswertetaktrate von 1 kHz stützen die Genauigkeit der Trajektorienerfassung zwischen dem 10Hz Messraster des GPS-Empfängers zusätzlich. Dazu wird einer mit dem PPS-Signal synchronisierte zweite Trigger-Pulsfolge mit 250 Hz auf der PXI-6608 des Multi-Sensor-Systems generiert. Aufgrund der hohen Messrate in Bezug auf die Bewegungsgeschwindigkeit der Maschine werden diese Daten quasi verzögerungsfrei verarbeitet. Die GPS-Messwerte dienen somit nur zur Berechnung absoluter Koordinaten und zur Stützung der Drift der relativen Sensoren.

Ein weiteres Problem bzgl. der „harten“ Echtzeitanforderungen stellt das Betriebssystem der Industrierechnerplattform auf Windows Basis dar. Für die ersten Untersuchungen und zur Verifikation der Funktionalität des Lösungsansatzes wurde der Nachteil des zur Verfügung stehenden Betriebssystems aber zunächst akzeptiert. Das hieraus resultierende Konzept zur Datenerfassung während der Versuchsfahrten wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

4.2.3 Datenerfassung

Die präzise koordinatengesteuerte Ablage von Saatkörnern erfordert eine strukturierte Messdatenerfassung und -bearbeitung auf einer zentralen Rechnerplattform. Nur auf diese Weise können Latenzzeiten der Datenerfassung und -bearbeitung reduziert bzw. vernachlässigt werden. Dazu muss die Rechnerplattform verschiedenartige Schnittstellen in Kombination mit der entsprechenden Erfassungshardware und einen Controller zur Steuerung der Erfassung bereitstellen, da die Komponenten eines Multi-Sensor-Systems unterschiedliche Messdatenströme in digitaler als auch analoger Form erzeugen. Die maximale Messgeschwindigkeit bzw. Verzögerung hängt dabei vom Vorverarbeitungsgrad und vom sensorspezifischen Messverfahren ab.

Die Datenerfassung des hier genutzten Multi-Sensor-Systems erfolgt mittels einer Industrierechnerplattform (PXI-System) der FIRMA NATIONAL INSTRUMENTS. Mit diesem Erfassungssystem können je

nach Einschubkarte verschiedene digitale und/oder analoge Signalquellen synchron erfasst und anschließend in der Rechneinheit verarbeitet werden. Die Rechneinheit ist ein PC mit einer 2,2 GHz CPU mit Windows XP Professional als Betriebssystem. Trotz der fehlenden Echtzeitfähigkeit dieses Betriebssystems werden folgende Aspekte zur Reduktion von zeitbedingten Fehlereinflüssen bei der Realisierung der Längsfahrt berücksichtigt: Eine primäre Verwendung von digitalen Sensorsignalen zur Reduktion möglicher Verzögerungs- oder Totzeiten bei der A/D-Wandlung und eine Datenerfassung, -verarbeitung und -verwaltung auf der Datenerfassungskarte (synchronisiert mit dem PPS-Signal) ohne Einfluss des Betriebssystems. Die Daten werden somit quasi verzögerungsfrei für die weitere Verarbeitung des PCs bereitgestellt. Die Messdatenübertragung in die Rechneinheit und die weitere Verarbeitung durch die Software (LabView-Programmierung) sind dann vom Betriebssystem abhängig, was wiederum zu unkalkulierbaren Verzögerungszeiten führt.

In der Entwicklungs- und Testphase des Rübensaatprojektes wurde aufgrund einer einfachen und hohen Interoperabilität und der besseren Visualisierung des vorhandenen Windows-Betriebssystems sowohl bei den Voruntersuchungen als auch bei der Verifizierung des Gesamtsystems zunächst auf ein spezielles Echtzeitbetriebssystem verzichtet. Es wurde jedoch während der Programmausführung das Betriebssystem auf Echtzeitpriorität eingestellt (STEMPFHUBER 2004). Eine langfristige Umstellung auf ein Echtzeitbetriebssystem ist trotz der geringen Geschwindigkeiten (2 m/s) bei der Zuckerrübensaat und moderaten Abtastraten von 10 Hz bis einigen hundert Hz als sinnvoll zu erachten. Eine Steigerung des Genauigkeitspotentials aufgrund kalkulierbarer Zykluszeiten und eine erhöhte Prozesssicherheit sind die Folge.

Die drei eingesetzten Sensoren des Multi-Sensor-Systems ermöglichen eine Erfassung der Längsbewegung durch sechs verschiedene Messinformationen (vgl. Abb. 4-12):

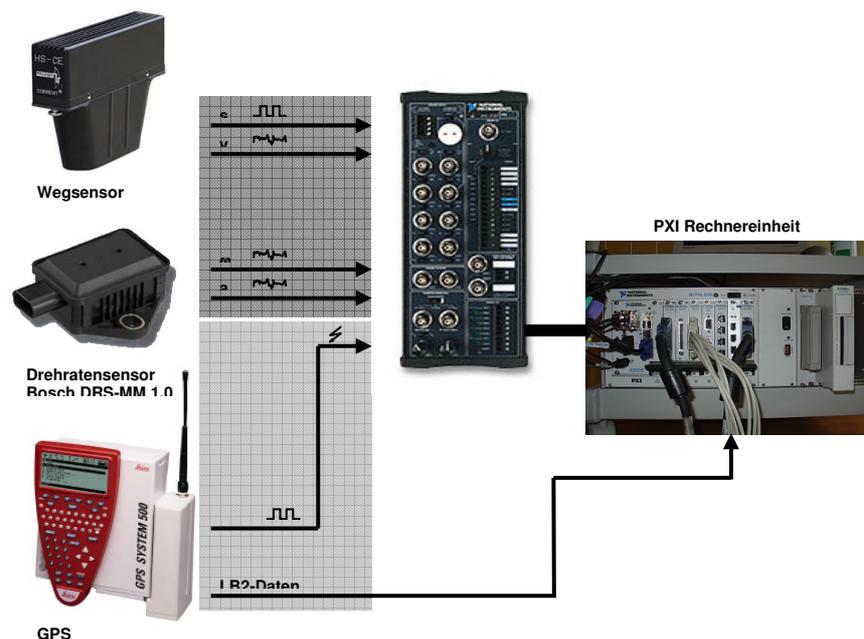


Abb. 4-12: Datenerfassung des Multi-Sensor-Systems während der Längsfahrt

Der Geschwindigkeitssensor Correvit L-400 erzeugt sowohl ein analoges Weg- als auch ein digitales Geschwindigkeitssignal. Zur Vermeidung von Fehlereinflüssen in der A/D-Wandlung wurde für alle Messungen zur koordinatengesteuerten Aussaat vorrangig das digitale Wegsignal genutzt. Die Voreinstellung des digitalen Rechtecksignals liegt bei 460 Pulse/m, was der hardwareseitigen Auflösung des Sensors und gleichzeitig der Herstellerempfehlung entspricht. Das Wegsignal wird über eine digitale I/O- und Timer/Counter-Karte (PXI 6608) gepuffert, gezählt und zur weiteren Verarbeitung in die Controllereinheit weitergeleitet.

Der Drehratensensor DRS-MM 1.0 liefert zwei analoge Messinformationen. Neben der Drehrate in Form einer Spannung kann auch eine Beschleunigung in Fahrtrichtung genutzt werden. Die Genauigkeit der Beschleunigungsmessung ist jedoch für die Aufgabenstellung unzureichend, da er nur zur Ansteuerung von Airbags konstruiert wurde. Aufgrund der geringen Genauigkeit und der recht gleichmäßigen Bewegung bei der Längsfahrt wird diese zusätzliche Information hier nicht genutzt. Das Spannungssignal des DRS-MM 1.0 wird durch die analogen Messeingänge der Multifunktionskarte (PXI 6052E) des PXI-Systems abgetastet und mit bis zu 333 kS/s bei einer Eingangsaufösung von 16 Bit digitalisiert.

Die RTK-GPS-Ausrüstung liefert zwei Datenströme, welche vom Multi-Sensor-System erfasst werden. Neben den vorverarbeiteten Koordinaten mit einer Taktrate von 10 Hz, wird das PPS-Signal des Empfängers als Taktquelle erfasst. Die Koordinaten des SR530 Empfängers werden automatisch über die RS232-Schnittstelle des Gerätes wahlweise als ASCII-String oder als binäres Signal (LB2) ausgegeben. Aufgrund der höheren Übertragungssicherheit und -geschwindigkeit wurde das binäre LB2-Format für die koordinatengesteuerte Aussaat gewählt. Beim zweiten Datenstrom, dem PPS-Signal, handelt es sich um ein TTL-Rechtecksignal, welches auf einem gesonderten Datenausgang am Gerät anliegt. Das Signal des SR530 der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010) ergibt sich aus einer aufsteigenden Flanke von min. +3,3 V bei einer Pulsbreite von etwa 25 μ s (STEMPFHUBER 2004). Die eingesetzten GPS-Empfänger besitzen zudem die Besonderheit, dass das PPS-Signal auch bei fehlendem Satellitenempfang zur Verfügung steht. Dies wird durch die Nutzung der empfängerinternen Uhr ermöglicht. Ohne ausreichenden Satellitenempfang richten sich die Genauigkeit und die Langzeitstabilität des PPS-Pulses jedoch nach der internen Uhrenqualität des Empfängers. Das PPS-Signal wird von der Timer/Counter-Karte (PXI 6608) erfasst und zur zeitlichen Synchronisation aller Mess- und Rechenzyklen sowie daraus abgeleiteter Triggersignale genutzt.

Aufgrund der Echtzeitproblematik der GPS-Koordinaten (vgl. Kapitel 4.2.2) erfolgt die Messdatenerfassung des eingesetzten Multi-Sensor-Systems sowohl mit einer Triggerung von 10 Hz als auch mit einer synchronisierten zweiten Triggerung von 250 Hz (vgl. Abb. 4-13).

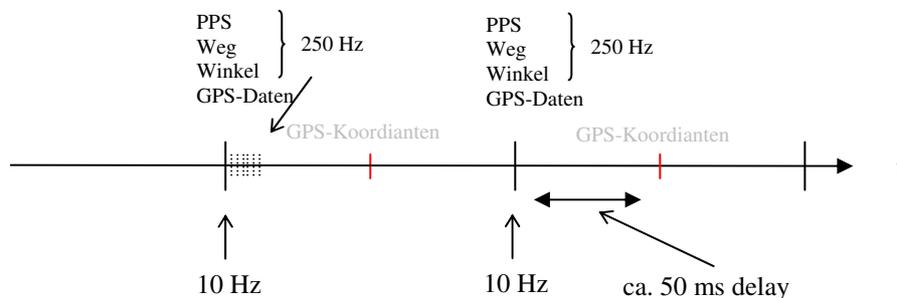


Abb. 4-13: Zeitstrang der Datenerfassung

Die geringe Messrate des GPS-Empfängers und dessen Latenzzeiten bei der GPS-Koordinatenbereitstellung machen diese zweistufige Erfassung und Auswertung aller Informationen nötig. Neben einer echtzeitfähigen Auswertung aller relativen Sensoren ist eine gesonderte, zweite Auswertung aller Informationen (inklusive der GPS-Messwerte) im Postprocessing notwendig. Diese nicht echtzeitfähige 10-Hz-Auswertung aller Daten stellt die Basis des Auswertungsprozesses dar, weil ein absoluter Koordinatenbezug zur Reduktion von Driften in der Position über die Zeit erforderlich ist. Die Kombination dieser verzögerten Ergebnisse über den Erfassungszeitstempel mit den entsprechenden Ergebnissen der rein relativen Echtzeit-Lösung ermöglicht ein „Nachziehen“ der driftbelasteten relativen Koordinaten der Ablagepositionen.

Neben der synchronen und echtzeitnahen Messwerterfassung ist ein einheitliches Koordinatensystem für die gemeinsame Auswertung aller Messgrößen ein weiteres wichtiges Thema, welches im folgenden Kapitel betrachtet wird.

4.3 Koordinatensystem

Ein einheitliches Koordinatensystem ist nötig, um alle Beobachtungen als Funktion der gesuchten Parameter in einem Filteransatz gemeinsam modellieren zu können. Koordinatensysteme sind meist dreidimensional bezüglich der Orientierung, der Metrik und der Krümmung definiert (HEITZ 1988). Aufgrund der Historie von Lage- und Höhenmessungen werden im amtlichen Vermessungswesen horizontale und vertikale Punktnetze getrennt voneinander geführt. Sie bilden die Basis der nationalen Vermessung. Weiterhin sind lokale und globale Koordinatensysteme zu unterscheiden. Globale Koordinatenbezugssysteme beziehen sich auf das Geozentrum der Erde und werden durch einen Satz von Festpunkten realisiert, welche geometrisch günstig über die Erde verteilt sein sollten. Die vom „*Internationalen Earth Rotation Service*“ (IERS) unterhaltenen Systeme sind in Bezug auf das GPS-Koordinatensystem von Wichtigkeit (TORGE 2003). Der „*International Terrestrial Referenz Frame*“ (ITRF) bildet die globale Grundlage für eine dreidimensionale Punktbestimmung mit einer Genauigkeit von etwa 1 cm. Die Koordinaten und Horizontalgeschwindigkeiten eines globalen Satzes an Fundamentalstationen zu einer bestimmten Epoche bilden dieses Frame. Lokale Systeme hingegen haben ihren Parametersatz (Datum) für eine spezielle örtliche Aufgabe optimiert lokal festgelegt. Auch relative Messsensoren besitzen meist ein lokales Koordinatenbezugssystem mit einem Ursprung im/am Sensor. Die Komponenten des Multi-Sensor-Systems besitzen folgende sensorspezifische Koordinatensysteme:

- GNSS: Dreidimensionales geozentrisches Koordinatensystem
- Wegsensor: Eindimensionales Koordinatensystem in Fahrtrichtung
- Kreisel: Zweidimensionales horizontales Koordinatensystem

Die Nutzung eines geodätischen Multi-Sensor-Systems mit verschiedenen adaptierten, absoluten und relativen Sensoren erfordert somit die Wahl eines geeigneten Koordinatenbezugssystems für eine gemeinsame Auswertung innerhalb eines Filters.

Absoluter Sensor:

Die absolute Positionsbestimmung des eingesetzten Multi-Sensor-Systems erfolgt über den in Kapitel 4.2.1.4 vorgestellten geodätischen GPS-Empfänger im RTK-GPS-Modus. Als Korrekturdatenquelle dient eine lokale Referenzstation oder ein Korrekturdatenanbieter über GSM-Modem. Die Ergebnisse der RTK-GPS-Messungen beziehen sich originär auf das „*World Geodetic System 1984*“, welches durch ein globales Netz von GPS-Trackingstationen realisiert wird. Die Genauigkeit dieser Stationskoordinaten liegt bei etwa ± 5 cm. Das ITRF und das WGS84 stimmen damit im gegebenen Genauigkeitsrahmen überein. Diese beiden und die daraus abgeleiteten globalen Systeme basieren auf einem erdfesten System räumlicher, kartesischer 3D-Koordinaten X, Y, Z . Der Ursprung liegt im Erdschwerpunkt (Geozentrum), welcher für die gesamte Masse der Erde einschließlich der Hydrosphäre und der Atmosphäre definiert ist. Diese geozentrisch gelagerten Koordinaten sind jedoch für Messungen an der Erdoberfläche weniger anschaulich, da kein direkter Bezug zur Lage und Höhe auf der Oberfläche besteht.

Ein Rotationsellipsoid als mittleres Erdellipsoid wurde erstmals im 18. Jahrhundert als geometrische Erdfigur eingeführt. Das Modell ist sowohl mathematisch einfach und geschlossen modellierbar als auch dem Geoid und dem Schwerefeld angepasst. Zudem können nicht-lineare geodätische Probleme behandelt werden. Das globale Rotationsellipsoid ist aufgrund der mathematischen Einfachheit des Rotationskörpers und der guten Approximation des Erdkörpers insbesondere für Anwendungen in der Geodäsie, der Kartographie und der Navigation geeignet. Größe und Form des Meridianellipsoids werden durch zwei geometrische Parameter beschrieben: die große Halbachse (a) und die kleine Halbachse (b). Das Rotationsellipsoid entsteht anschließend durch eine Drehung der Meridianellipse um die kleine Halbachse (b) (TORGE 2003).

Die RTK-Messungen beziehen sich auf das im Rahmen des WGS84 festgelegte GRS80-Rotationsellipsoid. Es wurde 1979 auf der Generalversammlung der „*International Union of Geodesy and Geophysics*“ (IUGG), des internationalen Dachverbandes der Geodäsie und Geophysik, beschlos-

sen. In Absprache mit der „Internationalen Astronomischen Union“ (IAU) wurde das GRS80 vom Leiter der Studiengruppe, Univ. Prof. Helmut Moritz, 1980 mit folgenden Festsetzungen publiziert:

- Äquatorachse Radius: $a = 6.378.137,0000 \text{ m}$
- Polachse Radius: $b = 6.356.752,3141 \text{ m}$
- Erdabplattung: $f = 1 : 298,257 2221$

Aus diesen Festsetzungen erhält man das System der geographischen Koordinaten für RTK-GPS-Messungen, bestehend aus der Länge λ , der Breite φ und Höhe h entlang der Flächennormalen über dem Ellipsoid. Die Länge und Breite sind als Winkel in Altgrad gegeben. Die Breite eines Punktes bezeichnet den in der Meridianebene gemessenen Winkel zwischen der ellipsoidischen Äquatorebene und der Flächennormalen durch diesen Punkt. Die Länge wird durch den Winkel zwischen dem Nullmeridian und der Meridianebene durch den Punkt in der Äquatorebene gegeben. Diese Messwerte stehen am digitalen Ausgang des Empfängers zur Verfügung.

Relative Sensoren:

Die Messungen des relativen Weg- und Winkelsensors beziehen sich auf ein lokales Sensorkoordinatensystem, wobei der Nullpunkt und die Koordinatenachsen herstellerepezifisch meistens im Sensormittelpunkt bzw. durch das Sensorgehäuse festgelegt sind. Die Ausgabe der Messgrößen erfolgt dabei in Form von digitalen oder analogen Primärsignalen, z.B. in Form einer elektrischen Spannung. Die Messgrößen lassen sich durch entsprechende Kalibrierfaktoren in metrische oder radiale Maße umrechnen. So ist eine Darstellung und Berechnung in einem örtlichen System möglich.

Der Correvit L-400 der FIRMA CORRSYS-DATRON (2010) besitzt aufgrund der Weg- bzw. Geschwindigkeitsmessung in einer Achse ein 1D-Koordinatenbezugssystem, welches in der Längsachse (Fahrtrichtung) des Sensors liegt. Der Nullpunkt befindet sich in der Mitte der Empfangsoptik auf der Unterseite des Gehäuses. Die Maßeinheit definiert sich als Pulse pro Meter bzw. Volt pro m/s. Durch Umrechnung liegt ein metrisches 1D-Bezugssystem vor, welches nur eine positive Koordinatenachse besitzt, da keine Unterscheidung zwischen einer Vorwärts- und einer Rückwärtsfahrt gegeben ist.

Der Drehratensensor DRS-MM1.0 der FIRMA BOSCH (2010) besitzt ein 2D-Bezugssystem mit den Koordinatenachsen im Sensormittelpunkt. Die Bezugsebene ist die Auflagefläche des Sensorgehäuses. Die Längsachse des Gehäuses ist dabei der Bezug der ersten Koordinatenachse. Als Messgröße erhält man eine Spannung, welche proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Im Gegensatz zu Drehgebern benötigt dieser Drehratensensor keinen festen Bezugspunkt. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit über die Zeit führt zum gewünschten Winkelwert.

Grundstücksgrenzen:

Neben den Bezugssystemen der einzelnen Sensoren des Multi-Sensor-Systems kann bei der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben im Rechteckverband der Bezug zu den Feldbegrenzungen bzw. Grundstücksgrenzen eine wichtige Rolle spielen. Dies hängt von der Notwendigkeit eines Grenzbezuges bzw. Grenzabstandes für die Saatfläche ab. In der Landes- und Katastervermessung werden Punktkoordinaten traditionell getrennt nach Lage und Höhen verwaltet. Die für einen Grenzbezug benötigten Feldpunkte liegen hierbei in Form von in die Ebene projizierten Katasterkoordinaten vor. Problematisch ist die große Heterogenität der Lagebezugssysteme bei Katasterpunkten in Deutschland. Sowohl die Projektion in die Ebene als auch das Bezugsellipsoid sind bei den Kreisen und kreisfreien Städten nicht einheitlich. Neben den Gauß-Krüger-Koordinaten gibt es das „*Universale Transversal Merkator-System*“ (UTM-System) sowie die Preußische Landesaufnahme und andere lokale Systeme. In welchem Koordinatensystem die Grenzpunkte vorliegen, ist nicht vorhersehbar. Die Genauigkeit der Grenzpunkte beträgt nach den Katastervorschriften des Landes Nordrhein-Westfalen 3 bis 6 cm (Vermessungspunkterlass NRW). Zudem gibt es in der Landesvermessung Netzspannungen im Bereich von mehreren cm. Diese sind historisch aus den Genauigkeiten der Urvermessungen (Triangulation und Trilateration) und deren Transformationen bedingt (KAHMEN 2006). Die bereitgestellten Koordinaten in diesen Bezugssystemen weisen unterschiedliche Spannungen auf, welche bei großen Feldflächen in den Streckenmessungen zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist aufgrund

der Verebnung der 3D-Koordinaten - je nach Wahl des Verfahrens und des Messortes - mit unterschiedlichen Projektionsverzerrungen zu rechnen (WITTE/SCHMIDT 2006). Seit einiger Zeit werden im Kataster auch 3-D-Koordinaten bestimmter Punkte im „European Terrestrial Referenz Frame“ (ETRF) bereitgestellt. In der Regel gilt dies aber noch nicht umfassend für Grenzpunkte im ländlichen Bereich. Auf dem ETRF basieren ebenfalls die Daten der Korrekturdatenanbieter für RTK-GPS-Messungen (BAUER 2003), sodass die mit dem GPS-Empfänger ermittelten Koordinaten direkt im gleichen Bezugssystem vorliegen.

Rübensaatprojekt:

Die Problematik der Heterogenität der Grenzpunktkoordinaten und die damit verbundene uneinheitliche Koordinatenbereitstellung im Katasterbereich führen zu der Überlegung, für das hier vorgestellte Präzisionsaatprojekt zunächst ein unabhängiges lokales Koordinatenbezugssystem zu wählen. Ziel ist eine direkte Verknüpfung von an der Erdoberfläche gemessenen Daten der relativen Sensoren mit den geozentrischen 3D-Koordinaten des Multi-Sensor-Systems. Eine Einbeziehung der Grenzen bzw. des Katasterbezugs kann später durch eine zusätzliche Transformation des lokalen unabhängigen Systems ins Katastersystem realisiert werden. Bei der Wahl der Dimension des Koordinatensystems spielen verschiedene Aspekte eine Rolle. In der Praxis sind die Saatflächen sehr gut präpariert und damit auch eben angelegt, die Welligkeit einer natürlichen Feldfläche ist aber weiterhin gegeben. Eine gemeinsame Auswertung von Oberflächenlängen und in ein gemeinsames System übertragene Raumvektorklängen erfordern eine Berücksichtigung dieses Aspektes. Geeignet wäre ein 3D-Koordinatensystem oder ein ebenes Lagekoordinatensystem mit einer Anpassung der Längenunterschiede über die Neigung. Eine Trennung von Lage und Höhe in Form eines ebenen lokalen Systems führt dabei zu einer besseren Visualisierung der Einzelpflanzenabstände. Eine höhere Akzeptanz in der Landwirtschaft und eine Ähnlichkeit bzgl. der Lagetrennung zum Kataster wäre die Folge.

Es bietet sich somit die Nutzung eines lokalen ebenen Lagebezugssystems auf der Oberfläche für eine kombinierte Auswertung aller Daten der koordinatengesteuerten Aussaat von Einzelpflanzen in Längsrichtung an. Aufgrund der geringen Schlaglängen von einigen hundert Metern für typische, heimische Feldflächen bei der Zuckerproduktion in Deutschland kann eine Verebnung der Ellipsoidoberfläche im Rahmen der Genauigkeitsforderungen entfallen. Bei einer angenommenen Schlaglänge von 1000 m beträgt der Unterschied zwischen der Länge eines Bogenstücks und der Länge der dazugehörigen Sehne bei einem angenommenen mittleren Erdradius von 6371 km beispielsweise nur etwa 1 μm . Eine Umrechnung der geozentrischen Koordinaten in ellipsoidische Koordinaten ist durch die Formel (4-3) möglich,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ ((1-e^2)N+h) \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

wobei λ der ellipsoidischen Länge, φ der ellipsoidischen Breite und h der Höhe über dem Ellipsoid entsprechen. Der Querkrümmungsradius N (4-4) und die erste numerische Exzentrizität e (4-5) sind durch

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4-4)$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (4-5)$$

gegeben.

Die Krümmung (4-6) des Meridians (Meridiankrümmungsradius M) stellt neben dem Querkrümmungsradius eine weitere Krümmungslinie des Rotationsellipsoids dar.

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \quad (4-6)$$

Mithilfe der zwei Hauptkrümmungslinien lassen sich die beiden rechtwinkligen Bogenstücke als Koordinatenunterschiede in einem lokalen System berechnen (vgl. Abb. 4-14). Bei kleinräumiger Anwendung kann dieses System als hinreichend eben betrachtet werden.

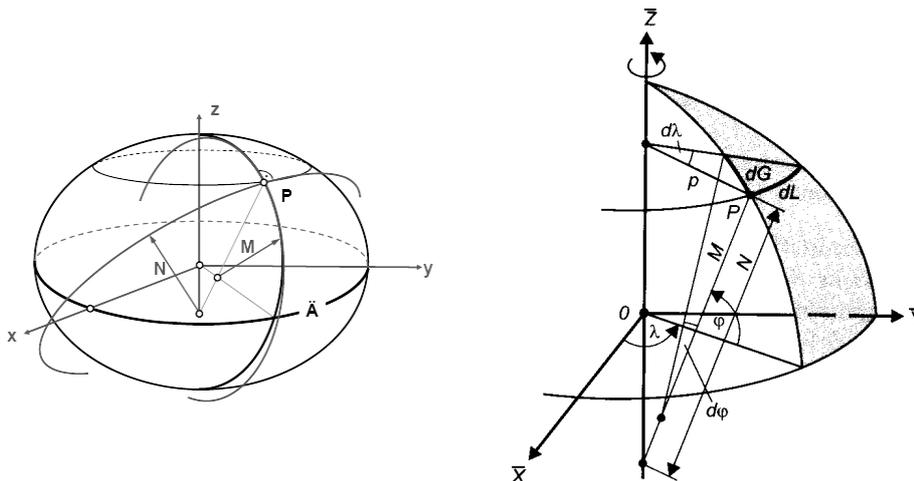


Abb. 4-14: Krümmung des Rotationsellipsoids (Quelle: TORGE 2003))

Für die Bogenstücke bzw. 2D-Koordinaten, bezogen auf einen örtlich festgelegten Nullpunkt, ergibt sich:

$$dG = M \cdot d\varphi, \quad dL = N \cdot \cos \varphi \cdot d\lambda \quad (4-7)$$

Die im Folgenden beschriebenen Versuchsfahrten zur Verifizierung des Lösungsansatzes basieren auf diesen rechtwinkligen Bogenstücken (4-7) als einfacher, lokal verebneter 2D-Koordinatenbezug. Die Fehlereinflüsse durch die Krümmung der Erdoberfläche sind bis in den Kilometerbereich - bei den Genauigkeitsanforderungen für die Ablageposition von 1 cm - vernachlässigbar. Die üblichen Schlaglängen im deutschen Zuckerrübenanbau betragen wenige hundert Meter, sodass der Koordinatenbezug aus den Bogenstücken als hinreichend eben betrachtet werden kann. Die ersten Fahrten zur Verifizierung des Gesamtsystems wurden ohne einen Grenzbezug durchgeführt. Eine Überführung ins örtliche Katasterkoordinatensystem kann später ergänzt werden.

4.4 Modellierung und Filteraufbau

4.4.1 Systemtheorie

Die Bildung eines Auswertungsansatzes für die koordinatengesteuerte Rübensaat in Längsrichtung verlangt zunächst eine Betrachtung des systemtheoretischen Hintergrundes. Die messtechnische Erfassung von Bewegungsvorgängen, wie sie bei der Maschinenfahrt auf dem Feld auftreten, wird häufig nur durch beschreibende Elemente über die gefahrene Trajektorie realisiert. Bei einer kontinuierlichen Fahrt ergibt sich dabei ein Messwert pro Sensor und Zweiteinheit. Die beeinflussenden physikalischen Gegebenheiten dieser Bewegungen spielen bei vielen Fragestellungen keine oder eine untergeordnete Rolle. Sollen diese Informationen über die Bewegung berücksichtigt werden, folgt zwangsläufig der Übergang von einer reinen deskriptiven Betrachtungsweise hin zur Frage nach den Ursachen einer

Wirkung. Der Zusammenhang kann durch die Kausalkette nach WELSCH (1981) mit dem Übertragungsverhalten zwischen Ursache und Wirkung dargestellt werden (vgl. Abb. 4-15).



Abb. 4-15: Kausalkette nach WELSCH, W.M. (1981), hier für die Zustandsraumdarstellung

Die Kausalkette eines dynamischen Systems wird entweder durch Verhaltensmodelle, welche das Ursache/Wirkungs-Prinzip berücksichtigen, oder durch dynamische Strukturmodelle beschrieben (vgl. Abb. 4-16). Das dynamische Strukturmodell greift neben den beschreibenden Informationen zusätzlich auf konkrete physikalische Modellvorstellungen zurück, welche sich auf die für das Übertragungsverhalten verantwortlichen inneren Strukturen des untersuchten Objektes stützen. Bei Strukturmodellen sind zudem die einzelnen Modellparameter auf die Realität übertrag- und interpretierbar. Eine Systemidentifikation – durch Messung der Eingangs- und Ausgangsgrößen – erlaubt somit eine Beurteilung der Objekteigenschaften. Verhaltensmodelle hingegen ermöglichen ebenfalls eine vollständige Beschreibung des Bewegungsverhaltens, lassen aber eine detaillierte Interpretation der Parameter der Bewegungsgleichung bzw. der Physik nicht zu.

Bei Strukturmodellen ist das Übertragungsverhalten aufgrund interpretierbarer physikalischer Parameter klar erkennbar. Die Quantifizierung erfolgt durch gewöhnliche und/oder partielle Differentialgleichungen (DGL). Diese Modellierung wird nach WELSCH/HEUNECKE (2001) als „white box“ Modell bezeichnet (vgl. Abb. 4-16).

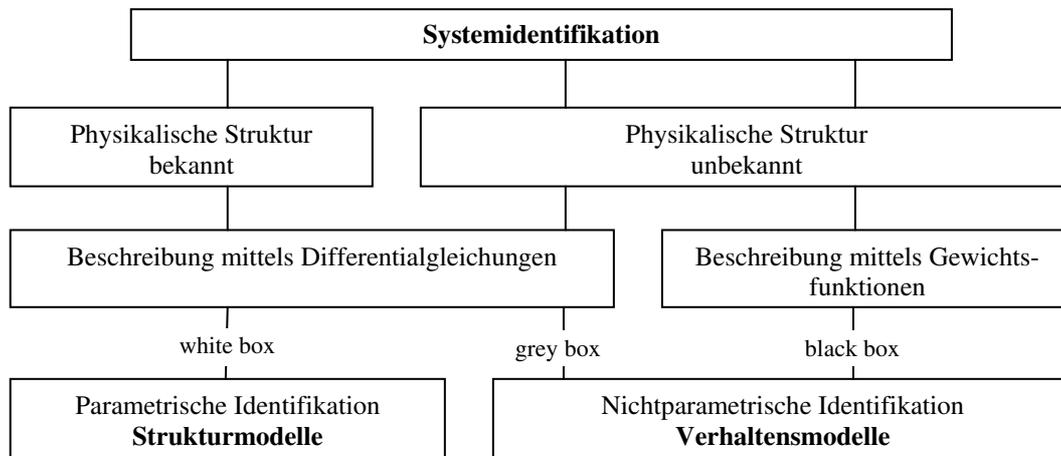


Abb. 4-16: Parametrische und nichtparametrische Identifikation (WELSCH/HEUNECKE 2001)

Zu den Strukturmodellen ist ebenfalls ein kausal modifizierter kinematischer Modellansatz als Sonderfall eines dynamischen Strukturmodells zu zählen (EICHORN 2005). Der kausalen Modifizierung liegt ein kinematisches Modell zugrunde, welches sich auf die qualitativen geometrischen und physikalischen Annahmen der Bewegung stützt. Es kommt zum Einsatz, wenn Eingangsgrößen des zu untersuchenden Prozesses als zusätzliche Informationen, z.B. in Form von Messwerten, direkt oder indirekt zur Verfügung stehen. Die Nutzung dieser Daten (Stellgrößen) ist durch eine kausale Modifikation des kinematischen Modells möglich, ohne die Erstellung einer angepassten Übertragungsfunktion auf der Grundlage von Differentialgleichungen zu benötigen (EICHORN et al. 2001). Eine Verringerung der Trägheit der Systemgleichungen der Filterung bei gleichzeitig besserer Anpassung an die reale Bewegung wird erreicht. Eine Zunahme der Stabilität in der rekursiven Filterung ist ein weiterer Vorteil. Die Nutzung von zusätzlichen Stellgrößen setzt voraus, dass kein Widerspruch zum Bewegungsmodell erzeugt wird, die messtechnische Erfassung möglich ist und dieser Parameter direkt oder indirekt durch eine Handlung beeinflusst werden kann.

Bei der nicht-parametrischen Modellierung durch ein Verhaltensmodell ist die Interpretation der Parameter nicht oder nicht eindeutig gegeben. Bezeichnet werden sie als „black box“ bzw. „grey box“ Modelle (vgl. Abb. 4-16). Ihre Quantifizierung kann durch den universell anwendbaren Ansatz eines Faltungsintegrals (4-8) mit der Eingangsgröße $y(t)$ und der Ausgangsgröße $x(t)$ erfolgen (bspw. für geglättete Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen in Kapitel 4.4.4):

$$x(t) = \int g(\tau) \cdot y(t - \tau) \cdot d\tau \quad (4-8)$$

Darin bezeichnet $g(\tau)$ die Gewichtsfunktion, welche aufgrund von Massenträgheit das „Gedächtnis“ des dynamischen Systems beschreibt. Diese Darstellung ist recht abstrakt und i. d. R. physikalisch nicht interpretierbar. Ähnlich ist es im „grey box“-Fall auf der Basis von entsprechenden Differentialgleichungen, welche kein konkretes physikalisches Modell der Struktur darstellen und somit schlecht interpretierbar sind (PELZER 1977/1988).

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich, eine Überführung zwischen den verschiedenen angesprochenen Darstellungen eines dynamischen Systems zu erreichen, wie dies bereits von PELZER (1977) am Beispiel eines Masse-Feder-Systems (dynamisches System 1. Ordnung) gezeigt wurde.

Die Aufstellung eines Bewegungsmodells für einen (landwirtschaftlichen) Prozess ergibt neben den Messwerten einen Informationsgewinn und damit einen numerisch stabileren Gesamtauswerteprozess. Selbst wenn das Bewegungsverhalten nicht explizit bekannt ist, lassen sich Gesetzmäßigkeiten finden, welche den Auswerteprozess stabilisieren. Nach KUHLMANN (2004A) sind drei Fälle zu unterscheiden: Die physikalische Gesetzmäßigkeit ist bekannt, die Bewegung ist stückweise approximierbar oder die Abtastrate ist in Relation zur Bewegung hoch, sodass pro Messepoche nur eine geringe Veränderung in den Beobachtungen erfolgt.

Die Herleitung bzw. Bildung eines Bewegungsmodells erfordert außerdem eine detaillierte Systemanalyse, welche in einen theoretischen und einen experimentellen Teil aufgespaltet wird (HEUNECKE 1995): Im theoretischen Teil erfolgt die Quantifizierung des Modells durch eine physikalische Beschreibung der Beziehung zwischen Ursache und Wirkung und der anschließenden mathematischen Formulierung durch Differentialgleichungen. Dieses mathematische Modell kann sowohl auf parametrische oder nicht-parametrische Weise aufgestellt werden. Bei der parametrischen Darstellung ergibt sich ein Gleichungssystem, welches in der Struktur und den auftretenden Koeffizienten physikalisch interpretierbar ist. Masse-, Energie- und Impulsbilanzgleichungen sowie andere physikalische oder chemische Zusammenhänge können die Grundlage sein. Ein System gewöhnlicher und/oder partieller Differentialgleichungen ist das Resultat (ISERMANN 1988). Falls eine parametrische Beschreibung nicht gewünscht oder möglich ist, weil z.B. die physikalischen Zusammenhänge nicht exakt bekannt sind, lässt sich in der Regel eine nicht-parametrische Beschreibung (z.B. in Form eines Faltungsintegrals) finden.

Eine Differentialgleichung (4-9) für ein dynamisches Bewegungsverhalten ist nach ISERMANN (1988) z.B. in folgender Form zu formulieren:

$$y^{(q)}(t) + a_{q-1} y^{(q-1)}(t) + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_p z^{(p)}(t) + b_{p-1} z^{(p-1)}(t) + \dots + b_1 \dot{z}(t) + b_0 z(t) \quad (4-9)$$

Dies zeigt, dass Differentialgleichungen, und insbesondere ihre Lösungsmöglichkeit bei der Beschreibung dynamischer Systeme, eine entscheidende Rolle spielen (FÖLLINGER/FRANKE 1982). Wichtig für die Lösung ist das Auffinden einer geeigneten Strategie, da die Bewegung von Maschinen in der Regel von mehreren Variablen (z.B. Zeit und Ort) abhängig ist, welche in einem nicht linearen Zusammenhang stehen. Eine Lösung ist somit nur eingeschränkt direkt möglich. Eine Überführung der komplexen Differentialgleichungen für Fahrzeugbewegungen in homogene vektorielle Differentialgleichungen 1. Ordnung und deren stückweise Lösung bilden einen nachvollziehbaren Lösungsansatz.

Dieser Überführungsablauf ist hier in Form eines Flussdiagramms dargestellt (vgl. Abb. 4-17):

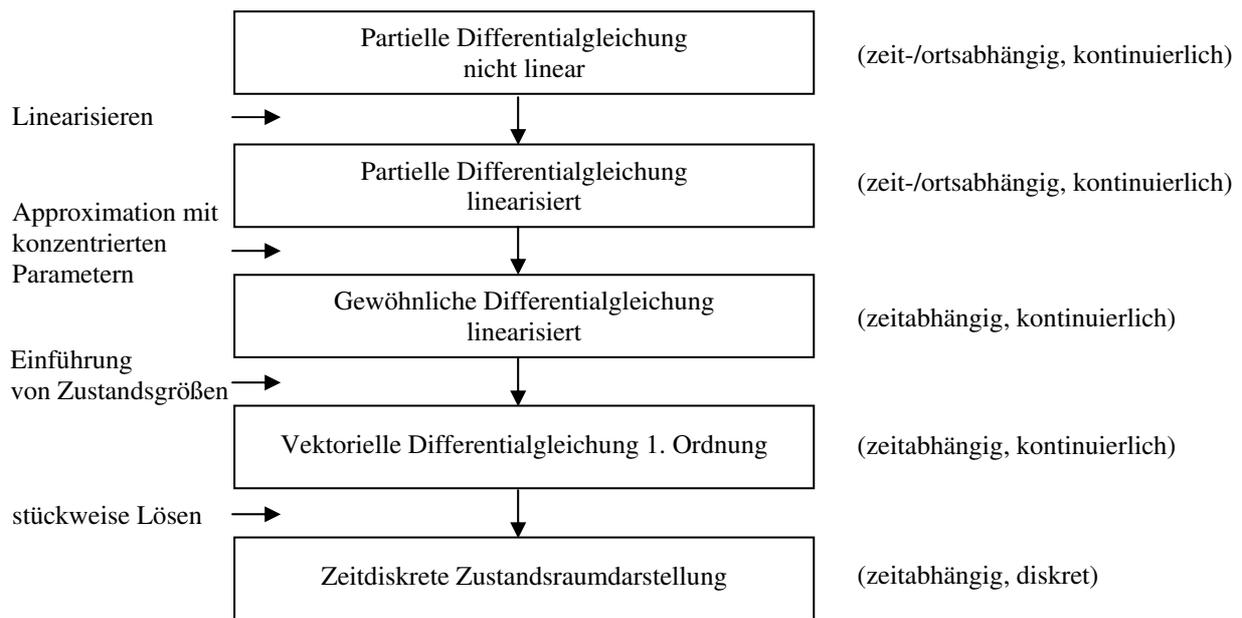


Abb. 4-17: Überführung von Differentialgleichungen in den zeitdiskreten Zustandsraum (ISERMANN 1988)

Das Ergebnis ist eine zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung des Bewegungsverhaltens und in dieser Form gleichzeitig die Grundlage der Systemgleichungen eines KALMAN-Filters (FÖLLINGER/FRANKE 1982). Eine vollständige Herleitung und Überführung von kontinuierlichen Differentialgleichungen in den zeitdiskreten Zustandsraum ist beispielsweise der Veröffentlichung von EICHORN/MÖHLENBRINK (2001) zu entnehmen. Als Resultat (Systemgleichung der Filterung) ergibt sich für den zeitdiskreten Fall folgende verkürzte, allgemeine Zustandsraumgleichung (4-10), wobei $k+1$ die aktuelle Epoche und k die Vorepoche kennzeichnet:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{T}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k) \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{w}(k) \quad (4-10)$$

mit

- $\mathbf{x}(k)$: Zustandsvektor
- $\mathbf{u}(k)$: Stellgrößenvektor
- $\mathbf{w}(k)$: Systemrauschen/Störgrößenvektor
- $\mathbf{T}(k)$: Transitionsmatrix
- $\mathbf{B}(k)$: Stellgrößenmatrix
- $\mathbf{S}(k)$: Störgrößenmatrix

Die Gleichung (4-10) beschreibt somit die Zustandsänderung während einer Bewegung aufgrund der vorhandenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die Modellierung beinhaltet als Einflussgröße die Zeit sowie die verursachenden Kräfte der Bewegung. Werden einzelne Summanden dieser Systemgleichung nicht berücksichtigt, so ergeben sich eingeschränkte Bewegungsmodelle. Die Bewegungsmodelle können, angelehnt an die Fallunterteilungen bei der Deformationsanalyse in vier Grundtypen klassifiziert werden: das Identitätsmodell, das kinematische Modell, das statische Modell und das dynamische Modell (KUHLMANN/PELZER 1997). Entfällt der Term für die Stellgrößen aus der Gleichung (4-10), so resultiert daraus die Beschreibung eines kinematischen Bewegungsmodells. Es sind keine Ursachen in Form von Stellgrößen mehr vorhanden. Findet hingegen keine autonome Bewegung statt und ist der Einfluss der Stellgröße verzögerungsfrei, so liegt ein statisches Modell vor. Der Term der Transitionsmatrix entfällt hierbei. Beim Identitätsmodell wird die Transitionsmatrix zur Einheitsmatrix und der Term der Stellgrößen entfällt wiederum (KUHLMANN 2004A).

Der zweite, experimentelle Teil der Systemanalyse (Identifikation) umfasst die Ermittlung des Systemmodells in Form der messtechnischen Bestimmung der Ein- und Ausgangsgrößen (ISERMANN 1974, EICHHORN 2005). Realisiert wird die experimentelle Systemanalyse durch praktische Messfahrten unter identischen Voraussetzungen wie bei den späteren Einsatzbedingungen. Dabei wird die Trägheit der Maschine die vorhandene Problemstellung vorrangig beeinflussen. Der experimentelle Teil dient zur Verbesserung der theoretischen Modellbildung (parametrische Identifikation) bzw. als Grundlage der Bildung eines Verhaltensmodells (nicht parametrische Identifikation). Für die koordinatengesteuerte Ablage ist zudem die Echtzeitfähigkeit des zu wählenden Filters entscheidend. Die Anpassung der Modellierung an die reale Trajektorie erfolgt über Einbindung von Messwerten in Echtzeit. Diese Darstellungen verdeutlichen, dass die Wahl einer diskreten KALMAN-Filterung für die Problemstellung der Rübensaat erfolgsversprechend sein kann.

4.4.2 KALMAN-Filterung

Die KALMAN-Filterung hat bei der zeitabhängigen Beschreibung von Systemzuständen eine große Verbreitung gefunden. Sie wurde als Schätzverfahren für lineare dynamische Systeme entwickelt (KALMAN 1960, KALMAN/BUKY 1961). In Folge des Wandels in der Geodäsie von der klassischen Vermessung zur Kinematik und zu Echtzeitmessungen erhielt diese Art der Auswertung auch in verschiedenen Bereichen des Vermessungswesens Einzug. Die Erfassung der Bewegungszustände eines Fahrzeuges durch Multi-Sensor-Systeme, kombiniert mit der Beschreibung durch ein funktionales und stochastisches Modell, ist eine typische Anwendung der KALMAN-Filterung. Eine Kombination von Modellgleichungen mit Messgleichungen durch einen Schätzalgorithmus auf L2-Norm ermöglicht eine bestmögliche Anpassung der Modellvorstellung an die Realität. Das Ergebnis ist eine optimale Schätzung der gesuchten Parameter (Zustände), welche in den Systemgleichungen enthalten sind. Die Filterung führt somit alle über den Zustand eines zeitabhängigen Systems verfügbaren Informationen im Sinne der Statistik optimal zusammen, sodass die gesuchten Parameter unverzerrt und mit minimierten Varianzen geschätzt werden können. Die mathematische Grundlage der KALMAN-Filterung besteht in der Beschreibung von Bewegungsvorgängen durch lineare Differentialgleichungen. Hinzu kommen die Wahrscheinlichkeitstheorie und die Transformationstheorie (KNICKMEYER et al. 1996). Die Realisierung einer KALMAN-Filterung stützt sich dabei auf zwei Hauptschritte: die Propagation und die anschließende Aufdatierung. Der Propagationsteil beinhaltet die Fortschreibung des Zustandsvektors und dessen Kovarianzmatrix für die nächste zeitliche Epoche aufgrund der Bewegungsmodellvorstellungen. Der Aufdatierungsteil ergibt anschließend eine optimale Schätzung durch eine Kombination der messtechnisch bestimmten Beobachtungen und der propagierten Zustände nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Vorteile einer KALMAN-Filterung liegen u.a. in:

- der rekursiven Verarbeitung der Eingangsdaten (nur alter Zustand, aktuelle Beobachtungen und zugehörige Kovarianzmatrizen)
- der Echtzeitfähigkeit durch geringen Rechenaufwand
- der Glättung und Genauigkeitssteigerung, da die Zustandsgrößen nicht unmittelbar den Messungen folgen und Vorinformationen über das Systemverhalten vorhanden sind
- der sequentiellen Datenverarbeitung
- der gleichzeitigen Fortschreibung des stochastischen Modells in Form der Kovarianzmatrizen

Neben den Vorteilen gibt es jedoch auch Nachteile bei rekursiven Filterungen. Der Hauptnachteil liegt in der fehlenden Einbeziehung alter Messungen, bzw. der fehlenden Verbesserung vorangegangener Zustandsschätzungen durch die aktuellen Messwerte. Bei der Steuerung von Echtzeitprozessen ist dieser Sachverhalt jedoch von untergeordneter Wichtigkeit. Er spielt nur bei Anwendung mit der Auswertung im Postprocessing eine wichtige Rolle. Ein weiterer Nachteil liegt in der Tatsache, dass pro Epoche Unstetigkeitsstellen zum Zeitpunkt der Aufdatierung auftreten, da die aktuellen Beobachtungen zur Anpassung an die Realität Zwänge auf die propagierten bzw. fortgeschriebenen Zustände

ausüben. Zudem verlangt die KALMAN-Filterung grundsätzlich weißes Rauschen für die System- und Messgleichungen. Aufgrund der unendlichen Signalleistung ist diese Forderung aber praktisch nie erfüllt. Ist hingegen die spektrale Leistungsdichte von Mess- und Systemrauschen innerhalb der Bandgrenzen des betrachteten Systems konstant, so hat dies keinen signifikanten Einfluss. Problematisch sind auch Messverfahren mit hohen Abtastraten, da die Korrelationszeit in Bezug auf die Epochendauer nicht mehr vernachlässigbar klein ist (SCHRICK 1977). In solchen Fällen sind spezielle erweiterte KALMAN-Filter einzusetzen. Eine Möglichkeit ist der Formfilteransatz. Hierbei werden farbige Rauschprozesse durch eine parametrische Erweiterung des Zustandsvektors modelliert. Die Mess- und Systemgleichungen sind entsprechend zu ergänzen (WELSCH et al. 2000).

Müssen neben den gesuchten Zuständen weitere physikalische Parameter für eine vollständige und optimale Modellierung mitgeschätzt werden, so können diese in die Systemgleichungen in Form von weiteren physikalischen Zustandsparametern eingebunden werden. Der Grund dafür ist ein à priori unzureichend bekanntes funktionales und/oder stochastisches Modell. Die KALMAN-Filterung wird zu einem adaptiven Filter erweitert, welcher das Modell im Filterverlauf eigenständig verbessert (GELB et al. 1974).

Ziel der KALMAN-Filterung ist die Verknüpfung von Informationen über das Systemverhalten mit aktuellen Messinformationen zur Glättung der zu bestimmenden Trajektorie (vgl. Abb. 4-18). Bei der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben sind dies das Bewegungsverhalten der Maschine, insbesondere das Trägheitsverhalten und die permanenten Messungen des eingesetzten Multi-Sensor-Systems.

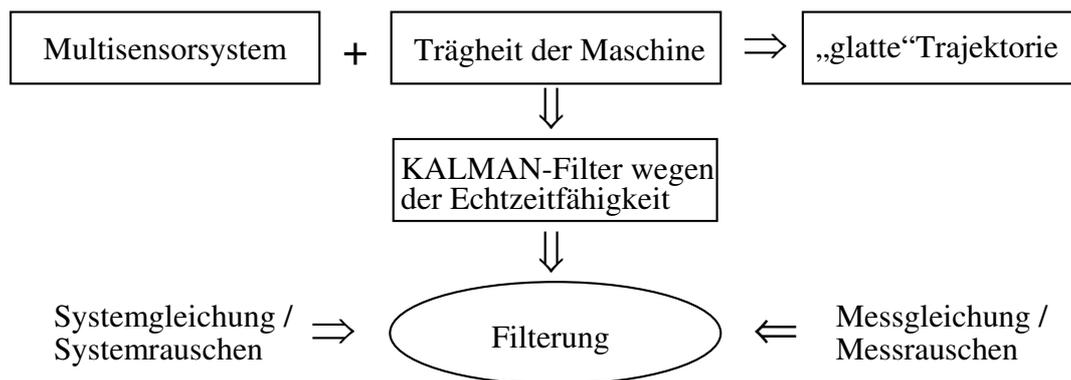


Abb. 4-18: Filterstrategie für eine Anwendung in der Präzisionslandwirtschaft

In Abbildung (4-18) ist zu erkennen, dass sich vier Eingangsgruppen für eine KALMAN-Filterung ergeben:

- die Komponenten zum Trägheitsverhalten der Maschine, modelliert in Form von *Systemgleichungen* und *Systemrauschen*,
- sowie die *Messgleichungen* inklusive des stochastischen Modells (*Messrauschen*).

Messgleichungen:

Die Beobachtungen zur aktuellen Messepoche ($k+1$) werden in einem Beobachtungsvektor \mathbf{l} zusammengefasst, welche linear bzw. linearisiert von den gesuchten Parametern \mathbf{x} (Zuständen) abhängt. Dies führt zur Messgleichung (4-11) der KALMAN-Filterung im zeitdiskreten Zustandsraum:

$$\mathbf{l}(k+1) = \mathbf{A}(k+1) \cdot \mathbf{x}(k+1) + \boldsymbol{\varepsilon}(k+1) \quad (4-11)$$

Diese Gleichung entspricht der Beobachtungsgleichung für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, wobei $\boldsymbol{\varepsilon}$ die Beobachtungsabweichungen (Messrauschen) zum aktuellen Zeitpunkt

widerspiegelt. Im Fall einer überbestimmten Konfiguration wären die gesuchten Parameter, numerisch stabil, alleine aus den Beobachtungsgleichungen schätzbar. Die Einbeziehung weiterer Informationen in Form von Systemgleichungen wäre dann nicht zwingend erforderlich.

Systemgleichungen:

Die Modellierung des Bewegungsverhaltens eines Objektes erfolgt mittels linearer bzw. linearisierter Systemgleichungen. Je nach Bewegungsmodell sind die einzelnen Komponenten der Systemgleichung aufzustellen. Gleichung (4-12) zeigt die Systemgleichung der KALMAN-Filterung als Bewegungsgleichung im zeitdiskreten Zustandsraum (vgl. Kapitel 4.4.1).

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{T}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k) \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{w}(k) \quad (4-12)$$

Das Systemrauschen wird durch den Störterm \mathbf{w} in der Gleichung (4-7) ausgedrückt. Die Systemgleichungen präzisieren den aktuellen Zustand $\mathbf{x}(k+1)$ aufgrund des bekannten bzw. angenommenen Bewegungsverhaltens $\mathbf{T}(k)$ der Landmaschine und der Ergebnisse $\mathbf{x}(k)$ der vorherigen Epoche k . Der Einfluss $\mathbf{B}(k)$ der sogenannten Stellgrößen $\mathbf{u}(k)$ ergänzt die Bewegungsgleichung. Stellgrößen können bei Fahrzeugen beispielsweise gezielte Lenkbewegungen sein, welche die Bewegung nachhaltig beeinflussen.

Schätzung:

Die rekursive Schätzung der Zustände aus den System- und Messgleichungen führt dabei zu einer Verbesserung der Ergebnisse im Gegensatz zur reinen Fortschreibung der Zustände aufgrund der Systemgleichungen. Die Messwerte bewirken eine Anpassung des Systems an die reale Bewegung. Dazu werden die Differenzen (Innovation) zwischen den Messwerten (Realität) und den Systemgleichungen (Modellansatz) zu einer bestimmten Epoche ($k+1$) über die sogenannte KALMAN'sche Verstärkungsmatrix gewichtet und zu den fortgeschriebenen Zuständen addiert. Eine alleinige Auswertung der Messwerte führt jedoch aufgrund der fehlenden Überbestimmung während der Bewegung teilweise zu Konfigurationsdefekten: die Bewegungsrichtung, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung erhält man erst aus Messwerten verschiedener Epochen (KUHLMANN 2004A).

Es ergeben sich die folgenden Grundgleichungen der KALMAN-Filterung, welche für die Realisierung der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben genutzt werden können (WELSCH et al. 2000). Der Anfangszustand in Form eines Zustandvektors \mathbf{x} und das entsprechende stochastische Modell (4-13) sind vorgegeben. Dem Stellgrößenvektor \mathbf{u} ist eine Unsicherheit zuzuschreiben, welche unabhängig von der Störgrößenmatrix \mathbf{w} und der Messunsicherheit ε ist.

$$\Sigma_{ww} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ww} \quad ; \quad \Sigma_{uu} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{uu} \quad ; \quad \Sigma_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll} \quad (4-13)$$

Mithilfe der Systemgleichung auf Grundlage des Bewegungsmodells lässt sich der aktuelle Zustand (4-14) nun präzisieren.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{T}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k) \cdot \mathbf{u}(k) \quad (4-14)$$

$$\mathbf{Q}_{xx}(k+1) = \mathbf{T}(k) \cdot \mathbf{Q}_{xx}(k) \cdot \mathbf{T}(k)^T + \mathbf{B}(k) \cdot \mathbf{Q}_{uu}(k) \cdot \mathbf{B}(k)^T + \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{Q}_{ww}(k) \cdot \mathbf{S}(k)^T \quad (4-15)$$

Das Systemrauschen und das Messrauschen wirken sich bei der Schätzung der Zustandsgrößen auf die Stochastik und nicht unmittelbar auf die Fortschreibung aus. Das Systemrauschen wird stochastisch in Form der Kofaktormatrix (4-15) fortgeschrieben. Die benötigte Innovation (4-16) berechnet sich als Unterschied zwischen Realität und Modell aus folgender Formel:

$$\mathbf{d}(k+1) = \mathbf{l}(k+1) - \mathbf{A}(k+1) \cdot \mathbf{x}(k+1) \quad (4-16)$$

Die Innovation sollte möglichst klein sein, da sonst die Modellierung nicht zur wahren Bewegung passt. Zur praktischen Berechnung der Innovation sollte die nicht-linearisierte Messgleichung verwendet werden, da ansonsten numerische Probleme auftreten können.

Die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes führt zur benötigten Kofaktormatrix (4-17) der Innovation:

$$\mathbf{D}(k+1) = \mathbf{Q}_{ll}(k+1) + \mathbf{A}(k+1) \cdot \mathbf{Q}_{xx}(k+1) \cdot \mathbf{A}(k+1)^T \quad (4-17)$$

Diese Gleichung bildet eine Teilkomponente der sogenannten KALMAN'schen Verstärkungsmatrix (4-18). Die Innovation und deren Kofaktormatrix führen zu einer geglätteten Annäherung der Modellzustände an die reale Bewegung des Objektes und legen den Einfluss der Innovation auf das Schätzergebnis fest. Hieraus ergibt sich der ausgeglichene Zustandsvektor (4-19):

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{Q}_{xx}(k+1) \cdot \mathbf{A}^T(k+1) \cdot \mathbf{D}(k+1)^{-1} \quad (4-18)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{x}(k+1) + \mathbf{K}(k+1) \cdot \mathbf{d}(k+1) \quad (4-19)$$

Die stochastischen Komponenten des geschätzten Zustandes werden in Form der zugehörigen Kofaktormatrix (4-20) berechnet. Der Genauigkeitsgewinn durch die Fortschreibung ist anhand der Formel unmittelbar zu erkennen. Aus ihr lässt sich die Kovarianzmatrix der Zustände ableiten.

$$\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}(k+1) = \mathbf{Q}_{xx}(k+1) - \mathbf{K}(k+1) \cdot \mathbf{D}(k+1) \cdot \mathbf{K}(k+1)^T \quad (4-20)$$

Die Nutzung dieses echtzeitfähigen Werkzeugs zur optimierten Auswertung kinematischer Messgrößen eines dynamischen Bewegungsprozesses ist aus der modernen Geodäsie nicht wegzudenken. Die koordinatengesteuerte Ablage von Saatkörnern mit einer Genauigkeitsforderung von 2 cm macht diese Kombination von verschiedenen Messwerten mit Zusatzinformationen zum Bewegungsverhalten unumgänglich. Die Erarbeitung eines Bewegungsmodells für landwirtschaftliche Sämaschinen ist die Grundlage zur Bildung der Systemgleichungen.

4.4.3 Bewegungsmodell eines Fahrzeuges

Die Bewegung eines Fahrzeuges ist durch ein mathematisches Bewegungsmodell, welches ggf. auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht, zu beschreiben (vgl. Kapitel 4.4.1). Zur Kombination mit realen Messwerten fließt dieses Bewegungsmodell in Form von Systemgleichungen direkt in eine KALMAN-Filterung ein. Die Systemgleichungen werden dabei aus linearen bzw. linearisiert vektoriellen Differentialgleichungen 1. Ordnung hergeleitet, welche stückweise lösbar und somit im zeitdiskreten Zustandsraum darstellbar sind (vgl. Kapitel 4.4.1). Der Übergang von der Differentialgleichung einer Bewegung hin zur zeitdiskreten Systemgleichung ist nicht immer trivial. Für einfache Bewegungsabläufe, wie eine gleichmäßig beschleunigte Kfz-Bewegung, gibt es bereits veröffentlichte Modelle bzw. Systemgleichungen (KUHLMANN 2004A). Aufbauend auf dieser Grundlage können Bewegungsmodelle für den „Offroad“-Bereich abgeleitet werden, da das grundsätzliche Bewegungsverhalten von modernen landwirtschaftlichen Fahrzeugen Ähnlichkeiten aufweist. Das Ziel liegt in der Ermittlung eines möglichst einfachen und zuverlässigen Bewegungsmodells zur Positionsbestimmung der Sämaschine für eine koordinatengesteuerte Ablage.

Eine gewöhnliche Sämaschine besteht aus einem nicht angetriebenen Fahrzeug, welches mit einer Zugmaschine über eine Dreipunktaufhängung fest gekoppelt wird. Aufgrund der ungedämpften Fahrzeugkoppelung kann zur Vereinfachung des Bewegungsmodells zunächst davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Längsbewegung der Sämaschine der Bewegung der Zugmaschine entspricht. Des Weiteren erfolgt die Ablageprozedur für die Saatkörner über eine dosierbare Handgasschaltung mit einer recht konstanten Geschwindigkeit, sodass nach der Anfahrt von vernachlässigbaren Beschleunigungen während der Längsfahrt ausgegangen werden kann. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die ungestörte Bewegung der Maschine während der Längsfahrt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung darstellt.

Die allgemeine Bewegungsgleichung eines Fahrzeuges mit gleichmäßiger Beschleunigung ist in der Bewegungsdifferentialgleichung (4-21) dargestellt. Beschleunigungsänderungen sind hierbei nicht zugelassen. Der formale Übergang von der kontinuierlichen physikalischen Darstellung in den zeitdis-

kreten Zustandsraum soll im Folgenden dargestellt werden. Dies ist die Grundvoraussetzung zur Aufstellung der Systemgleichungen der zeitdiskreten KALMAN-Filterung. Nach KUHLMANN (2004A) werden zunächst keine Stellgrößen eingeführt, sodass es sich hier um ein kinematisches Bewegungsmodell in Form einer gewöhnlichen Differentialgleichung handelt.

$$\ddot{\mathbf{y}} = 0 \quad (4-21)$$

Geringfügige Abweichungen in der Beschleunigung durch Drehzahlschwankungen des Motors können durch eine Störgröße $s_{\ddot{y}}$ erfasst werden. Diese gewöhnliche Differentialgleichung lässt sich mit den Zustandsgrößen $x_1 = y$, $x_2 = \dot{x}_1$ und $x_3 = \dot{x}_2$ zunächst als vektorielle Differentialgleichung 1. Ordnung (4-22) darstellen:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot s_{\dot{x}_3} \quad (4-22)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{S}' \cdot \mathbf{w}'$$

Zur Lösung des homogenen Teils der Differentialgleichung wird die Exponentialfunktion eingeführt, sodass die Transitionsmatrix (4-23) folgende Darstellung besitzt:

$$\mathbf{T}(k) = e^{\mathbf{F} \cdot \Delta t} \quad (4-13)$$

Eine Potenzreihe der Exponentialfunktion (4-24) dient der Bestimmung der matriziellen Exponentialfunktion. Die Variable wird hierbei durch die entsprechenden Matrizen (4-25) ersetzt (BRONSTEIN/SEMENDJAJEW 1987).

$$e^{\mathbf{F}} = 1 + \frac{\mathbf{F}}{1!} + \frac{\mathbf{F}^2}{2!} + \frac{\mathbf{F}^3}{3!} + \dots \quad (4-24)$$

$$\text{mit } \mathbf{F}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}^3 = 0 \quad (4-25)$$

Aufgrund der gegebenen Matrizen (4-25) konvergiert die Potenzreihe schnell, sodass sich als Lösung der Transitionsmatrix (4-26) folgende Matrix herauskristallisiert.

$$\mathbf{T}(k) = 1 + \mathbf{F} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{F}^2 \cdot \Delta t^2 = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-26)$$

Für die zugehörigen Störgrößen (4-27) ergibt sich der folgende integrale Ansatz:

$$\mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{w}(k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot \mathbf{S}'(\tau) \cdot \mathbf{w}'(\tau) d\tau = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \\ 1 \end{pmatrix} \cdot s_{x_3} \quad (4-27)$$

Als Ergebnis erhält man daraus die gleichmäßig beschleunigte Bewegung als Systemgleichung (4-28) für eine KALMAN-Filterung im zeitdiskreten Zustandsraum:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} (k+1) = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} (k) + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t \\ 1 \end{pmatrix} \cdot s_{x_3}$$

(4-28)

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{T}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{w}(k)$$

Der Zustandsvektor $\mathbf{x}(k+1)$ beinhaltet in den Größen x_1 bis x_3 den Ort, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeuges entlang der Trajektorie. Das Ergebnis zeigt zunächst die einfache und nachvollziehbare Modellierung der Fahrzeugbewegung im 1D-Raum. Eine ähnliche Darstellung ist auch in der Veröffentlichung von PELZER (1993) zu finden. Eine Erweiterung auf den 2D-Raum kann durch das Hinzufügen von weiteren Zuständen x_i vorgenommen werden. Eine anschließende Übertragung auf die Bewegungen in der Präzisionslandwirtschaft ist prinzipiell denkbar. Eine experimentelle Ermittlung des typischen Bewegungsablaufs einer landwirtschaftlichen Maschine unter Feldbedingungen in Form einer „normalen“ Säfahrt kann die Anwendbarkeit dieser Systemgleichungen für die Aufgabe aus der Präzisionslandwirtschaft bestätigen. Dies stellt gleichzeitig die Möglichkeit eines praktischen Ansatzes zur Bildung von Systemgleichungen dar. Zunächst wird dazu ein plausibles Nutzungskonzept benötigt.

4.4.4 Nutzungskonzept für einen experimentell ermittelten Modellansatz

Die Überführung eines einfachen Faltungsintegrals (4-8) in Differentialgleichungen scheint die Grundidee eines Nutzungskonzepts zur experimentellen Ermittlung des Bewegungsmodells für ein bestimmtes Objekt (Sämaschine) darstellen. Dies zeigt neben den theoretischen Ansätzen eine andere Möglichkeit zur Herleitung und Aufstellung der benötigten Systemgleichungen eines Filteransatzes. Generell wird dazu das Fahrzeugverhalten auf der Grundlage von bekannten Bewegungsgesetzmäßigkeiten approximiert, ohne jedoch eine typische Bewegung messtechnisch erfasst, analysiert und als Grundlage genutzt zu haben (KUHLMANN/SIEMES 2007).

Ziel dieses Ansatzes ist die Ermittlung eines speziellen Bewegungsmodells für eine Einzelkornsämaschine aufgrund der Analyse ihrer realen gemessenen Bewegung. Dazu finden Testmessungen mit der Sämaschine und dem in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Multi-Sensor-System, adaptiert an eine Sämaschine, statt (vgl. Abb. 4-19).



Abb. 4-19: Säfahrt zur Ermittlung des Bewegungsmodells

Zur Bestimmung des Modellansatzes für Längsbewegungen wurden zunächst nur GPS-Messungen genutzt. Bei einer entsprechenden Ausdehnung der Längsfahrt ist die Genauigkeit ausreichend und eine Genauigkeitssteigerung durch weitere Sensoren unnötig. Daraus werden die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder ggf. höhere Ableitungen berechnet, die durch geeignete Funktionen (z.B. Polynome) geglättet werden. Die Glättung durch Polynome bewirkt eine weitestgehende Eliminierung der zufälligen Messabweichungen. Signifikante systematische Fehlereinflüsse sind aufgrund einer optimalen GPS-Antennenposition nicht zu erwarten. Die so ermittelten Funktionen repräsentieren das rauschfreie Bewegungsverhalten und ergeben quasi „Sollinformationen“ bzgl. des Bewegungsverhaltens in Längsrichtung.

Wird die Gewichtsfunktion $g(\tau)$ eines Faltungsintegrals als gleitendes Mittel interpretiert, so können sowohl zeitlich zurückliegende als auch zukünftige Messwerte zur Bestimmung des aktuellen Wertes genutzt werden. Genau dies geschieht ebenfalls bei einer Polynomregression. Die Polynome zur Glättung der Geschwindigkeit oder Beschleunigung können somit als Gewichtsfunktion interpretiert werden. Wie in PELZER (1977) gezeigt, ist die analytische Überführung der Gewichtsfunktion in eine Differentialgleichung möglich, woraus sich wiederum die für den KALMAN-Filter notwendige zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung gewinnen lässt (vgl. Abb. 4-20). Für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist die Überführung und Diskretisierung im Einzelnen in KUHLMANN (2004C) aufgezeigt. Dieses Konzept bildet die Grundlage des experimentell ermittelbaren Modellansatzes.

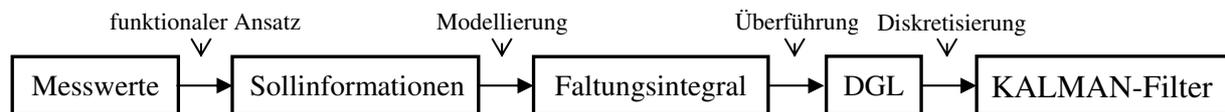


Abb. 4-20: Bildung eines Filteransatzes durch Sollinformationen

Für den Fall der Approximation einer Beschleunigung mittels Polynomansatz ergibt sich z.B. folgender Ansatz: Aus den gemessenen GPS-Positionen werden durch geeignete Differenzbildung zunächst die Werte für die Beschleunigungen ermittelt. Diese mit Messabweichungen behafteten Daten können durch geeignete Polynome geglättet werden, was zur Elimination des Messrauschens und somit zur Sollinformation der Bewegung der Maschine führt. Wie bereits erläutert, können diese Polynome als Gewichtsfunktion im Faltungsintegral aufgefasst werden. Somit liegt die Anschauung zur Kinematik des Systems in Form einer Änderung der Beschleunigung mit der Zeit vor. Die Beschleunigung bildet wiederum eine Differentialgleichung 2ter Ordnung (4-29). Sollten jedoch zu hohe Polynomgrade auftauchen, wäre es ratsam, nicht die Beschleunigung, sondern höhere Ableitungen nach der Zeit für die Approximation zu wählen, wie bspw. bei der 3. Ableitung die Änderung des „Rucks“ mit der Zeit.

$$\ddot{x}(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 \dots \quad (4-29)$$

Für solche Differentialgleichungen ist eine Überführung in die zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung möglich. Bewegt sich die Landmaschine während der Aussaat mit konstanter Beschleunigung, also ohne Ruck ($\ddot{x}(t) = 0$), so erhält man folgenden einfachen Übergang zur Transitionsmatrix $\mathbf{T}(t)$ im zeitdiskreten Zustandsraum mit Position x , Geschwindigkeit v und Beschleunigung a . Die Transitionsmatrix beschreibt dabei den Übergang des dynamischen Systems Sämaschine von einem Zeitpunkt k zum nächsten Zeitpunkt $k + 1$. Gleichung (4-30) beschreibt dieses kinematische Modell und wurde schon bei anderen vergleichbaren Ansätzen verwendet (PELZER 1985/1993).

$$\ddot{x}(t) = 0; \quad \ddot{x}(t) = b_0 = a(t); \quad \mathbf{x}'(t + \Delta t) = \mathbf{T}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ v \\ a \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ v \\ a \end{bmatrix}_k \quad (4-30)$$

Die Schwierigkeiten bei der Realisierung des aufgezeigten Ansatzes sind durch folgende Merkmale gegeben:

- Die approximierenden Funktionen müssen auf der einen Seite das Messrauschen unterdrücken, dürfen auf der anderen Seite die tatsächlichen Bewegungsvariationen aber nicht unterdrücken.
- Es kommen verschiedene funktionale Ansätze zur Glättung der Messwerte in Betracht: bspw. gleitende Mittelwertbildung, ausgleichende Polynome, stückweise Polynomansätze.

- c) Es muss entschieden werden, ob die Geschwindigkeit v , die Beschleunigung a oder Ableitungen höherer Ordnung geglättet werden und somit als Ansatz dienen.
- d) Die Eingangsgrößen, wie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen etc. werden hier aus Differenzen diskreter Messwerte berechnet (z.B. $v = ds/dt$). Aufgrund der Verrauschtheit der Messwerte liegt bei zu kurzem ds ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis vor. Eine Verbesserung kann durch die Berechnung von ds für weiter auseinander liegende Messzeitpunkte erfolgen, wobei auch für diesen Zeitunterschied (Fensterbreite) geeignete Werte festgelegt werden müssen (CZOMMER 2001). In Verbindung mit der variablen Abtastrate (1Hz, 10Hz, ...) erfolgt in diesem Vorverarbeitungsschritt schon eine Filterung, welche vor dem Hintergrund von Punkt a) zu bewerten ist.

Im vorliegenden Fall erfolgt die Festlegung der in a) bis d) angesprochenen Variationsmöglichkeiten nicht automatisiert, sondern empirisch. Dieses ist aus praktischen Gründen akzeptabel, da die Bestimmung der Struktur der Systemgleichungen gleich bleibt und somit nur einmal erfolgen muss. Außerdem sind die Parameter der Systemgleichung für die bei der Versuchsdurchführung geltenden Bedingungen bestimmt. Im praktischen Einsatz können kleine Variationen aufgrund des Bodens sowie der Beladung der Maschine durch die rekursive Schätzung im Filter ggf. entsprechend mitgeschätzt werden. Die Quantifizierung dieses Nutzungskonzeptes durch Versuchsfahrten führt schließlich zum gesuchten Bewegungsmodell bzw. zu den Systemgleichungen der KALMAN-Filterung.

4.4.5 Quantifizierung des Modellansatzes

Grundlage für die Funktionalität des Modellansatzes ist die Wahl einer geeigneten anwendungsspezifischen Approximation des realen Systemverhaltens. Die Ergebnisse der experimentellen Quantifizierung ermöglichen dann die Ableitung entsprechender Systemgleichungen zur Nutzung in einem Filteransatz und stellen somit einen Teilschritt zur parametrischen Identifikation des Gesamtsystems dar. In Abbildung 4-21 ist der prinzipielle Weg von der qualitativen Modellvorstellung zur funktionalen Filtergleichung erkennbar.

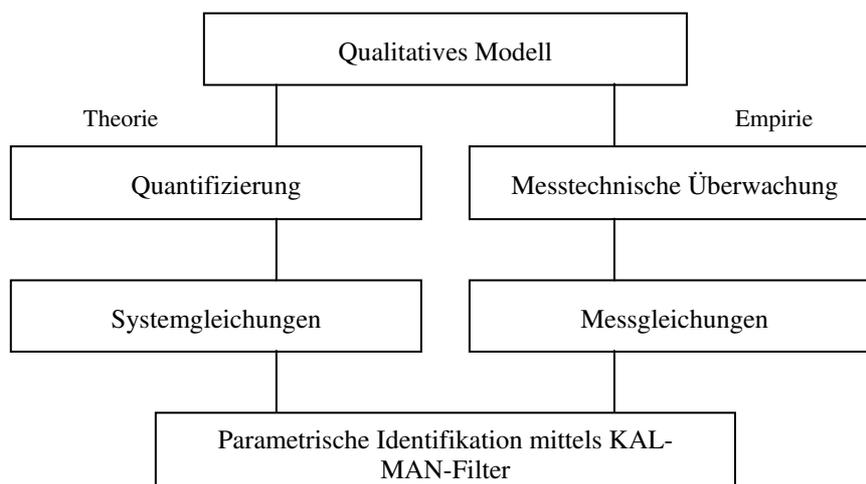


Abb. 4-21: Parametrische Identifikation mittels Kalman-Filterung (nach HEUNECKE 1995)

Das dargestellte Identifikationsverfahren gewährleistet anschließend die Zusammenführung der theoretischen Bewegungsbeschreibung mit der Empirie in Form unterschiedlicher Messdaten. Die Folge ist eine Optimierung des Modellansatzes bzgl. der Realität durch die Verknüpfung in einem gemeinsamen Schätzalgorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate (EICHORN 2005). Diese optimale Schätzung der gesuchten Parameter gibt die Bewegung des Fahrzeugs entlang der Trajektorie wieder. Hieraus lässt sich anschließend eine optimale Führungsgröße für den Saatprozess ableiten.

Die Quantifizierung des Bewegungsmodells für die Längsfahrt auf der Basis des in Kapitel 4.4.4 beschriebenen Nutzungskonzeptes erfolgt auf der Basis von praktischen Versuchsfahrten. Die Sensorausstattung und die Rahmenbedingungen der Versuchsfahrten entsprechen weitestgehend der späteren Säfahrt. Die Messfahrten wurden entlang einer Geraden mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 km/h und einer Taktrate von 10 Hz durchgeführt. Dies entspricht einer praxisnahen Längsaussaat mit 20 cm Wegstrecke pro Messwert. Wie bereits beim Nutzungskonzept erläutert, werden dabei nur die GPS-Messungen zur Bestimmung der benötigten Sollinformationen herangezogen. Die Resultate der Quantifizierung werden im weiteren Verlauf dargestellt, wobei die Problematik der Längsbewegung zunächst in Form eines 1D-Ansatzes behandelt ist.

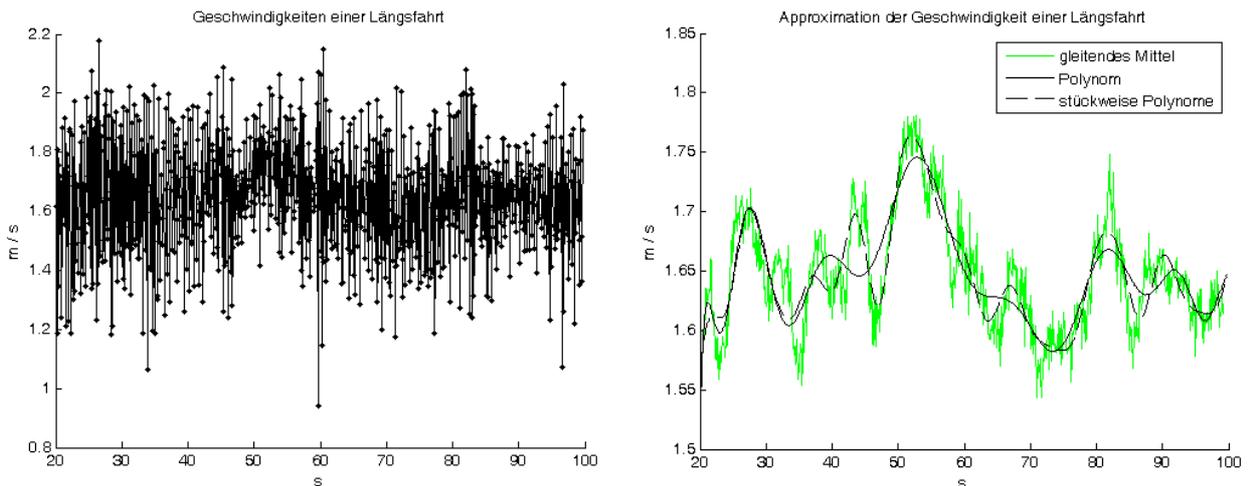


Abb. 4-22: links: aus GPS-Daten berechnete Geschwindigkeiten, rechts: Darstellung verschiedener Approximationsansätze für die Geschwindigkeit

Die Abbildung 4-22 zeigt den zeitlichen Verlauf verschiedener Approximationen der Geschwindigkeit (v), deren Ausgangswerte aus den berechneten und auf eine Gerade projizierten Strecken der GPS-Messungen stammen. Es ist hier das gleitende Mittel (11 Werte; gleichgewichtet), ein Polynomansatz (Grad 18) und stückweise Polynome (Grad 3; 24 Stücke; Bedingungen: gleicher Funktionswert, gleiche Steigung, gleiche Krümmung) für die Sollinformation aus Geschwindigkeitsdaten gebildet worden. Die Fensterbreite liegt bei diesem Versuchsansatz bei 0,1 s. Man erkennt in der Graphik deutlich die fehlende Gleichmäßigkeit in der Geschwindigkeit.

Eine Approximation dieser Fahrt durch ein gleitendes Mittel zeigt ein hohes Rauschen. Die vorhandene Massenträgheit des Versuchsträgers wird somit nicht ausreichend wiedergegeben. Deutlich besser ist dies beim Polynomansatz. Problematisch ist hierbei der recht hohe Polynomgrad von 18 bedingt durch die ungleichmäßige Geschwindigkeit während der Versuchsfahrt. Den besten Approximationsansatz liefern hier stückweise Polynome. Der Grad kann mit 3 recht niedrig gehalten werden.

Die Abbildung 4-23 zeigt die Ergebnisse desselben Versuches, jedoch für die Beschleunigungen a . Es sind hier wiederum das gleitende Mittel (11 Werte; gleichgewichtet), ein Polynomansatz (Grad 1) und stückweise Polynome (Grad 2; 4 Stücke; Bedingungen: gleicher Funktionswert, gleiche Steigung, gleiche Krümmung) für eine mögliche Sollinformation aus Beschleunigungsdaten gebildet worden. Die 11 Werte für das gleitende Mittel entsprechen bei 10 Hz Aufzeichnungsrate einer Zeit von einer Sekunde. Die Fensterbreite liegt bei 0,1 s.

Betrachtet man diesen Ansatz, so erkennt man, dass eine Approximation durch wesentlich einfachere funktionale Ansätze möglich ist. Das gleitende Mittel zeigt ein recht starkes Rauschen, was wiederum den physikalischen Bewegungsmöglichkeiten des Wagens nicht entspricht, aber u. a. durch die höhere Ableitung hervorgerufen wird. Der Verlauf des gleitenden Mittels der Beschleunigung über die Zeit lässt aber eindeutig die Vermutung einer Konstanz zu. Somit kann ein einfacher Polynomansatz in

Form einer Geraden gewählt werden, und auch der Ansatz mittels stückweisen Polynomen kommt mit dem Grad 2 und wenigen Stücken bei gleichen Bedingungen aus.

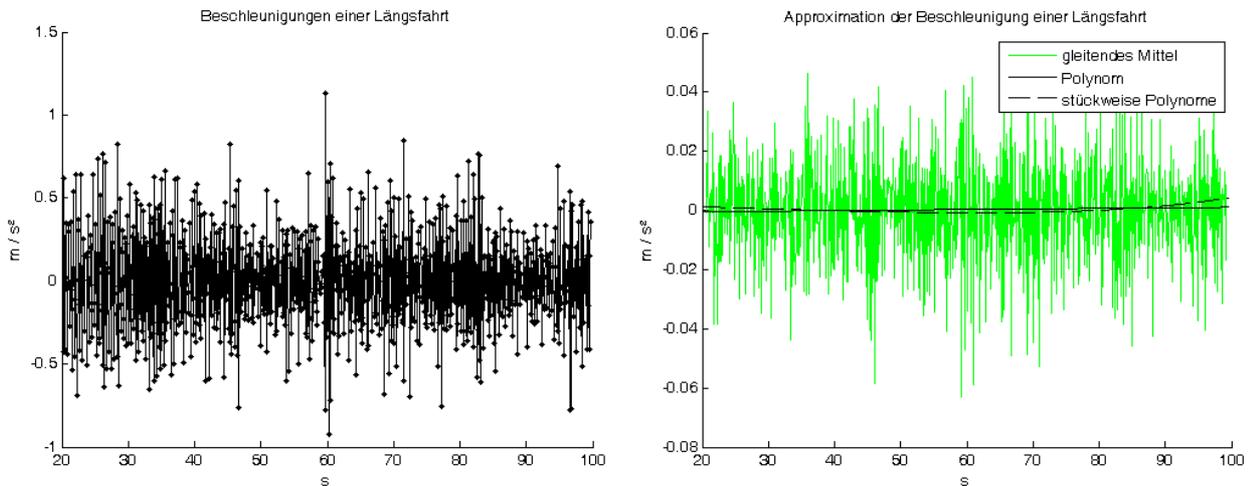


Abb. 4-23: links: aus GPS-Daten berechnete Beschleunigungen, rechts: Darstellung verschiedener Approximationsansätze für die Beschleunigung

Abbildung 4-23 (rechts) zeigt weiterhin, dass die Funktion des gleitenden Mittels eine Variation der Beschleunigung von $2 - 4 \text{ cm/s}^2$ besitzt. In diesem Rauschband sind noch die Anteile der zufälligen Abweichungen der GPS-Messungen enthalten. Dies entspricht wiederum einer Variation von $1 - 2 \text{ cm}$ in der Strecke innerhalb einer Zeit von einer Sekunde. Daraus lässt sich ableiten, dass die mittels Polynomansatz repräsentierte Trägheit des Systems für die oben genannte Anforderung an die Genauigkeit hinreichend sein könnte.

Die gezeigten Ergebnisse der Quantifizierung lassen erkennen, dass die Modellierung und Überführung einer Längsbewegung bei Landmaschinen aufbauend auf der funktionalen Glättung von repräsentativen Messwerten prinzipiell möglich ist. Der Ansatz über ein gleitendes Mittel führt bei kurzen Mittelungsintervallen zu keinem glatten Verlauf. Er kann aber als erster Hinweis für den tatsächlichen Verlauf der Sollbewegung dienen. Polynome oder auch stückweise Polynome führen zu einem glatteren, realitätsnahen Verlauf der Bewegung des Objektes. Die Überführung der nicht-parametrischen Darstellung in eine parametrische, zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung ist insbesondere bei kleinen Polynomgraden einfach, und das Bewegungsverhalten ist physikalisch leicht nachvollziehbar. Dies führt im vorliegenden Fall (Handgas + starke Getriebeübersetzung) zur Approximation durch eine Gerade und damit zum Beschleunigungsansatz aus Kapitel 4.4.3. Eine Übertragung der Erkenntnisse der Versuchsfahrten auf den realen Säprozess ist aufgrund der größeren Trägheit und der befüllten Sämaschine und dem damit verbundenen glatteren Verlauf der Bewegung als unproblematisch zu erachten.

4.4.6 Bewertung der Erkenntnisse und Möglichkeiten zur Realisierung

Die Untersuchungen in den letzten Kapiteln beschäftigen sich mit dem Aufbau eines präzisen feldtauglichen Multi-Sensor-Systems und der Modellierung der Längsbewegung einer Landmaschine mit einem speziellen Filteransatz. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Testfahrten zur Findung eines geeigneten Filteransatzes ableiten:

- Die grundlegende Funktionsfähigkeit des experimentellen Ansatzes zur Modellierung der Bewegung wurde gezeigt, sodass ein Übergang auf eine Sämaschine möglich ist.
- Ein einfaches funktionales Modell der Systemgleichung ist z.B. als gleichmäßig beschleunigte Bewegung gegeben (vgl. Abb. 4-23).

- Die Ergebnisse ermöglichen für den genannten Fall zusätzlich eine erste Abschätzung des Systemrauschens mit ca. $0,01 \text{ m/s}^2$. Damit scheinen die genannten Genauigkeitsforderungen für die Gleichabständigkeit der Saat erreichbar.
- Die Sollinformation für den Weg lässt sich analytisch mittels der ermittelten Sollinformation für die Beschleunigung ableiten. Aus den Differenzen der GPS-Messungen und der Messwerte der anderen Sensoren zu diesen Sollinformationen könnte das stochastische Modell der Messgleichungen an Stelle von Kalibrierungen schon berechnet werden. Der Filteransatz ist vollständig.

Diese Modellierung muss nun in einem realen Filteralgorithmus implementiert und anschließend durch praktische Feldversuche für die koordinatengesteuerte Aussaat während der Längsfahrt verifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass landwirtschaftliche Fahrzeuge unter optimierten Saatbedingungen ein mit dem Kfz-Bereich vergleichbares Bewegungsverhalten aufweisen. Eine Übertragung bewährter Modellbildungen aus dem Kfz-Bereich auf landwirtschaftliche Fahrzeuge scheint somit für die Längsfahrt möglich (vgl. Kapitel 4.4.3). Eine Verknüpfung des Längsfahransatzes mit der Wendeproblematik ist bei einer geeigneten Umsetzung des Gesamtkonzepts (2D-Koordinaten) ebenfalls denkbar. Das Ergebnis der Filterung ist eine Führungsgröße für die Regelung des Ablageprozesses einer Mehrreihensämaschine.

4.4.7 Ein Filteransatz für Bewegungen in der Präzisionslandwirtschaft

Die vorgestellten Untersuchungen zur Bewegung einer Sämaschine in Längsfahrt aus den vorherigen Kapiteln haben ergeben, dass eine Approximation in Form einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung nahe Null als Systembeschreibung für die Rübensaat ausreicht. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die hohe Oberflächengüte des vorbereiteten Saatbettes und das Fahren über entsprechend untersetztes Handgas zunächst keine spezielle Anpassung an die landwirtschaftlichen Bedingungen erfordert. Basis kann somit das Modell für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen aus dem Kfz-Bereich sein, z.B. EICHHORN (2005). Durch eine Anpassung der Parameter an die Rahmenbedingungen u.a. in Form wesentlich höherer Genauigkeits- und Prozesssicherheitsforderungen ergibt sich hieraus ein nutzbarer Filteransatz für landwirtschaftliche Fahrzeugbewegung. Eine höhere Genauigkeit bei der Echtzeit-Positionsbestimmung kann dabei durch eine bessere Sensorik und höhere Taktraten bei der Sensorerfassung und der Berechnung erzielt werden. Zeitlich kleinräumige Änderungen in der Bewegung können durch diese feinstrukturiertere Diskretisierung detaillierter erfasst werden. Zu beachten ist dabei die steigende Korrelation zwischen den einzelnen Messwerten aufgrund der geringeren Änderungen der Rahmenbedingungen. Die Anwendung der KALMAN-Filterung setzt grundsätzlich weißes Rauschen in den Messwerten und auch in den Systemgleichungen im Berechnungsintervall voraus. Bei Korrelationen zwischen den einzelnen Messungen mit einem Wert von mehr als 0,3 wird die Schätzung des Zustandvektors durch eine solche Filterung nachhaltig beeinflusst, sodass der Korrelationseinfluss des System- oder Messrauschens in die Filterung eingebunden werden muss (SCHRICK 1977).

Im Bereich der Fahrzeugnavigation und der Erfassung von Fahrzeugtrajektorien sind bereits viele erprobte Ansätze zur Filterung vorhanden. Ziel ist dabei die permanente Bestimmung der Position entlang der Fahrstrecke. Die Adaption und eventuelle Modifikation eines solch erprobten Ansatzes für den Bereich der Präzisionslandwirtschaft unter Beachtung der höheren Genauigkeitsanforderungen erscheint aufgrund der ähnlichen Problematik als sinnvoll. Lösungen aus dem Kfz-Bereich basieren meist auf einem verebneten 2D-Koordinatenbezug. Eine solche 2D-Lösung ist vor dem Hintergrund der späteren Wendeproblematik mit dynamischer Kurvenfahrt und Bestimmung des Startpunktes für die Anschlussfahrt einer 1D-Lösung vorzuziehen. Die Bestimmung der Pflanzenstandorte für zukünftige Bestands Pflegemaßnahmen, Informationsmanagementaufgaben und der Bezug zum Kataster sind von Bedeutung für die Akzeptanz des Lösungsansatzes. Ein verebneten 2D-Ansatz stellt somit eine geeignete Lösung für die Anforderungen in der Präzisionslandwirtschaft dar.

Der zur Realisierung der koordinatengesteuerten Rübensaabverwendung verwendete Filterungsansatz basiert auf den Grundlagen von AUSSEMS (1999) und der Modifikation von EICHHORN (2005). Dieser Ansatz wurde primär für die Fahrzeugnavigation ohne „MapMatching“ entwickelt, kann aber auf ähnliche Fahrzeugbewegungen übertragen werden. Die 2D-Bewegung wird hierbei als eine Folge von ebenen Kreisbögen mit einer gemeinsamen Tangente in den Übergangspunkten approximiert. Bei den verwendeten Messtakraten von 10 Hz bzw. 250 Hz (vgl. Kapitel 4.2.3) können die Bewegungsstücke aufgrund der hohen Massenträgheit als hinreichend gleichförmig, bzw. als Bewegung mit annähernd konstanter Geschwindigkeit (vgl. Kapitel 4.4.5), angesehen werden (EICHHORN 2005). Markante Änderungen bzgl. der Gleichmäßigkeit in Folge von Brems- und Beschleunigungsvorgängen werden durch die Einführung von Störgrößen in der KALMAN-Filterung abgefangen. Die trajektorienbegleitende Parametrisierung der Bewegung entlang eines Bogenstücks ist in Abbildung 4-24 dargestellt.

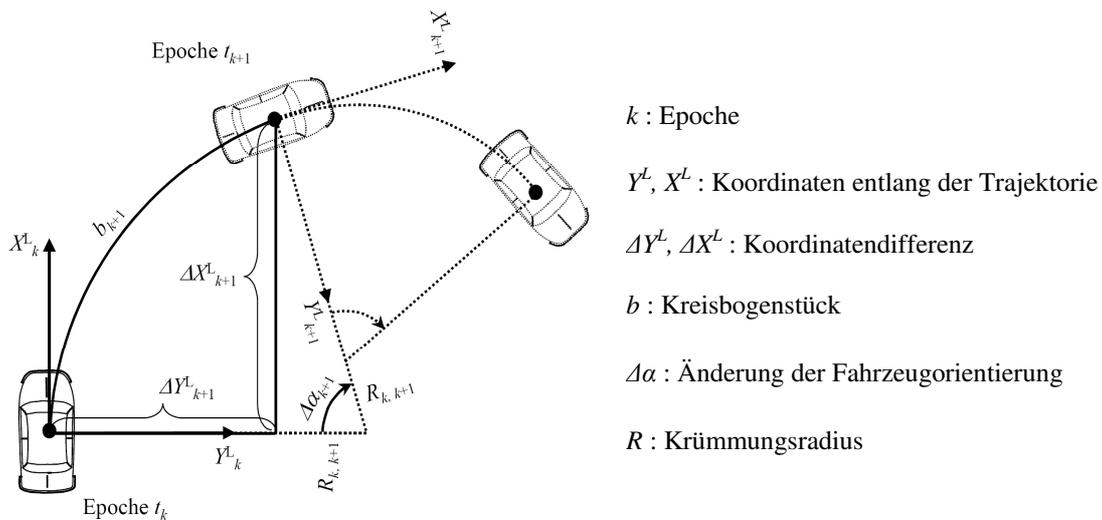


Abb. 4-24: Trajektorienbegleitendes Koordinatensystem (Quelle: EICHHORN 2005)

Bezogen auf das feste äußere Koordinatensystem, resultiert neben einer translatorischen Bewegung des Fahrzeugs auch eine rotatorische Bewegung um die Fahrzeugachse. Jeder neue Erfassungszeitpunkt beinhaltet eine neue Tangente in Richtung der Fahrzeuglängsachse an die entsprechend zurückgelegte Bogenstücke. Dieses trajektorienbegleitende Koordinatensystem hat den Vorteil, dass sich das Fahrzeug bzgl. seiner Längsausrichtung (Orientierung) an den approximierten Trajektorienverlauf anpassen kann.

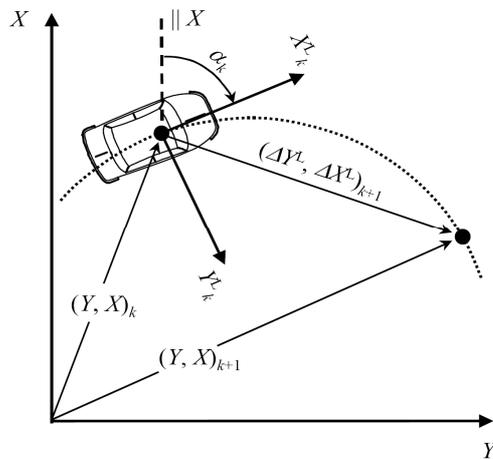
Eine Implementierung aller zeitlich veränderlichen Parameter in eine KALMAN-Filterung bedarf einer dem Bewegungsverhalten des Fahrzeugs angepassten rekursiven Beschreibung in Form von Zuständen. Problematisch ist hierbei der Krümmungsradius, welcher nicht direkt auf das Fahrzeugverhalten bezogen werden kann. Die Substitution des Krümmungsradius durch eine Funktion der Fahrzeugbahngeschwindigkeit v_k wird von AUSSEMS (1999) als Lösung vorgeschlagen (vgl. 4-31).

$$\Delta Y_{k+1}^L = R_{k,k+1} (1 - \cos(\Delta \alpha_{k+1})) = \frac{v_k \Delta t}{\Delta \alpha_{k+1}} (1 - \cos(\Delta \alpha_{k+1}))$$

$$\Delta X_{k+1}^L = R_{k,k+1} \sin(\Delta \alpha_{k+1}) = \frac{v_k \Delta t}{\Delta \alpha_{k+1}} \sin(\Delta \alpha_{k+1})$$

(4-31)

Die Transformation in ein festes rechtwinkliges Bezugssystem zur Darstellung der Bewegung entlang der Trajektorie ist durch eine 2D-Ähnlichkeitstransformation gegeben (vgl. Abb. 4-25).



k : Epoche

Y, X : absolute Koordinaten im Bezugssystem

α_k : Fahrzeugorientierung

Abb. 4-25: Übertragung ins Bezugssystem (Quelle: EICHHORN 2005)

Dabei wird die Fahrzeugorientierung, bezogen auf die Hochachse des Bezugssystems, durch den Rotationsparameter α_k ausgedrückt. Werden die lokalen Koordinaten aus (4-32) in eine Ähnlichkeitstransformation eingesetzt, so ergeben sich folgende nicht-linearen Bewegungsgleichungen für die KALMAN-Filterung:

$$\begin{pmatrix} Y_{k+1} \\ X_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_k \\ X_k \end{pmatrix} + \frac{v_k \Delta t}{\Delta \alpha_{k+1}} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_k) & \sin(\alpha_k) \\ -\sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \cos(\Delta \alpha_{k+1}) \\ \sin(\Delta \alpha_{k+1}) \end{pmatrix}$$

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha_{k+1} \quad (4-32)$$

$$v_{k+1} = v_k$$

Die linke Seite des Gleichungssystems (4-32) repräsentiert die zu schätzenden Zustände in der Filterung. Eine weitere Besonderheit dieses Ansatzes für die Bewegungsgleichungen liegt in der Einführung der Orientierungsänderung $\Delta \alpha_{k+1}$ als Stellgröße und nicht als Zustand. Hierdurch werden Überschwingungseffekte aus der Filterung gedämpft und gleichzeitig die Trägheit der Filterung bei Kurven bzw. Richtungswechsel reduziert (EICHHORN 2005). Als Zustandsvektor (4-33) wird festgelegt:

$$\mathbf{x}_k^T = (Y_k, X_k, \alpha_k, v_k) \quad (4-33)$$

Für die Längsfahrt ist dieses verbesserte Ansprechverhalten auf Richtungsänderungen von geringerer Wichtigkeit, bezogen auf den Gesamtbewegungsablauf der Säfahrt jedoch entscheidend, da der Wendevorgang auf kleinräumigen und dynamischen Kurvenfahrten basiert. Folglich scheint dieser Kfz-Ansatz als gemeinsame Modellierung für den Gesamtbewegungsablauf der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben geeignet. Eine komplett getrennte Modellierung für die Längsfahrt und Wende kann hierdurch entfallen. Außerdem ist bei diesem 2D-Ansatz die Einführung weiterer Störgrößen, z.B. in Form einer zweiten Winkelbeschleunigung, überflüssig. Eine Störbeschleunigung für die Bahngeschwindigkeit v_k ist ausreichend, was für die Schätzung der Zustände numerisch günstiger ist. Diese Störbeschleunigung verläuft in tangentialer Richtung der Trajektorie und wird als Störterm $a_{w,k}$ mit $E\{a_{w,k}\} = 0$ in die Systemgleichung der KALMAN-Filterung eingeführt.

Aus den Bewegungsgleichungen (4-32) sind des Weiteren die gestörten Systemgleichungen im zeitdiskreten Zustandsraum für die KALMAN-Filterung zu bilden. Hierzu müssen die Komponenten der Transitionsmatrix $\mathbf{T}_{k+1,k}$, der Matrix der Stellgrößen $\mathbf{B}_{k+1,k}$ und der Matrix für den Einfluss der Störgrößen

ben gebildet werden. Eine Lösung besteht in der Bildung der entsprechenden partiellen Ableitungen. Die partiellen Ableitungen der Systemgleichungen nach den Zuständen ergeben die einzelnen Komponenten der Transitionsmatrix sowie die partiellen Ableitungen nach der Stellgröße zu den Komponenten der Stellgrößenmatrix $\mathbf{B}_{k+1,k}$ führen. Die Elemente für die Matrix der Störbeschleunigung werden aus der mathematischen Beschreibung des Einflusses der tangentialen Störbeschleunigung $a_{w,k}$ während des Filterfortschrittes Δt auf die Zustände gebildet. Die Störbeschleunigung beeinflusst dabei direkt die Bahngeschwindigkeit v_k und indirekt alle mit dieser Geschwindigkeit verknüpften Parameter. Auf die Berechnung und weitere Zwischenschritte des mathematischen Übergangs von den Bewegungsgleichungen zu den zeitdiskreten gestörten Systemgleichungen der Filterung soll hier nicht eingegangen werden. Einzelheiten zum mathematischen Übergang der Bewegungsgleichungen zu den Systemgleichungen können der Veröffentlichung von EICHHORN (2005) entnommen werden. Im Vordergrund dieser Arbeit steht die praktische Realisierung einer koordinatengesteuerten Aussaat mit Hilfe einer für die Präzisionslandwirtschaft geeigneten KALMAN-Filterung.

Für diesen kausal modifizierten Filterungsansatz ergeben sich die im Folgenden dargestellten Systemgleichungen (4-34):

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \tilde{Y}_{k+1} - \bar{Y}_{k+1} \\ \tilde{X}_{k+1} - \bar{X}_{k+1} \\ \tilde{\alpha}_{k+1} - \bar{\alpha}_{k+1} \\ \tilde{v}_{k+1} - \bar{v}_{k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & -\Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ 0 & 1 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{Y}_k - \hat{Y}_k \\ \tilde{X}_k - \hat{X}_k \\ \tilde{\alpha}_k - \hat{\alpha}_k \\ \tilde{v}_k - \hat{v}_k \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} \hat{v}_k \Delta t \left(\frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1})}{\Delta\alpha_{k+1}} + \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}^2} \right) \\ \hat{v}_k \Delta t \left(\frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1})}{\Delta\alpha_{k+1}} - \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}^2} \right) \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} (\Delta\tilde{\alpha}_{k+1} - \Delta\alpha_{k+1}) \\
 &+ \begin{pmatrix} -\frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{2\Delta\alpha_{k+1}} \Delta t^2 \\ \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{2\Delta\alpha_{k+1}} \Delta t^2 \\ 0 \\ \Delta t \end{pmatrix} a_{w,k}
 \end{aligned} \tag{4-34}$$

Die gestrichenen Größen bezeichnen dabei den prädierten Zustandsvektor, die geschlängelten Größen den wahren Zustand zur Epoche und die Größen mit Dach die geschätzten Zustandsgrößen. Die Beschreibung der Fahrzeugbewegung und das resultierende Gleichungssystem (4-34) sind für Bewegungen entlang eines Bogenstücks mit beliebigem Radius ausgelegt. Bei der Geradenfahrt wird die Stellgröße $\Delta\alpha_{k+1}$ zu Null und das Gleichungssystem nicht anwendbar.

Eine Anpassung an die Längsfahrt ist durch die Bildung des Grenzwertes $\lim(\Delta\alpha_{k+1} \rightarrow 0)$ zu finden, wodurch sich das Modell (4-35) einer gleichförmigen, geradlinigen Bewegung aus den Systemgleichungen der KALMAN-Filterung ergibt.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \tilde{Y}_{k+1} - \bar{Y}_{k+1} \\ \tilde{X}_{k+1} - \bar{X}_{k+1} \\ \tilde{\alpha}_{k+1} - \bar{\alpha}_{k+1} \\ \tilde{v}_{k+1} - \bar{v}_{k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \hat{v}_k \Delta t \cos \hat{\alpha}_k & \Delta t \sin \hat{\alpha}_k \\ 0 & 1 & -\hat{v}_k \Delta t \sin \hat{\alpha}_k & \Delta t \cos \hat{\alpha}_k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{Y}_k - \hat{Y}_k \\ \tilde{X}_k - \hat{X}_k \\ \tilde{\alpha}_k - \hat{\alpha}_k \\ \tilde{v}_k - \hat{v}_k \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} \hat{v}_k \frac{\Delta t}{2} \cos \hat{\alpha}_k \\ -\hat{v}_k \frac{\Delta t}{2} \sin \hat{\alpha}_k \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} (\Delta \tilde{\alpha}_{k+1} - \Delta \alpha_{k+1}) \\
 &+ \begin{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \sin \hat{\alpha}_k \\ \frac{\Delta t^2}{2} \cos \hat{\alpha}_k \\ 0 \\ \Delta t \end{pmatrix} a_{w,k}
 \end{aligned} \tag{4-35}$$

Die Wegstücke der Landmaschine während der Längsfahrt entsprechen in der Regel nicht einer strengen Geraden, sondern vielmehr einem Bogenstück mit sehr großem Radius. Dies liegt an unterschiedlichen Faktoren: an der Feldgeometrie, an dem restlichen Spiel der Aufhängung der Saatmaschine und der durch weichen Untergrund entstehenden geringen seitlichen Pendelbewegungen während der Längsfahrt. Infolgedessen ist - bezogen auf das Gesamtprojekt mit der Längsfahrt und der Wende - dieser Ansatz über ein Bogenstück mit beliebigem Radius als geeignet zu betrachten. Um numerische Probleme bei zu großen Krümmungsradien zu vermeiden, wird bei Steuergrößen bzw. Orientierungsänderungen innerhalb einer Epoche mit $\Delta\alpha_{k+1} < 10$ mgon das Modell einer gleichförmigen, geradlinigen Bewegung unter Bildung des Grenzwertes genutzt.

Neben den Systemgleichungen beinhaltet die Filterung entsprechende Messgleichungen der GPS-, Weg- und Winkelmesswerte zu einer bestimmten Epoche $k+1$. Sie dienen der Anpassung der fortgeschriebenen Zustände entlang der zurückgelegten Trajektorie an die Realität. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen von 1 cm an die Ablagepositionsbestimmung und dem damit verbundenen Anspruch an die Echtzeiterfassung der Messdaten sind zwei Filterungen mit unterschiedlichen Messgleichungen notwendig (vgl. Kapitel 4.2.2):

Im Hauptfilterteil, welcher mit einer Taktrate von 10 Hz arbeitet, gibt es 4 Messgleichungen (4-36).

$$\begin{aligned}
 Y_{GPS,k+1} - \varepsilon_{Y,k+1} &= \tilde{Y}_{k+1} \\
 X_{GPS,k+1} - \varepsilon_{X,k+1} &= \tilde{X}_{k+1} \\
 \Delta\alpha_{k+1} - \varepsilon_{\Delta\alpha,k+1} &= \tilde{\alpha}_{k+1} - \alpha_k \\
 \Delta s_{k+1} - \varepsilon_{\Delta s,k+1} &= \tilde{v}_{k+1} \Delta t
 \end{aligned} \tag{4-36}$$

Diese 4 Messgleichungen werden aus den Koordinatenelementen Y_{GPS} , X_{GPS} , dem Streckenstück Δs und dem Winkelstück $\Delta\alpha$ des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Multi-Sensor-Systems abgeleitet, wobei sich die absolute Orientierung α_k des Fahrzeugs jeweils aus der alten Epoche ergibt.

Der parallel arbeitende zweite Filterteil (250 Hz) stützt sich hingegen nur auf 2 Messgleichungen, welche auf den Messwerten Δs und $\Delta\alpha$ der relativen Sensorik basieren. Dieser Filterteil ist somit echtzeitfähig und ermöglicht eine verzögerungsfreie Bildung der Führungsgröße für die Saatkornablage. Neben der Aufspaltung in zwei Filterteile und der Einführung des Grenzwertübergangs für kleine Richtungsänderungen (< 10 mgon) liegt eine weitere Besonderheit des Filterungsansatzes in der Tatsache, dass die Winkeldifferenz sowohl eine Messgröße als auch gleichzeitig eine messbare Stellgröße darstellt. Hierdurch entsteht eine kausal modifizierte Filterung, welche schneller auf tatsächliche Richtungsänderungen bzw. Richtungsabweichungen reagiert (EICHHORN 2005). Neben den Systemgleichungen und den Messgleichungen der beiden KALMAN-Filter ist das stochastische Modell für die Zuckerrübensaat mittels geodätischem Multi-Sensor-System zu generieren.

Das stochastische Modell der KALMAN-Filterung (4-34) bzw. (4-35) setzt sich aus den Kovarianzmatrizen der folgenden Komponenten zusammen:

- Zustände (x)
- Stellgrößen (u)
- Störgrößen (w)
- Messgrößen (L)

Aufgrund der fehlenden Kenntnis von Verknüpfungen zwischen den 4 Komponenten werden zeitlich unkorrelierte Rauschprozesse in der Kovarianzmatrix (4-37) aller Komponenten angenommen. Die Bestimmung der Varianzen der 4 Submatrizen erfolgt empirisch durch Sensorkalibrierungen (vgl. Kapitel 5.1) und/oder mittels einer realitätsnahen Abschätzung (vgl. Kapitel 4.4.6).

$$\Sigma_{L^*L^*,k+1} = \left(\begin{array}{ccc|c} \Sigma_{\ddot{x}\ddot{x},k} & 0 & 0 & 0 \\ & \Sigma_{uu,k} & 0 & 0 \\ & & \Sigma_{ww,k} & 0 \\ \hline & & & \Sigma_{LL,k+1} \end{array} \right) \quad (4-37)$$

Die Ergebnisse der später beschriebenen Sensorkalibrierung mit anschließender Genauigkeitsanalyse liefern die Grundlage des stochastischen Modells der Messgrößen (vgl. Kapitel 5.1). Diese Submatrix umfasst die Varianzen der 4 Beobachtungen aus dem Erfassungsteil des Multi-Sensor-Systems. Liegen farbige Rauschprozesse in den Beobachtungen vor, so können sie durch Kovarianzen im Rahmen eines Formfilteransatzes ergänzt werden. Die hier vorgestellte Filterrealisierung zur Längsfahrt geht zunächst von hinreichend weißem Rauschen in den Messgrößen aus, sodass ebenfalls auf Messebene nur empirische Standardabweichungen und keine Kovarianzen eingeführt werden. Für die Ermittlung der Stochastik der Störgröße wird die mittlere Abweichung von einer gleichförmigen Bewegung ($\ddot{x} = 0$) bei der Aussaat durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge abgeschätzt. Bei der traditionellen Einzelkornaussaat erfolgt die Maschinenfahrt in der Regel durch stark untersetztes Handgas mit Geschwindigkeiten von 1 - 2 m/s. Während der Fahrt können dadurch nur geringe Änderungen in der Geschwindigkeit bedingt durch den Untergrund, das Relief oder den Antrieb der Maschine auftreten. Im Vergleich zu den höheren Geschwindigkeiten von Fahrzeugen im Straßenverkehr erfolgen die Brems- und Anfahrtsmanöver bei der Einzelkornaussaat auf dem Feld mit einer geringeren Dynamik. EICHHORN (2005) schätzt die standardmäßige Beschleunigung eines PKW ohne Extremmanöver im Mittel mit 1 m/s^2 ab. Ausgehend von dieser Abschätzung scheinen mittlere Störbeschleunigungen im landwirtschaftlichen Bereich von $0,1 - 0,2 \text{ m/s}^2$ als realistisch. Diese Werte werden somit in den Störterm der KALMAN-Filterung für die Aussaat in Längsrichtung eingeführt. Die Varianz der Stellgröße lässt sich aus den herstellereigenen Angaben zur Standardabweichung des Drehratensensors ablei-

ten. Für die reine Längsfahrt ist die Winkelinformation jedoch von geringerer Bedeutung. Sie dient hier insbesondere der Detektion bzw. Dämpfung von Sprüngen in den GPS-Messungen sowie der Bestimmung von Abweichungen der Längsfahrt von einer Geraden. Auf der Grundlage dieses landwirtschaftlichen Filteransatzes ergibt sich die im Folgenden erläuterte Softwarelösung.

4.5 Softwarekonzept

Die praktische Umsetzung der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben mithilfe eines Multi-Sensor-Systems erfordert neben verschiedenen Hardware-Komponenten eine echtzeitfähige Programmstruktur zur Verknüpfung und Bearbeitung der Abläufe und Filterungen. Den konzeptionellen Ablauf verdeutlicht Abbildung (4-26) in Form eines Flussdiagramms:

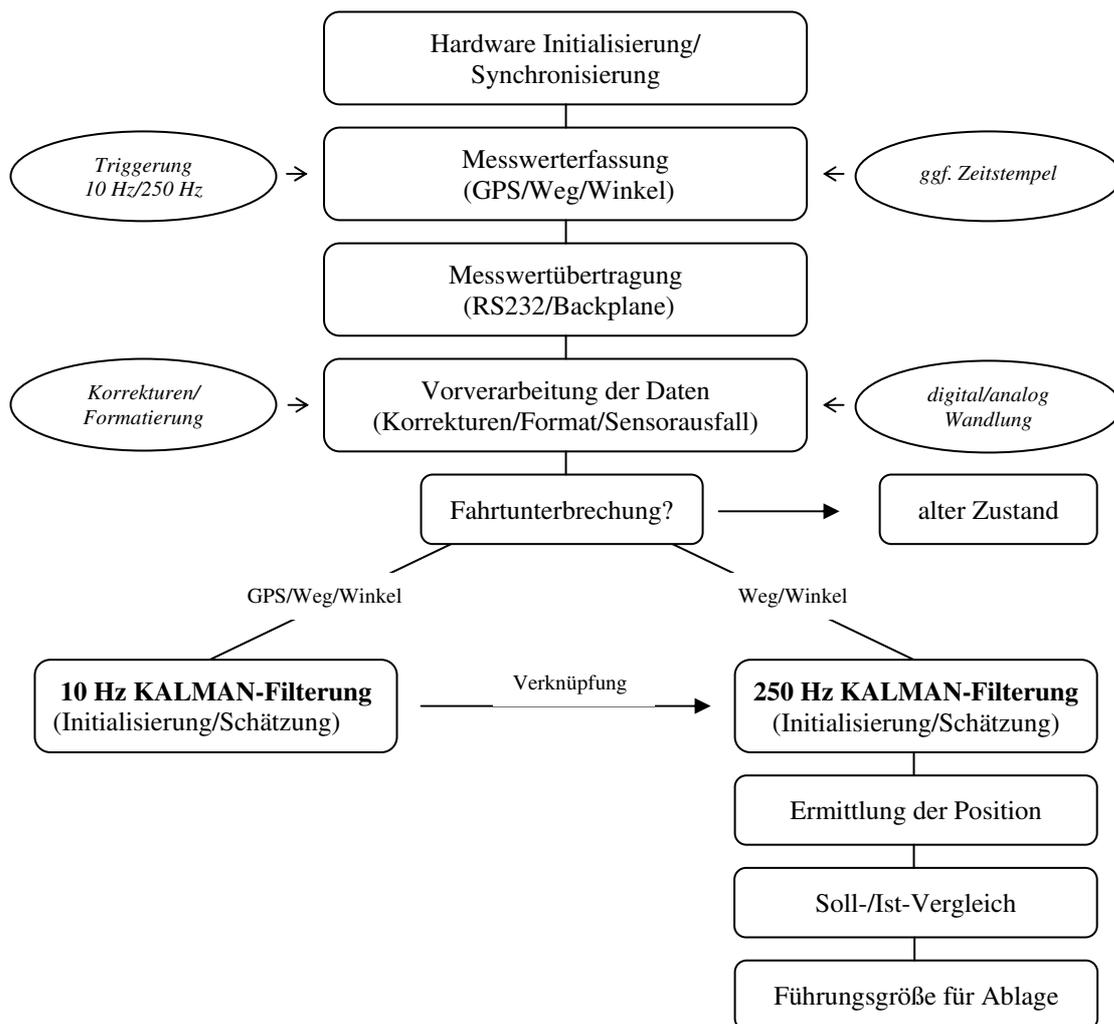


Abb. 4-26: Softwarestruktur zur koordinatengesteuerten Ablage

Die Software übernimmt dabei folgende Aufgaben:

- Initialisierung der Sensoren und der Triggerung bzw. des Zeitbezuges
- Aktivierung der hardwaregetriggerten Messungen
- Erfassung aller benötigten Daten
- Durchführung aller Berechnungen inklusiv der KALMAN-Filterungen
- Erzeugung einer Führungsgröße zur Ablagesteuerung

Während der Initialisierung erfolgen zunächst eine Aktivierung und eine Synchronisation aller Messvorgänge. Das vorhandene PPS-Signal des absoluten Sensors ist der Bezug zur Synchronisation aller Erfassungsvorgänge. Im nächsten Schritt werden die Messwerterfassungskarten eingebunden und die benötigten Schnittstellen bereitgestellt. Anschließend erfolgt ein über den PPS-Puls ausgelöster synchroner Start aller getriggerten Mess- und Messwerterfassungsaufgaben. Falls neue Messdaten vorliegen, werden diese unmittelbar und möglichst verzögerungsfrei in die Berechnungsstrukturen des Gesamtprogramms übertragen. Die Berechnung und Aufarbeitung der Messwerte erfolgt, trotz der Nachteile in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit, auf der zur Verfügung stehenden Windows-basierten Rechneinheit. Neben einer Datenerfassung beinhaltet die Software die zur Glättung der Messdaten erforderliche rekursive KALMAN-Filterung.

Aufgrund der angesprochenen Verzögerungszeiten bei der GPS-Datenerfassung besteht die Gesamtauswertung aus zwei unterschiedlichen KALMAN-Filterungen, welche ineinander greifen. Der Hauptfilter unter Berücksichtigung aller Datenquellen läuft im unmittelbaren Postprocessing nach Erhalt aller Informationen gleichen Zeitstempels mit einer Taktrate von 10 Hz ab. Er liefert „driftfreie“ Daten durch die Einbeziehung der absoluten Positionen des GPS-Empfängers. Aufbauend auf diesen Daten schreibt die zweite Filterung in Echtzeit die Position mit rein relativen Messwerten fort. Die Taktung der zweiten Filterung ist zudem erhöht (250 Hz), um eine bzgl. der Genauigkeitsforderung ausreichendere Erfassung der Fahrzeugtrajektorie zu erreichen. Bei einer Geschwindigkeit von ca. 2 m/s und einer Taktrate von 250 Hz stehen neu geschätzte Zustandsvektordaten im Abstand von 1 mm der zurückgelegten Fahrtstrecke zur Verfügung. Die Verknüpfung der beiden KALMAN-Filterungen mit unterschiedlicher Taktung erfolgt durch die Übergabe der Schätzungsergebnisse einschließlich der Stochastik aus dem 10 Hz Hauptfilter mit dem Zeitstempel der Erfassung an den 250 Hz Zwischenfilter. Somit können Ablagepositionen, welche durch den echtzeitfähigen relativen Zweitfilter extrapolierten werden, „nachgezogen“ werden. Die Drift des Zwischenfilters, in Folge rein relativer Messwerte, wird durch die regelmäßige Hauptfilterung abgefangen.

Die Kombination beider Filterungsergebnisse führt zu einer mit absoluten Koordinaten gestützten Beschreibung der Trajektorie. Sobald das Ergebnis der Hauptfilterung vorliegt, können diese Werte als Grundlage für den zweiten Filter genutzt werden. Dadurch ist eine Stützung der rein relativen Filterung bzgl. der Driftneigung über die Zeit gegeben. Für eine Aussaat im Rechteckverband kann die Bestimmung der Position des Landfahrzeugs auf der zurückgelegten Trajektorie und der benötigte Saatabstand genutzt werden, um eine Führungsgröße, z.B. in Form eines Ablagepulses, zu generieren. Diese Führungsgröße kann anschließend an die Steuerung der Ablagemechanik oder zur Auslösung sonstiger Ereignisse genutzt werden.

Die Umsetzung dieses Softwarekonzeptes erfolgt durch ein Programmpaket der FIRMA NATIONAL INSTRUMENTS (2010). Die graphische Programmierumgebung LabView ist auf die eingesetzte Hardware optimal abgestimmt. Sie bietet die Möglichkeit, Mess-, Steuer- und Regelhardware anzubinden, Daten zu analysieren, gewonnene Ergebnisse gemeinsam zu nutzen sowie verteilte Anwendungen zu realisieren. Auch die mathematischen Berechnungen und Filterungen können unmittelbar in der LabView-Umgebung aufgebaut werden. Dadurch entstehen keine Verzögerungszeiten durch die Anbindung fremder Softwarekomponenten. Eine Überwachung des Prozesses ist unter Windows über den Messrechner möglich, sodass in der Erprobungsphase direkte Manipulationen und deren Auswirkungen sichtbar sind. Auf dieser Basis können die Untersuchungen zur Kalibrierung der Messsensorik und die Verifikation des Filters im Weiteren erfolgen.

5 Empirische Untersuchungen und Verifikation der Filterung

5.1 Sensorkalibrierung

5.1.1 Correvit L-400

Die messtechnische Bestimmung des Weges bzw. der Geschwindigkeit der Maschine spielt eine wichtige Rolle zur Positionsbestimmung bei der Zuckerrübensaat. Insbesondere für die Gleichabständigkeit während der Längsfahrt ist die relative Wegmessung ausschlaggebend. Deshalb ist vor der Umsetzung der koordinatengesteuerten Aussaat in Längsrichtung eine Untersuchung des eingesetzten optischen Sensors bei verschiedenen Oberflächenbedingungen als sinnvoll zu erachten. Insbesondere die Auswirkungen einer für die Aussaat vorbereiteten Feldoberfläche auf die Qualität und Zuverlässigkeit der Messwerte sind für den späteren Einsatzbereich nötig. Die Ergebnisse der Kalibrierung und der anschließenden Genauigkeitsanalyse der Sensoren sind ein wichtiger Aspekt für das Filter-Design eines KALMAN-Filters und fließen direkt in die Stochastik (Messrauschen) der KALMAN-Filterung ein (vgl. Kapitel 4.4.7).

Die Kalibrierung und Genauigkeitsanalyse der Wegmessung wurde zunächst unter Laborbedingungen mit einem Laser-Tracker durchgeführt. Sie dienen einer ersten präzisen Genauigkeitsuntersuchung des Sensors unter optimalen und reproduzierbaren Bedingungen. Die Ergebnisse werden anschließend mit den Werten, welche unter Feldbedingungen mit einer RTK-GPS-Ausrüstung als Vergleichsnorm durchgeführt wurden, abgeglichen.

Kalibrierung mittels Laser-Tracker:

Die Laboruntersuchungen wurden mit Hilfe eines fahrbaren Versuchsträgers, auf welchem der Correvit L-400 adaptiert ist, durchgeführt. Die Befestigung des Sensors erfolgte dabei im Drehpunkt des Versuchsträgers senkrecht zum Untergrund mit einem Arbeitsabstand von 400 mm (vgl. Abb. 5-1). Die digitalen Weginformationen des Correvit L-400 wurden mit einer konstanten Aufzeichnungsrate von 250 Hz durch die in Kapitel 4.2 beschriebene Rechnerplattform erfasst. Die Voreinstellung für die Weginformation lag bei 460 Pulse/m und auf einer verzögerungsfreien bzw. ungefilterten Datenausgabe, was gleichzeitig dem Protokoll der Werkskalibrierungen entspricht. Die Kalibrierfahrten erfolgten über einem



Abb. 5-2: Laser-Tracker SMART 310

strukturierten „Norm“-Messuntergrund in Form einer weißen Raufasertape. Dieser Untergrund wird von der FIRMA CORRSYS-DATRON (2010) für solche Aufgaben empfohlen.



Abb. 5-1: Versuchsträger

Als Vergleichsmesssensor kam der Laser-Tracker SMART 310 der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010) zum Einsatz (vgl. Abb. 5-2). Dieser erfasste die dreidimensionalen Koordinaten eines Spezialreflektors. Der Reflektor wurde ebenfalls über dem Drehpunkt des Versuchsträgers befestigt, um keinen lagemäßigen Versatz zum Correvit zu haben. Mit seiner hohen Positionsgenauigkeit im Submillimeterbereich und der im Versuch eingestellten Aufzeichnungsrate von 500 Hz ermöglicht der Laser-Tracker die Erfassung einer „Sollfahrt“ des Versuchsträgers. Der Laser-Tracker wurde bei den Versuchs-

fahrten in Verlängerung der Versuchstrecke am Ende des Labors aufgebaut, um Fehler aus der Rotation des Lasertrackers zu reduzieren. Die abgefahrte Bahnlänge in Form einer Geraden betrug 10 m bei einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s. Eine Synchronisierung der Sensoren über ein gemeinsames Zeitnormal war aufgrund des Messaufbaus nicht möglich, sodass mit beiden Messsystemen während der Messfahrt Daten bzgl. des geräteinternen Zeitbezugs aufgezeichnet wurden. Als Zeitquelle für die Correvit-Daten diente ein ofenstabilisierter Quarz mit einer Genauigkeit besser als $1\mu\text{s}$ und für den Laser-Tracker der interne Taktgeber.

Die notwendige Synchronisierung der Messwerte aus beiden Systemen erfolgte im Post-Processing durch die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion. Dazu wurden in Form von ruckartigem Bremsen und Beschleunigen zu Beginn und am Ende der Fahrt eindeutig identifizierbare Punkte innerhalb der Messkurve erzeugt.

Kalibrierung mittels RTK-GPS:



Abb. 5-3: Feldversuchsfahrt

Für eine Untersuchung des Correvit L-400 über größere Messdistanzen wurde als Referenzsensor die RTK-GPS-Ausrüstung mit einer lokalen Referenzstation in unmittelbarer Nähe verwendet. Dazu wurde einerseits der gezeigte Versuchsträger für eine gerade Strecke von 100 m über Asphalt genutzt und andererseits die mit dem Multi-Sensor-System ausgestattete Sämaschine (vgl. Abb. 5-3) entlang einer schwach gebogenen Trajektorie von 200 m über einer Ackeroberfläche eingesetzt.

Da die zu erwartende Genauigkeit des Correvit L-400 laut Datenblatt $\pm 0,1\%$ der Wegstrecke beträgt, ist die absolute Genauigkeit des RTK-GPS-Verfahrens von etwa 2 cm (BAUER 2003) nach einer Verbesserung, bspw.

durch ein gleitendes Mittel (vgl. Kapitel 4.4.5), für eine Kalibrierung über eine längere Distanz ausreichend. Die Erfassung der Sensorenmessdaten erfolgte bei diesen Untersuchungen zeitsynchron mittels des vorhandenen *PulsePerSecond*-Signal des GPS-Empfängers durch den Messrechner.

Die Aufzeichnungsrate beider Sensoren lag bei 10 Hz und die Fahrgeschwindigkeit bei ca. 1,4 m/s. Der Correvit L-400 wurde zudem auf die gleichen Voreinstellungen wie bei den Laboruntersuchungen gesetzt. Die Adaptierung der GPS-Antenne erfolgte über dem Correvit-Sensor mit einer Verlängerung, um einen Versatz der Messwerte zu vermeiden und mögliche Systematiken bei der GPS-Messung auszuschließen.

Ergebnisse der verschiedenen Kalibrierfahrten:

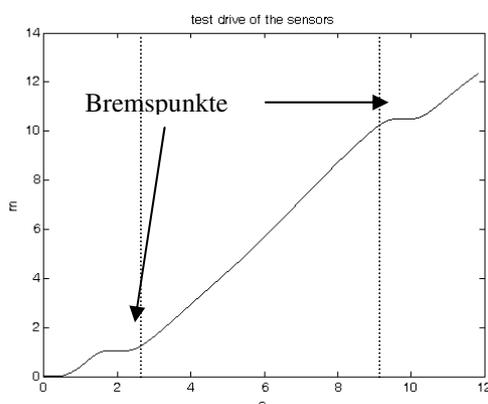


Abb. 5-4: Verlauf der Laborfahrt

Aus den gemessenen Koordinaten des Laser-Trackers im Labor wurden zunächst Weg- bzw. Geschwindigkeitswerte als „Sollinformationen“ berechnet. Diese wurden anschließend über die beiden markanten Punkte (Bremsruck) der Messfahrt mathematisch mit den Daten des Correvit-Sensors synchronisiert, um Aussagen zur Genauigkeit des Sensors zu ermöglichen.

Abbildung 5-4 zeigt den Verlauf der 12 m langen Correvit-Messfahrt bezogen auf die Zeit. Aufgrund der Bremspunkte bei 2 m und 10 m ist für die Kalibrierung jedoch nur eine Fahrtstrecke von ca. 7 m nutzbar.

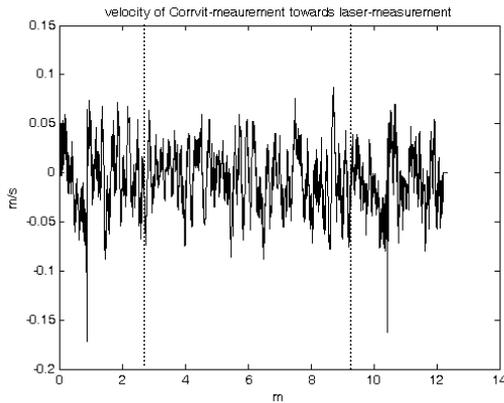


Abb. 5-5: Geschwindigkeitsdifferenzen

Für die Genauigkeitsuntersuchung werden sowohl die Differenzen der Geschwindigkeiten als auch der Strecke, bezogen auf die Laser-Tracker-Werte zu jedem Messzeitpunkt (0,04 s), bezogen auf den absoluten Messweg betrachtet. Wie der Abbildung 5-5 zu entnehmen ist, verläuft der Graph der Geschwindigkeitsdifferenzen im nutzbaren Bereich mit einer Abweichung von ± 5 cm/s um die Nullachse.

Aufgrund der übergeordneten Genauigkeit des Laser-Trackers entsteht das Fehlerband ausschließlich durch die Correvit-Daten und lässt sich durch Glättung der Messwerte (z.B. gleitendes Mittel) reduzieren. Eine Genauigkeitsaussage ist somit anhand der Geschwindigkeitsdifferenzen nicht möglich; eine Drift des Sensors ist nicht erkennbar.

Betrachtet man die Differenzen der Strecken über den Verlauf des Weges, so lässt sich eine Drift von etwa 2 cm über die Messfahrt erkennen (vgl. Abb. 5-6). Bei 7 m nutzbarer Strecke entspricht dies einer Drift von 0,2 – 0,3%, was geringfügig schlechter als die Spezifikationen des Sensors von etwa $\pm 0,1\%$ ist. In Abbildung 5-7 sind die Streckendifferenzen nach Abspaltung einer Drift von 0,25% dargestellt. Die restlichen Fehleranteile lassen sich nicht geeignet modellieren, so dass der untersuchte Correvit-Sensor im Wegsignal kein weißes Rauschen aufweist.

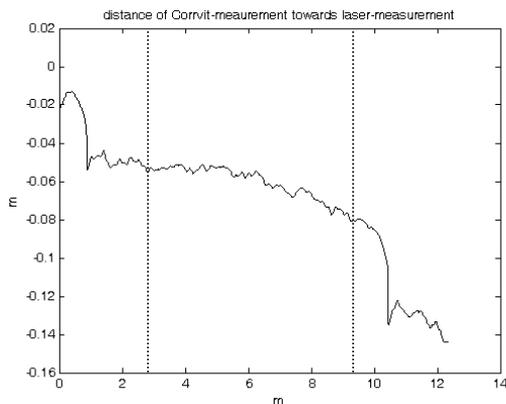


Abb. 5-6: Wegdifferenzen

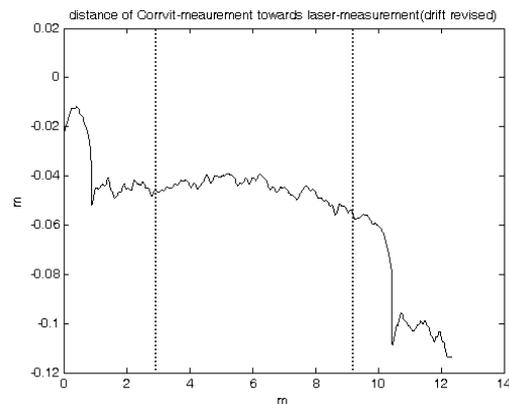


Abb. 5-7: Wegdifferenzen ohne Drift

Die weiteren Kalibrierfahrten basieren auf „Sollinformationen“ aus RTK-GPS in Form von 3D-Koordinaten im geozentrischen System, welche noch durch Restsystematiken und zufällige Fehleranteile verfälscht sind. Diese Koordinaten müssen für eine Kalibrierung vorab verbessert werden. Aus diesem Grund erfolgte zuerst eine einfache Umformung der geozentrischen 3D-Koordinaten in die Ebene durch eine Drehung um zwei Achsen. Die zweidimensionale Trajektorie wurde anschließend durch eine ausgleichende Funktion (Polynomansatz) geglättet. Dieser Ansatz ist aufgrund der Trägheit der Fahrzeuge plausibel (vgl. Kapitel 4.4.5). Die Lotfußpunkte auf die ausgleichende Funktion ergeben die verbesserten Geschwindigkeits- und Streckendifferenzen, welche mit den Werten des Correvit-Sensors verglichen werden können. Aufgrund der hardwaremäßigen Synchronisation konnte bei der Kalibrierung mittels RTK-GPS auf eine mathematische Synchronisation verzichtet werden.

Betrachtet man zunächst die Versuchsträger-Kalibrierfahrt über Asphalt entlang einer Geraden von ca. 100 m, so lassen die Geschwindigkeitsdifferenzen wiederum keinen signifikanten Höhenversatz oder eine Steigung des Graphen als Drift in der Geschwindigkeit erkennen (vgl. Abb. 5-8). Die Werte bewegen sich mit einer Bandbreite von bis zu $\pm 0,2$ m/s um die Nullachse, wobei der etwas höhere Wert vermutlich auf den Restglättungsfehler der GPS-Messungen zurückzuführen ist. Die Streckendifferenzen entlang des Weges über Asphalt zeigen im Gegensatz zur Laser-Tracker Kalibrierung über einer Raufasertapete eine geringfügig schwächere Drift von ca. 20 cm über eine Fahrtstrecke von 100 m (0,2%). Der allgemeine Verlauf der Kurven ist jedoch wesentlich unruhiger unter Laborbedingungen (vgl. Abb. 5-9).

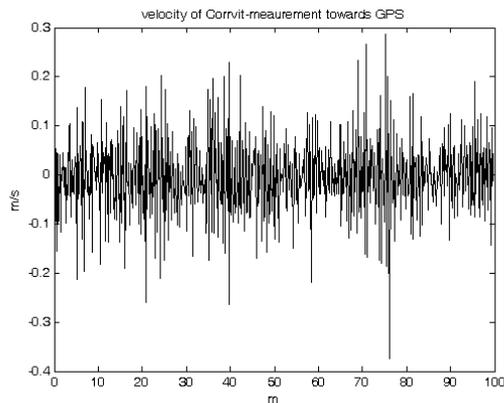


Abb. 5-8: Geschwindigkeitsdifferenzen über Asphalt

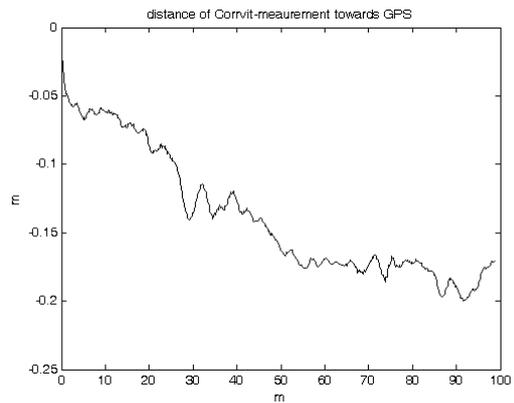


Abb. 5-9: Wegdifferenzen über Asphalt

Werden alle Correvit-Daten um eine Drift von 0,15% korrigiert, so zeigt sich der in Abbildung 5-10 dargestellte Verlauf der Streckendifferenzen mit einem Rauschband von ± 4 cm. Eine weitere Abspaltung einer Systematik durch einen funktionalen Ansatz ist aufgrund des Kurvenverlaufs nicht möglich. Somit zeigt auch diese Kalibrierfahrt ein farbiges Rauschen des Correvit-Sensors über die Gesamtzeit, welches ggf. bei der Filterung berücksichtigt werden muss.

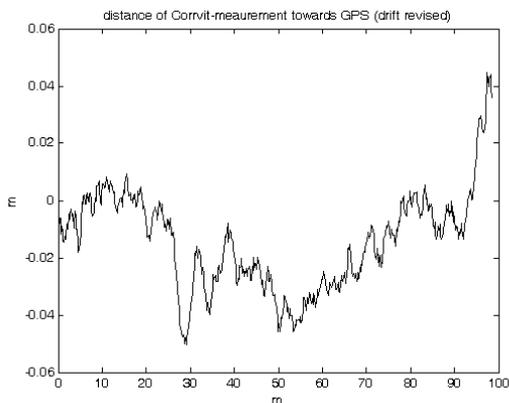


Abb. 5-10: Wegdifferenzen über Asphalt nach Driftabspaltung

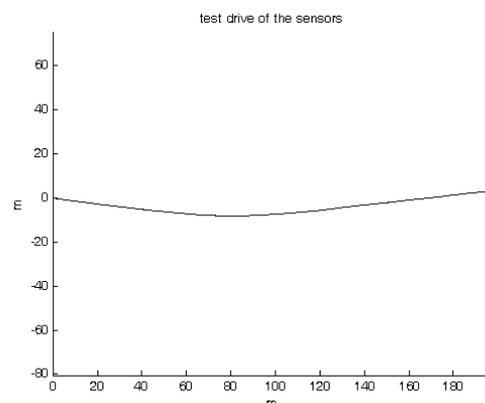


Abb. 5-11: Kalibrierfahrt über Ackerboden

Eine weitere Kalibrierung des Sensors mittels RTK-GPS erfolgte mit einer Länge von ca. 200 m entlang einer schwach gekrümmten Trajektorie über Feldboden (vgl. Abb. 5-11). Die Oberfläche bestand aus einem lehmigen Boden, welcher für eine Aussaat vorbereitet worden war. Die restlichen Rahmenbedingungen und die Verbesserungen der GPS-Messwerte entsprachen dabei den Messungen über Asphalt.

Die Geschwindigkeitsdifferenzen über dem Feldboden ergeben zunächst einen leicht rauerer Verlauf als über Asphalt (vgl. Abbildung 5-12). Weitere signifikante Aussagen bzgl. der Geschwindigkeit können auch hier nicht getroffen werden. Die Drift in der Streckenmessung des Correvit-Sensors über Ackerboden liegt, wie aus Abbildung 5-13 zu erkennen ist, bei 0,5 m auf 200 m Gesamtstrecke. Dies entspricht einem Wert von 0,25% und fällt somit etwas schlechter als bei der Kalibrierfahrt über Asphalt aus, entspricht aber den Ergebnissen der Kalibrierung im Labor.

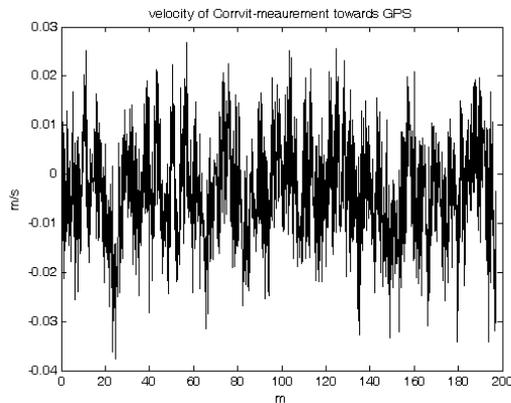


Abb. 5-12: Geschwindigkeitsdifferenzen (Ackerboden)

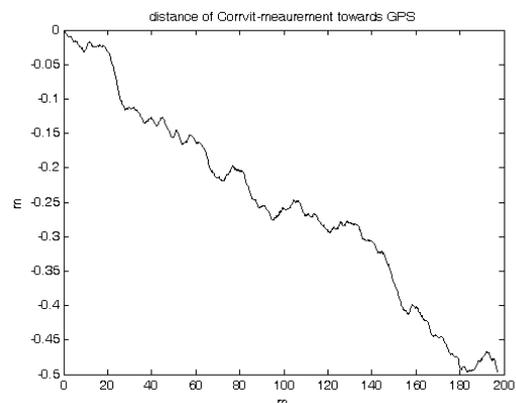


Abb. 5-13: Wegdifferenzen (Ackerboden)

Eine Korrektur der Correvit-Daten um einen Faktor von 1,0025 zeigt über die Gesamtstreckzeit weiterhin ein farbiges Rauschen in den resultierenden Streckendifferenzen mit einer Bandbreite von ± 4 cm (vgl. Abb. 5-14). Eine weitere Modellierung von systematischen Anteilen durch einen funktionalen Ansatz ist aufgrund des Kurvenverlaufs auch hier nicht sinnvoll, sodass das restliche farbiges Rauschen ggf. beim Filterdesign berücksichtigt werden sollte.

Der Einsatz des Correvit L-400 bei der Positionsbestimmung zur koordinatengesteuerten Rübensaart erfolgt in Kombination mit einer KALMAN-Filterung in rekursiver Form. Bei einer Sägeschwindigkeit von etwa 2 m/s und Genauigkeitsvorgaben von 1 cm für die Positionsbestimmung sind Messtaktraten von < 1 Sekunde notwendig. Betrachtet man nun die Wegdifferenzen ohne Drift nicht über die Gesamtzeit (Abb. 5-14), sondern pro Sekunde – also im Nahbereich –, so erhält man näherungsweise weißes Rauschen (vgl. Abb. 5-15).

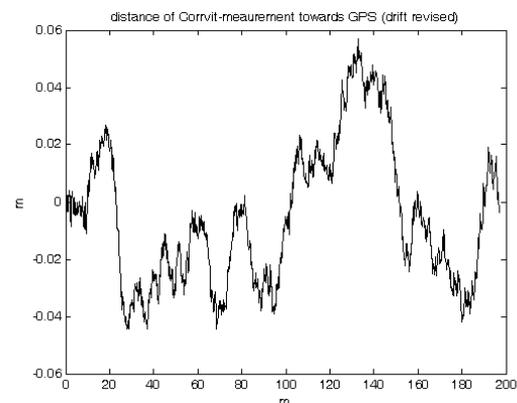


Abb. 5-14: Wegdifferenzen nach Driftabspaltung über die Gesamtstreckzeit (Ackerboden)

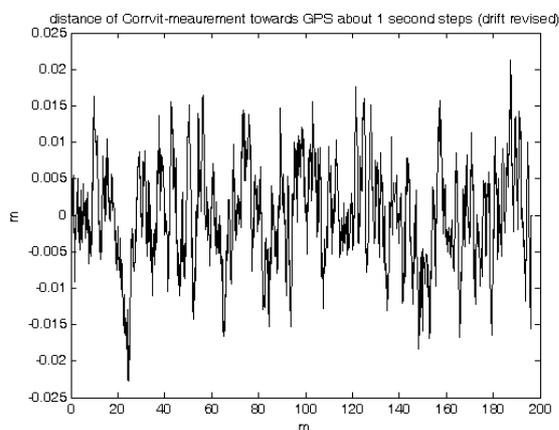


Abb. 5-15: Wegdifferenzen nach Driftabspaltung über 1 Sekunde (Ackerboden)

Aufgrund des quasi weißen Rauschens ist die Berechnung einer Standardabweichung, gültig für Messintervalle, kleiner/gleich 1 Sekunde möglich. Aus den Wegdifferenzen über eine Messzeit von jeweils 1 Sekunde ergibt sich für den Correvit L-400 unter Feldbedingungen eine Standardabweichung von $\sigma = 7$ mm. Das Ergebnis kann für die Modellierung des stochastischen Modells der KALMAN-Filterung in Form der Kovarianzmatrix genutzt werden. Eine weitere Kalibrierfahrt auf Feldboden mit leicht geänderten Rahmenbedingungen ergab ein ähnliches Ergebnis. Bei dieser Fahrt wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s über größeren Feldboden gefahren.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen zum Correvit L-400 kann abschließend festgestellt werden, dass eine Drift in der Streckenmessung zu erkennen ist. Bei relativen Messsensoren ohne eine absolute Stützung ist dies nicht unbekannt, da geringe Fehler integrativ anwachsen. Eine Korrektur dieser Systematik über die Zeit, bzw. den Weg, ist nötig. Sinnvoll scheint eine Korrektur durch einen prozentualen Faktor, welcher für die verschiedenen Untergründe zwischen 0,15% und 0,25% variiert und etwas höher als die Herstellerangabe von 0,1% ausfällt. Verwunderlich ist außerdem die Tatsache, dass trotz Verbesserungen an den GPS-Werten die verbleibende Rauschbandbreite im Bereich von ± 4 cm über die Gesamtmesszeit erhalten bleibt. Neben einer Korrektur der Drift ist jedoch keine weitere Abspaltung einer Systematik durch eine Modellierung sinnvoll. Für kurzzeitige relative Distanzmessungen und Geschwindigkeiten von etwa 1,5 m/s kann jedoch von quasi weißem Rauschen bei der Wegmessung ausgegangen werden. Eine Nutzung des Sensors im Multi-Sensor-System mit Messtaktraten mit Δt von weniger als 1 Sekunde erfordert somit im Filterdesign keine Berücksichtigung in Form eines Formfilteransatzes. Diese ermittelte Standardabweichung für kurze Messepochen von $\sigma = 7$ mm kann unmittelbar in die Kovarianzmatrix integriert werden.

Neben der Genauigkeit der relativen Wegmessung bzw. Geschwindigkeitsmessung sind außerdem die Fehlereinflüsse der absoluten Positionsbestimmung für die Filterung der Längsfahrt von Bedeutung. Untersuchungen zu den kinematischen Genauigkeiten im landwirtschaftlichen Einsatz können Aufschluss über das Genauigkeitspotential der RTK-GPS-Messung in Bewegung mit hohen Taktraten geben.

5.1.2 RTK-GPS-System

Die Bestimmung der absoluten Positionen entlang einer Trajektorie ist bei der koordinatengesteuerten Einzelkornaussaat in Längsrichtung sowohl für eine gleichabständige Ablage über größere Strecken als auch für einen absoluten Koordinatenbezug wichtig. Eine Drift in der genauen relativen Ablagepositionsbestimmung kann durch eine präzise absolute Messung kompensiert werden, sodass eine hohe Genauigkeit über längere Strecken erreicht wird. Insbesondere Anschlussfahrten nach einer Wende benötigen - für die erneute Längsfahrt - präzise Startkoordinaten mit Bezug zu den vorherigen Spuren. Außerdem dient der absolute Koordinatenbezug sowohl dem Einsatz von koordinatengebundenen Anschlussmaßnahmen als auch der Planung und Ausführung von Folgemaßnahmen, ggf. mit Grenzbezug. Die geforderte Genauigkeit der Pflanzenpositionen von 2 cm sowie die hohe Anforderung an die Ablageposition von $\sigma < 2$ cm (vgl. Kapitel 3.2) kann nur in Kombination mit weiteren Messwerten und zusätzlichen Bewegungsinformationen in einer gemeinsamen Filterung erreicht werden. Zur Vermeidung einer Überschreitung der geforderten Genauigkeiten durch eine Drift in der Saatkornablage sollte die Lagegenauigkeit der absoluten Messung ebenfalls im Bereich bis 2 cm liegen. Das Multi-Sensor-System (vgl. Kapitel 4.2.1) ist dazu mit einer geodätischen RTK-GPS-Ausrüstung ausgestattet worden, welches systembedingt im präzisen RTK-Modus diese absolute Genauigkeit für die Lage erwarten lässt (BAUER 2003). Die veröffentlichten Genauigkeitsangaben für präzise RTK-GPS-Systeme schließen jedoch nicht explizit kinematische Messungen mit Taktraten von 10 Hz ein, sondern beziehen sich vorrangig auf statische RTK-GPS-Messungen. Für die koordinatengesteuerte Aussaat von Zuckerrüben sind aber Genauigkeitsinformationen der Messsensoren im Geschwindigkeitsbereich von ca. 2 m/s notwendig. Weitere Untersuchungen sind somit erforderlich.

Ein grundlegendes Problem bei kinematischen Genauigkeitsuntersuchung liegt in der präzisen Bestimmung der Sollpositionen durch ein geeignetes mehrdimensionales Referenzsystem. Die Schwierigkeit bei einer kinematischen Problemstellung besteht in der Bildung einer genauen Sollposition zu jeder Messepoche i . Die unabhängigen Sollpositionen müssen zeitsynchron zum Istwert erzeugt werden, um nachhaltige Genauigkeitsaussagen zu den RTK-GPS-Messungen zu erhalten. Eine Möglichkeit der Bestimmung von Sollpositionen besteht z.B. in der Nutzung einer geometrisch bekannten Referenzbahn (z.B. schienengebundene Systeme), sodass die Form der Trajektorie vorgegeben ist. Zusätzlich muss eine synchronisierte Streckenmessung entlang der Referenzbahn vorhanden sein, um die Abweichungen in Fahrtrichtung ermitteln zu können. Auch die Erzeugung von Referenzwerten über eine bekannte Basis und zwei Roverantennen auf einem bewegten Fahrzeug ist denkbar. Erste veröffentlichte Untersuchungen zur Genauigkeit von landwirtschaftlichen, kinematischen RTK-GPS-Messungen bestätigen, dass mit Genauigkeiten von wenigen Zentimetern bis, im ungünstigsten Fall,

einen Dezimeter zu rechnen ist (STEMPFHUBER 2004). Diese Erkenntnisse stützen die Vermutung der Übertragbarkeit der statischen RTK-GPS-Genauigkeit unter optimalen landwirtschaftlichen Bedingungen von etwa 2 cm für den kinematischen Bereich.

Aufgrund der geringen Anzahl von Informationen zur Genauigkeit kinematischer RTK-GPS-Messungen in der Präzisionslandwirtschaft und zur Langzeitstabilität bzw. -qualität von Korrekturdatendiensten sind im Rahmen dieser Arbeit ergänzende Untersuchungen durchgeführt worden. Im Vordergrund stand der spätere Einsatz des Gesamtsystems in der Präzisionslandwirtschaft. Die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen können in Form von Varianzen direkt in das stochastische Modell der KALMAN-Filterung einfließen. Gestützt wurden diese Genauigkeitsuntersuchungen durch die Vergabe einer entsprechenden Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn (FÖRSTER 2009).

Untersuchungen von kinematischen GPS-Messungen mit einer Taktrate von 10 Hz:

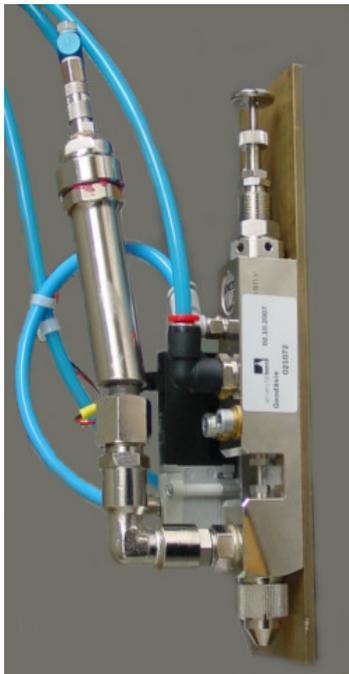


Abb. 5-16: Das Signiersystem

Die Genauigkeitsanalyse kinematischer RTK-GPS-Messungen wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 m/s durchgeführt, was dem Einsatzbereich einer typischen Einzelkornsämaschine entspricht. Die Messtakrate der späteren Nutzung im Multi-Sensor-System beträgt 10 Hz, was eine zurückgelegte Entfernung von ca. 0,20 m pro Messepoche ergibt. Als 2D-Referenzmesssystem wurde bei diesen Untersuchungen ein neuartiger Ansatz verfolgt. Dieser besteht aus einem kinematischen und einem statischen Systemteil. Die kinematische Komponente umfasst ein transportables, gesteuertes Farbspritzpistollensystem PILOT Signier 20360 (FIRMA WAHLTER SPRITZ- UND LACKIER-SYSTEME GMBH 2010). Dieses Signierpistollensystem (vgl. Abb. 5-16) wird vorrangig in der Fertigungsindustrie zur Kennzeichnung von bewegten Objekten bzw. Materialien genutzt. Der Vorteil liegt in der berührungslosen punktgenauen Markierung im laufenden Bewegungsprozess. Die Intensität der Markierung, die Art des Signiermaterials und die Größe der Markierung können dabei durch den Nutzer variiert werden. Die gesamte Signieranlage wird mit Druckluft betrieben, welche mittels eines mobilen Druckbehälters zur Verfügung steht. Die Markierung erfolgt mittels eines elektrisch ansteuerbaren Druckluftventils, welches die Markierung durch einen elektrischen Rechteckimpuls auslöst. Die Auslöse- bzw. Totzeiten des Druckluftventils liegen nach Herstellerangaben im Bereich von 25 bis 30 Millisekunden.

Die notwendige Synchronisation des Referenzsystems mit dem Messzeitpunkt des GPS-Systems ergibt sich durch eine direkte Koppelung der Signiereinheit mit dem PPS-Signal. Das Zentrum der Markierung stellt den Bezugspunkt dar, wobei durch die geringen Geschwindigkeiten und kurzen Auslösezeiten punktförmige Markierungen auf der Trajektorie entstehen. Das Ziel ist eine optische Lage-Visualisierung der aktuell gemessenen RTK-GPS-Positionen.

Der Hauptnachteil des kinematischen Referenzsystems liegt jedoch in den Totzeitdifferenzen von bis zu 5 ms bei Geschwindigkeiten von 2 m/s. Hierdurch können sich Markierfehler bis ca. 1 cm ergeben, sodass mit diesem Referenzsystem GPS-Lagegenauigkeiten nur ab etwa 4 - 5 cm signifikant nachweisbar sind. Ein Referenzsystem sollte eine um den Faktor 5 – 10 höhere Genauigkeit besitzen (WITTE/SCHMIDT 2006). Geringere Abweichungen können dann nur einen Hinweis auf die vermutete Genauigkeit im Bereich von 2 cm geben. Zu beachten ist ferner der konstante Versatz der Markierung in Fahrtrichtung als Folge der Auslöseverzögerungszeit des Signiersystems.

Die statische Komponente des Referenzsystems besteht aus dem Tachymetersystem TCRP 1201 der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010) mit einem zugehörigen, kalibrierten Reflektorlotstab. Dieses Gerät ermöglicht die Aufmessung der einzelnen Farbmarkierungen des Signiersystems im Postprocessing

mit einer Genauigkeit im Subzentimeterbereich. Somit ist die Genauigkeit der Tachymetermessung bezogen auf die erwartete RTK-GPS-Genauigkeit um den Faktor 5 bis 10 genauer und somit vernachlässigbar.

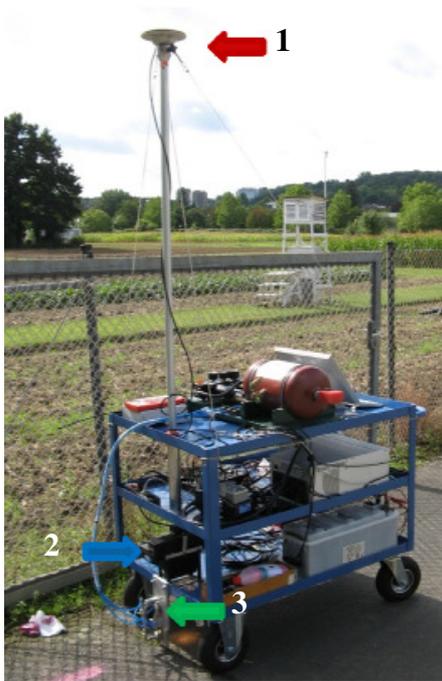


Abb. 5-17: Versuchsträger mit GPS-System (1), Correvit (2) und Signiergerät (3)

Das lokale Koordinatensystem der Tachymeteraufnahme wird in die Längsachse der Kalibrierfahrt gelegt, sodass eine anschließende Überführung der GPS- und Tachymeterkoordinaten in ein gemeinsames Koordinatensystem ermöglicht wird. Der anschließende „Soll-Ist-Vergleich“ führt zu den gesuchten Genauigkeitsinformationen bewegter RTK-GPS-Messungen mit hohen Taktraten.

Das Signiersystem und die RTK-GPS-Komponenten wurden für die Versuchsfahrten auf dem bereits beschriebenen mobilen Versuchsträger montiert (vgl. Abb. 5-17). Zusätzlich wurde der vorhandene Weg- bzw. Geschwindigkeitssensor Correvit L-400 mit einer relativen 1D-Genauigkeit im Subzentimeterbereich eingebunden (vgl. Kapitel 5.1.1). Dieser Sensor ermöglicht eine zusätzliche Visualisierung und Überprüfung der Herstellerangaben zu den Totzeiten des Signiersystems. Damit keine zusätzlichen Korrekturen durch die Montage der Instrumente entstehen können, wie z.B. Schleppkurvenfehler, wurden alle Komponenten der Genauigkeitsuntersuchungen möglichst im Drehpunkt des Versuchsträgers montiert.

Die beabsichtigten Mess- und Signiertaktraten von 10 Hz ergeben bei einer Geschwindigkeit von ca. 2 m/s Abstände auf der Trajektorie von ca. 0,2 m, was bei einer Kalibrierstreckenlänge von 160 m zu ca. 800 Markierungen führt.

Die Aufmessung dieser großen Anzahl von Punkten musste

im Rahmen der Diplomarbeit reduziert werden, so dass zu Beginn und am Ende der Kalibrierfahrt jeder Messpunkt und im mittleren Trajektorienbereich nur jeder 2. bis 3. Punkt aufgenommen worden ist.

Die Darstellung der Trajektorienstücke zwischen den einzelnen Messpunkten bzw. Streckenstücke pro Zeiteinheit (0,1 s) lassen zunächst keine signifikanten Systematiken in der Bewegung des Versuchsträgers erkennen (vgl. Abb. 5-18). Es zeigt sich ein Rauschband um den mittleren Geschwindigkeitsverlauf. Auffällig ist jedoch der wesentlich glattere Verlauf der Correvitmesswerte im Gegensatz zu den Referenzmesswerten der Tachymeteraufnahme. Aufgrund der vorhandenen Trägheit des Versuchsträgers pro Epoche ist dies nicht aus der Messfahrt zu begründen, sondern vielmehr aus Fehlerinflüssen bei der Markierung durch das Signiersystem, kombiniert mit Messungenauigkeiten der Tachymeteraufnahme. Die Güte des eingesetzten Tachymetersystems lässt somit die Schlussfolgerung der Präsenz eines signifikanten Signierfehlers mit einem Betrag von ca. 1 cm zu.

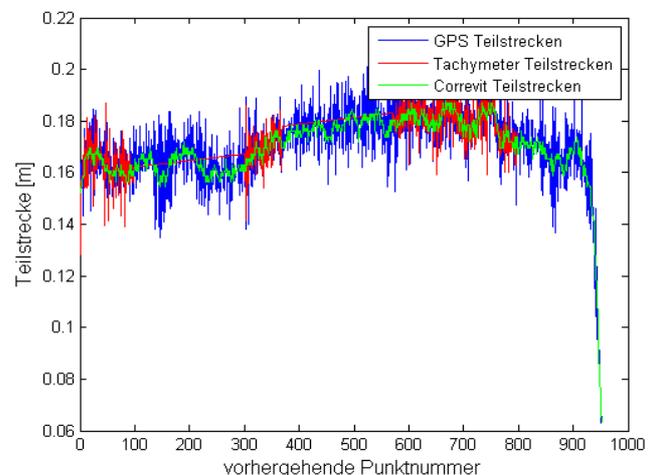


Abb. 5-18: Verlauf der verschiedenen Trajektorienstücke zwischen den einzelnen Messpunkten

Die Vermutungen über die Größenordnung der Totzeiten des Signiersystems können durch eine Betrachtung der Differenzbildungen zu den Daten des Correvitsensors in den Abbildungen (5-19) noch einmal gestärkt werden. Die Kurzzeitgenauigkeit des Correvitsensors ist bei den geringen Streckenlängen im Subzentimeterbereich anzunehmen (vgl. Kapitel 5.1.1), sodass eine Nutzung der Messwerte als zusätzliches 1D-Referenzsystem möglich ist.

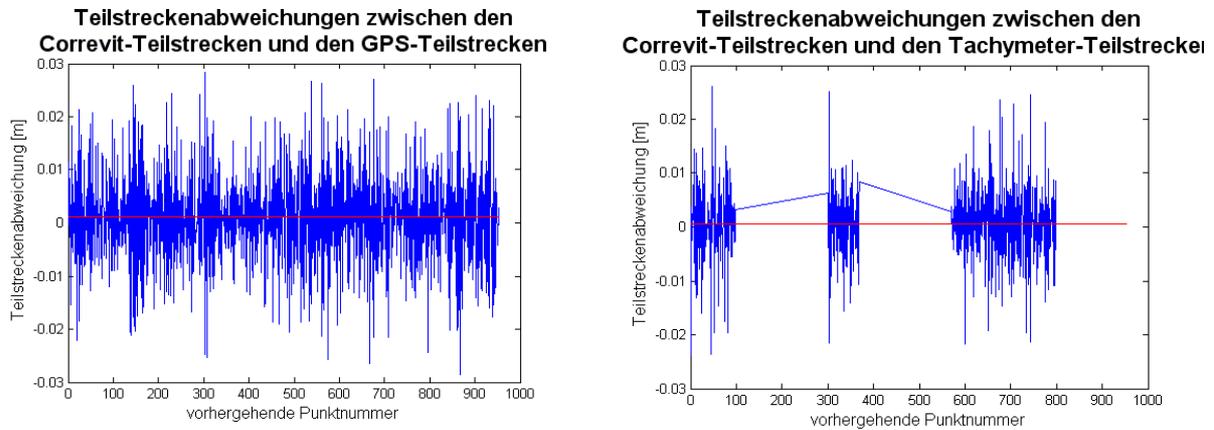


Abb. 5-19: Abweichungen der GPS-Strecken/Tachymeter-Strecken zu den Correvit-Messungen

Es zeigt sich außerdem, dass die Abweichungen zu den Tachymetermessungen und den RTK-GPS-Messungen einen näherungsweise gleich hohen Betrag von 1 - 2 cm aufweisen. Somit wird sowohl die Signierqualität von etwa 1 cm bestätigt als auch die Genauigkeit für kinematische GPS-Messungen in der Landwirtschaft im Subdezimeterbereich gestützt. Abweichungen von 1 - 2 cm lassen sogar die Vermutung einer Übertragbarkeit der statischen Genauigkeit auf den kinematischen Bereich für geringe Geschwindigkeiten zu. Die Ergebnisse der Auswertungen zur 2D-Genauigkeit von kinematischen RTK-GPS-Messungen werden in Abbildung 5-20 dargestellt.

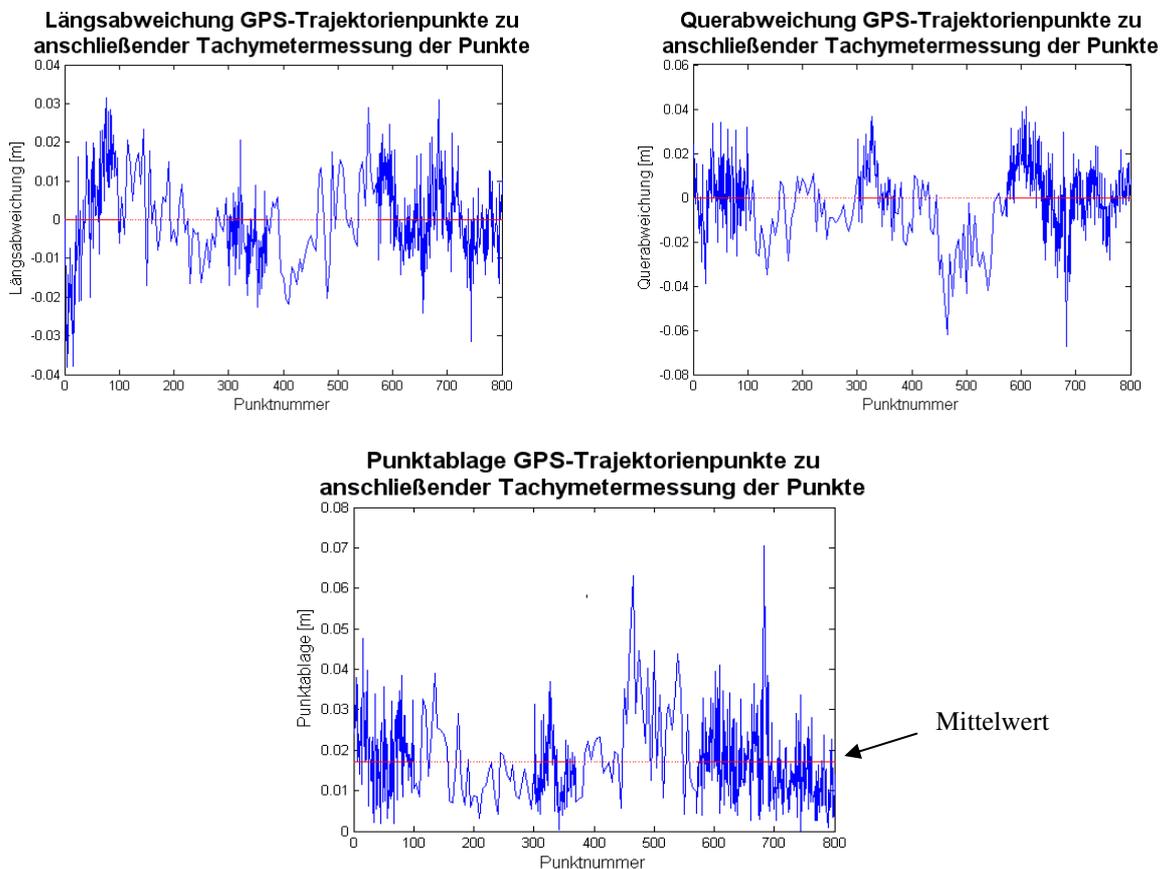


Abb. 5-20: Längsabweichung, Querabweichung und Punktablage der RTK-GPS-Punkte zum Referenzsystem

Der „Soll-Ist-Vergleich“ des 2D-Referenzsystems zeigt sowohl in der Längs- als auch in der Querkomponente Abweichungen von maximal 3 – 4 cm. Der Betrag der maximalen Abweichungen ist somit bis um den Faktor 4 größer als die Genauigkeit des Referenzsystems, was eine Genauigkeitsaussage zulässt. Die Punktdifferenzen der Referenzpunkte zu den kinematischen RTK-GPS-Punkten zeigen mittlere Abweichungen im Bereich von 2 cm.

Grundsätzlich lassen diese Untersuchungen die Schlussfolgerung zu, dass bei optimalen Messbedingungen und geringen Geschwindigkeiten mit einer Lagegenauigkeit besser als 4 cm bei kinematischen RTK-GPS-Messungen gerechnet werden kann. Ferner kann die mittlere Punktgenauigkeit von 2 cm aufgrund der beschränkten Genauigkeit des 2D-Referenzmesssystems (ca. 1 cm) nur als Hinweis auf eine höhere Genauigkeit kinematischer RTK-GPS-Messungen betrachtet werden. Kombiniert mit den Erkenntnissen des 1D-Referenzvergleichs lässt sich eine Genauigkeit in derselben Größenordnung wie beim statischen Einsatz vermuten. Vereinzelt Punktabweichungen mit einer Größenordnung von 6 - 7 cm sind jedoch nicht auszuschließen (Abbildung 5-20) und bei der Realisierung des Gesamtprojektes zu beachten. Diese vereinzelt Abweichungen bis in den Dezimeterbereich bestätigen die Untersuchungen von STEMPFHUBER (2004) zur Genauigkeit von bewegtem RTK-GPS-Messungen.

Langzeitstabilität von verschiedenen Korrekturdaten:

Kinematische RTK-GPS-Messungen benötigen neben der Roversystemeinheit auf dem bewegten Objekt eine lokale oder stationäre Referenzstation. Die Referenzstation ermittelt die benötigten Korrekturdaten und überträgt sie an die Rovereinheit im Felde. Die Korrekturdaten können vom Nutzer sowohl durch eigene Geräte oder kommerzielle Anbieter bezogen werden, was aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Software, Vernetzung, etc.) einen Einfluss auf das Messergebnis haben kann (BAUER 2003). Somit ist neben der Genauigkeit von kinematischen RTK-Messungen auch die Qualität bzw. Langzeitstabilität von Korrekturdaten während der Aussaat von Interesse. Die Dauer der Korrekturdatennutzung hängt dabei von der Größe der Fläche und der Sägeschwindigkeit ab. Während dieser Zeit ist die konstante Qualität der Ablagepositionen von großer Wichtigkeit, um die Gleichmäßigkeit des Saatmusters nicht zu beeinflussen. Die Qualität der RTK-GPS-Messungen steht durch Messgleichungen der KALMAN-Filterung in direkter Verbindung mit der Qualität der Ablagepositionen, sodass eine Untersuchung sinnvoll erscheint. Das Ziel liegt in der Gewinnung von Informationen zur Langzeitstabilität und Qualität verschiedener Korrekturdatenquellen bei identischen Roverdaten. Eine statische Untersuchung dieser Aspekte ist aufgrund einer besseren Isolierung der Einflüsse vorteilhaft.



Abb. 5-21: 4-fach Antennensplitter der FIRMA GPS NETWORKING INCORPORATED (2010)

Für Testmessungen standen neben den Echtzeitwerten einer lokalen Referenzstation per Funkmodem die Korrekturdaten der SAPOS-Vernetzung und des ASCOS-System per GSM in Echtzeit zur Verfügung. Eine Nutzung von identischen GPS-Daten mit verschiedenen Korrekturdaten erfordert eine Verknüpfung von mehreren baugleichen Empfängern mittels eines geeigneten Antennensplitters (vgl. Abb. 5-21). Der Vorteil eines solchen Splitters liegt in der störungsfreien Verteilung des Eingangssignals mit identischer Signalstärke auf mehrere parallel nutzbare Ausgänge.

Der Aufbau der Roverantenne fand auf einer freien Feldfläche langzeitstabil und unter Vermeidung von weiteren äußeren Fehlereinflüssen statt. Alle Daten wurden permanent 2-mal über mehrere Stunden mit einer Taktrate von 30 s mit drei baugleichen Empfängern der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010) aufgezeichnet. Um neben der relativen Langzeitstabilität und Qualität der einzelnen Korrekturdatenquellen auch eine Information zur absoluten Qualität der drei Verfahren zu erlangen, wurden alle Messungen auf das ETRS 89 Koordinatensystem bezogen.

Die Messungen unter Nutzung der lokalen Referenzstation wurden durch den Aufbau der Antenne auf einem eingemessenen Beobachtungspfeiler des Institutes für Geodäsie und Geoinformation der Uni-

versität Bonn an das ETRS 89 Bezugssystem angeschlossen. Dieser Pfeiler besitzt fundierte Koordinaten im ETRS 89, welche auf mehrfachen statischen Messungen in der SAPOS-Vernetzung basieren. Parallel zu den RTK-GPS-Messungen wurden an der Roverstation Rohdaten aufgezeichnet, um eine Überprüfung der Pfeiler-Koordinaten im Postprocessing zu ermöglichen.

Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität der RTK-Messungen unter Nutzung verschiedener Korrekturdaten eröffnen gleichzeitig die Möglichkeit, die Qualität der unterschiedlichen Korrekturdaten in Bezug auf die Streuung und die Mittelwerte zueinander zu ermitteln. Voraussetzung dazu ist die Nutzung identischer Messwerte und Gerätekomponenten.

In Abbildung 5-22 sind die zeitgleichen Ergebnisse mit verschiedenen Korrekturdatendiensten dargestellt. Aufgrund der Referenzkoordinaten aus statischen Messungen in der SAPOS-Vernetzung können jedoch nur Aussagen in Bezug auf die SAPOS-Realisierung getroffen werden.

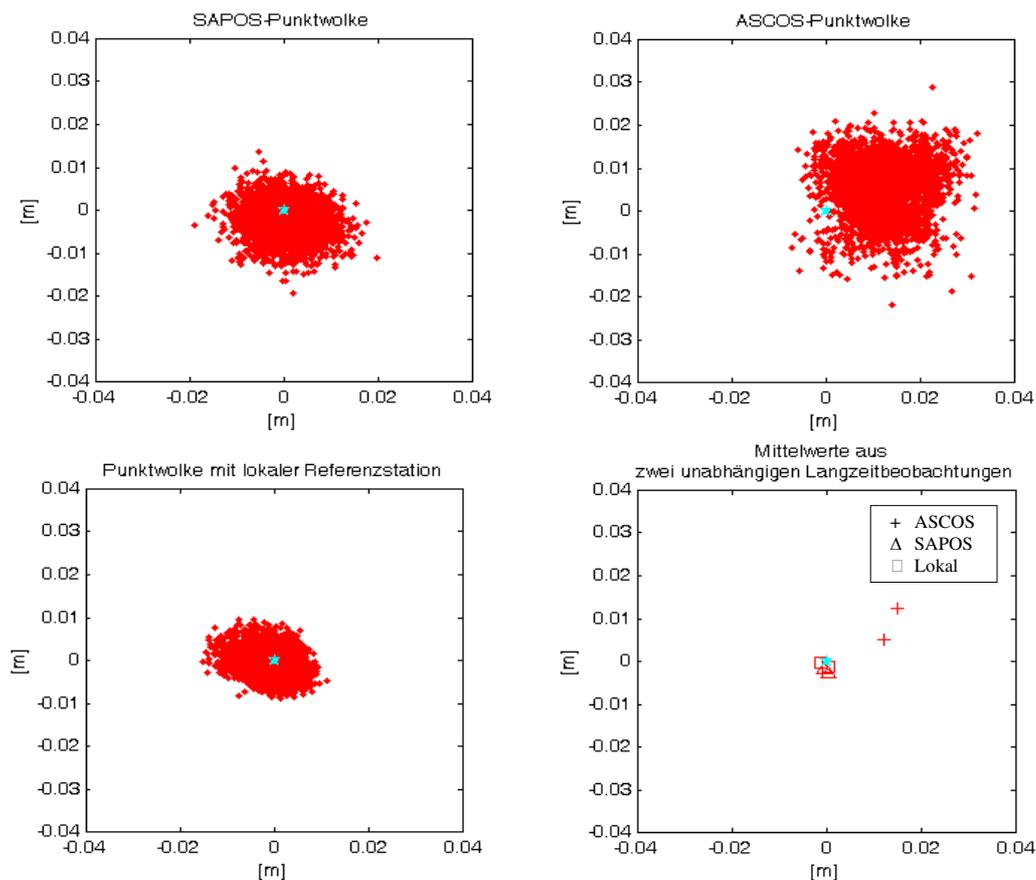


Abb. 5-22: Streuung der RTK-GPS-Messungen mit verschiedenen Korrekturdaten zur Referenzkoordinate und Darstellung der Mittelwerte von zwei Langzeitmessungen

Es zeigt sich, dass selbst über mehrere Stunden keine signifikanten Drifte oder Sprünge in den unterschiedlichen Korrekturdatenquellen bzw. in den daraus abgeleiteten Koordinaten vorhanden sind. Der überwiegende Anteil der Werte liegt dabei im Genauigkeitsrahmen von 2 cm.

Die ASCOS-Messungen weisen im Verhältnis zu den SAPOS-Messwerten und den Werten mit lokaler Referenzstation trotz gleicher Geräteeinstellungen eine geringfügig größere Streuung auf, welche aber noch im Rahmen der Genauigkeitsangaben des Anbieters für hochpräzise RTK-GPS-Messungen liegt. Der SAPOS- und auch der ASCOS-Dienst greifen durch Nutzungsverträge auf die gleichen Referenzstationen zurück, sodass diese Unterschiede in der Genauigkeit nur auf unterschiedliche Software- bzw. Vernetzungslösungen oder geringere Aktualisierungsraten zurückzuführen sind. Signifikant ist zudem ein Versatz der Mittelwerte der ASCOS-Koordinaten zu den anderen Mittelwerten von 1 - 2 cm sowie die etwas größere Differenz dieser Mittelwerte aus Langzeitbeobachtungen zueinander. Die Abweichungen können nicht auf Fehler in der Untersuchungsmethode zurückgeführt werden,

sodass vermutlich vernetzungsbedingte Unterschiede zwischen den Lösungen der Korrekturdatendienste vorliegen. Die Größenordnung der Abweichungen aller Mittelwerte zueinander liegt noch im Genauigkeitsrahmen, wobei einzelne Messungen Abweichungen bis zu 6 cm aufweisen. Die Ergebnisse zur Langzeitstabilität und zur Qualität konnten auch in unabhängigen weiteren Messungen der genannten Diplomarbeit bestätigt werden. Die Diplomarbeit hat sich zusätzlich mit den Einflüssen bei höherer Messtaktrate beschäftigt. Es wurde über einen Messzeitraum von 10 min RTK-GPS-Koordinaten mit einer Taktrate von 10 Hz aufgezeichnet. Wie zu vermuten ist, zeigen sich hier die höheren Abhängigkeiten der zeitlich benachbarten Messdaten in der Koordinatenfolge. Die maximale Korrekturdatenaktualisierung der kommerziellen Anbieter von 1 Hz, im Gegensatz zu den lokalen Korrekturdaten mit 10 Hz, unterstützt diesen Effekt. Trotz der höheren Korrelation der Messdaten zeigt der Genauigkeitsrahmen ein ähnliches Verhalten wie bei den oben dargestellten Langzeitbeobachtungen mit Messtakraten von 30 s.

Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität offenbaren, dass aufgrund der Korrekturdatenart Unterschiede zu erwarten sind, welche aber im Mittel in den Genauigkeitsrahmen für RTK-GPS-Messungen fallen. Die Langzeitstabilität ist somit gegeben. Auffällig ist jedoch das geringere Streuen der Messwerte mit lokaler Referenzstation und mit SAPOS-Korrekturdaten. Für die koordinatengesteuerte Aussaat von Zuckerrüben scheint somit der Einsatz einer lokalen Referenzstation sinnvoll, welche keine signifikante Beeinflussung der Genauigkeit und Qualität der Ablageposition über die Länge der Aussaat erwarten lässt.

Einflüsse von Neuinitialisierungen:

Ein weiterer genauigkeitsbeeinflussender Faktor von RTK-GPS-Messungen liegt in der Qualität bzw. Wiederholungsqualität einer Neuinitialisierung. Sowohl Signalausfälle des GPS-Systems während der Aussaat als auch koordinatengebundene Folgemaßnahmen zu einem späteren Zeitpunkt benötigen eine Anfangsinitialisierung des Gerätes. Diese Neuinitialisierungen des Empfängers auf Basis eines neuen Bezugssatelliten und neuer Startinformationen könnte zu Abweichungen in den Koordinaten führen (FUHLBRÜGGE 2004), welche sich direkt auf die Anschlussfähigkeit an die bereits vorhandenen Pflanzpositionen auswirken. Die Folge wäre ein Versatz in der Saatspur oder bei landwirtschaftlichen Folgemaßnahmen eine ungenaue Bearbeitung, verbunden mit möglichen Pflanzenbeschädigungen oder -verlusten. Um die Einflüsse von Abweichungen in den Neuinitialisierungen zu minimieren, ermöglicht die Gerätesoftware einiger Gerätehersteller eine permanente automatische Überprüfung und ggf. eine schnelle Verbesserung der aktuellen Initialisierung während des Messprozesses. Dies gilt auch für die eingesetzten Empfänger SR530 (FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS 2010), sodass nur die Abweichungen zu Beginn eines Geräteneustarts eine Rolle spielen. Aufgrund dieser Tatsache ist standardmäßig mit keinem signifikanten Einfluss, welcher größer als die RTK-Systemgenauigkeit ausfällt, zu rechnen.

Zur Überprüfung der Einflüsse einer Neuinitialisierung auf die Genauigkeit von RTK-GPS-Messungen wurden im Rahmen der Diplomarbeit ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Es kam wiederum die oben beschriebene Roverstation mit Antennensplitter unter optimalen Empfangsbedingungen zum Einsatz. Die Untersuchung umfasste an verschiedenen Tagen mehrere Neuinitialisierungen mit je 10 Messepochen, wobei die zeitliche Unterbrechung eine zufällig gewählte Länge aufwies. Die Ergebnisbetrachtungen konzentrieren sich jedoch aufgrund der oben erörterten Genauigkeitsvorteile bei der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben auf die Erkenntnisse des Empfängers unter Nutzung der lokalen Referenzstation. Eine exemplarische Darstellung der Lagekoordinaten von 12 beliebigen Neuinitialisierungen mit einer Messdauer von je 10 Epochen bei 1 Hz ist auf der nächsten Seite in Abbildung (5-23) graphisch dargestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass selbst innerhalb der ersten 10 Messsekunden bei optimalen Empfangs- und Umgebungsbedingungen mit einer Genauigkeit im Bereich von ca. 2 cm zu rechnen ist. Alle weiteren auch mit anderen Korrekturdatendiensten durchgeführten Neuinitialisierungen weisen ein ähnliches Genauigkeitsverhalten auf, wobei in den ASCOS-Ergebnissen wiederum ein geringfügig größeres Streuen auffällig ist.

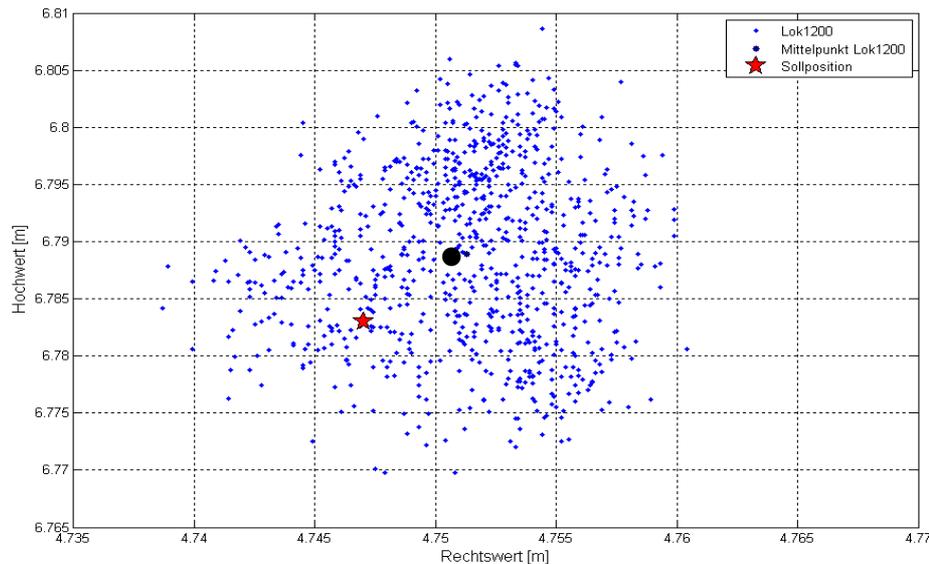


Abb. 5-23: RTK-GPS-Positionen mit einer lokalen Referenzstation bei mehreren Neuinitialisierungen

Alle durchgeführten Untersuchungen zum eingesetzten RTK-GPS-System verdeutlichen, dass bei der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben mit einer absoluten Lagegenauigkeit von < 4 cm gerechnet werden kann. Voraussetzung ist ein ungestörter Satellitenempfang. Weiterhin lassen die Untersuchungen die Vermutung zu, dass in der Kinematik auch Messgenauigkeiten bis in den Bereich statischer RTK-GPS-Messungen mit Genauigkeiten von 1 - 2 cm erreicht werden können. Durch die Genauigkeitsbeschränkung des 2D-Referenzsystems kann diese Vermutung jedoch nicht hinreichend belegt werden. Zu beachten ist außerdem die Möglichkeit von vereinzelt GPS-Fehlern bis in den Subdezimeterbereich. Diese Tatsache zeigt die Notwendigkeit des Multi-Sensor-Systems mit KALMAN-Filterung zur Lösung der präzisen Längsfahrtproblematik. Weitere Genauigkeitseinbußen, durch mögliche Qualitätsunterschiede in den Korrekturdaten bei längeren landwirtschaftlichen Maßnahmen oder durch Neuinitialisierungen, sind aufgrund der Untersuchungsergebnisse nicht zu erwarten. Bei hohen Messtrakraten ist die Nutzung einer lokalen Referenzstation zu bevorzugen, da der Nutzer nur so einen Einfluss auf die Aktualität der Korrekturdatenübermittlung hat. Diese gewonnenen Erkenntnisse fließen in die nachfolgende Verifikation des Filteransatzes ein.

5.2 Verifikation

Die Verifikation und Optimierung des Lösungskonzepts ist ein wichtiger Punkt zur Überprüfung und Realisierung der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben in Längsrichtung mittels einer auf die landwirtschaftlichen Bedingungen angepassten KALMAN-Filterung. Die Richtigkeit und die Umsetzbarkeit einzelner Komponenten des komplexen Projekts lassen sich durch diese gezielte Erprobung in Form von Versuchsfahrten während der Entwicklung ermitteln. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in Form von Durchführbarkeitsanalysen, Kovarianzmatrizen, Totzeiten sowie Modellierungen von Fahrzeugbewegungen in den echtzeitfähigen Gesamtfilteransatz ein. Die abschließende Verifikation der Lösung mit Hilfe eines unabhängigen Referenzmesssystems zeigt die Realisierbarkeit des Gesamtsystems und bestätigt somit die Wahl des echtzeitfähigen, landwirtschaftlichen Gesamtfilteransatzes.

Bereits im Jahr 2006 erfolgten die ersten praktischen Versuchsfahrten mit dem in Kapitel 4.2.1.1 vorgestellten Versuchsträger (Handwagen) als auch einer Mehrreihensämaschine unter Saatbedingungen als erste Verifikation des Ansatzes. Das Ziel dieser Versuchsfahrten war die Prüfung der Übertragbarkeit eines bewährten Filteransatzes (vgl. Kapitel 4.4.7) aus dem PKW-Bereich (Metergenauigkeit) in die Produktionsprozesse der Präzisionslandwirtschaft mit einer Genauigkeitsanforderung im Zentimeterbereich.

Im Vordergrund standen zunächst Versuchsfahrten zur Funktionalität des Gesamtsystems unter den Rahmenbedingungen des späteren landwirtschaftlichen Einsatzes. Die Messdaten wurden während dieses Entwicklungsstadiums noch im Postprocessing gefiltert, um eine optimierte Modellierung und Parametrisierung für den späteren Filterungsansatz unter Echtzeitbedingungen erreichen zu können. Die verschiedenen Komponenten des Multi-Sensor-Systems wurden mit speziellen Halterungen sowohl an einem Handwagen (vgl. Abb. 5.17) als auch an einer Mehrreihen-Einzelkornsämaschine mit Zugmaschine adaptiert (vgl. Abb. 5-24). Der Untergrund für die Fahrversuche mit dem Handwagen bestand aus Asphalt im Gegensatz zu den Fahrten der Sämaschine, welche auf einem vorbereiteten Saatbett erfolgten. Die Geschwindigkeit der Fahrversuche lag bei konstanten 5-7 km/h.



Abb. 5-24: Multi-Sensor-Systems an einer Mehrreihensämaschine

Die ersten Fahrten zur Funktionalität des Gesamtsystems erfolgten mit dem Handwagen über Asphalt. Die ersten ungefilterten Messwerte zeigen eine deutliche translatorische und rotatorische Drift der rein relativen Positionen zu den absoluten GPS-Daten (vgl. Abb. 5-25).

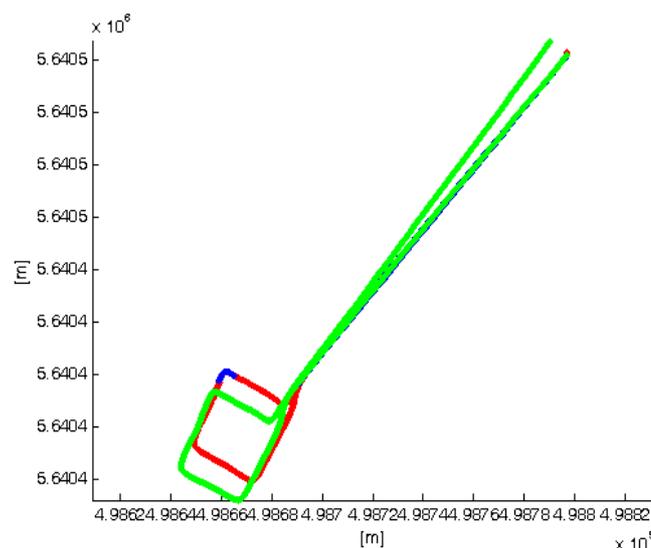


Abb. 5-25: Darstellung der ungefilterten Messwerte (10Hz –Messtakt), GPS (rot/blau), relative Sensoren (grün)

Dieses Verhalten über die Zeit ist aufgrund der Angaben in den Herstellerdatenblättern und der durchgeführten Sensorkalibrierung (vgl. Kapitel 5.1) zu erwarten. Die Notwendigkeit der Verknüpfung aller Informationsgrößen (Systemparameter und Messdaten) zur Lösung der genauen Positionierungsaufgabe von Reihenkulturen ist deutlich zu erkennen.

Die Testfahrten lassen weiterhin die Notwendigkeit eines ausreichenden und störungsfreien GPS-Empfangs unter realen Bedingungen erkennen. Eine ausreichende RTK-GPS-Qualität zur präzisen Saatkornablage von ca. 2 cm erfordert mindestens 5 Satelliten und einen permanenten sowie aktuellen Korrekturdatenstrom. Falls dies nicht der Fall ist, entstehen im Verlauf der Zeit eine zunehmende Drift und ggf. Sprünge in den Ergebnissen der Filterung in Richtung der fehlerhaften, absoluten Messungen. Insbesondere die Totzeiten über mehrere Sekunden, bis die GPS-Qualität (präziser Modus) nach Empfangsstörungen bei einer ausreichenden Anzahl von Satelliten und eines entsprechenden Korrekturdatenstroms wieder hergestellt ist, sind problematisch. In dieser Zeit ist die Fortführung der gefilterten Trajektorie nur bedingt drift- und sprungfrei möglich. Eine genaue absolute Positionierung für eine echtzeitfähige Positionierung im Raum ist somit die Basis eines Filteransatzes zur präzisen koordinatengesteuerten Saatkornablage.

In Abbildung 5-26 sind die gefilterten Positionen der Messdaten des GPS-Sensors, des Weg- bzw. Geschwindigkeitssensors und des Drehratensensors zu der absoluten GPS-Trajektorie dargestellt.

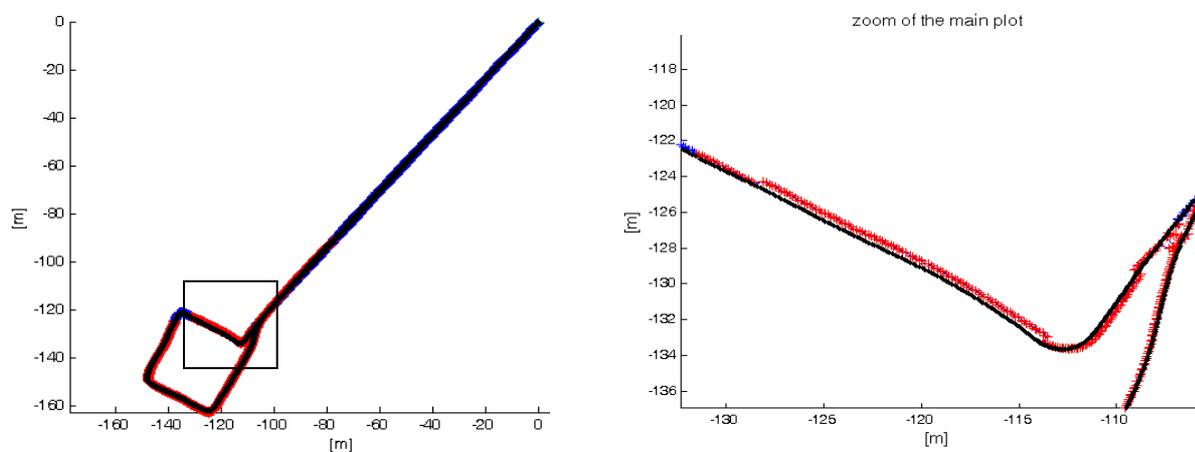


Abb. 5-26: Darstellung der gefilterten Position mit allen Sensordaten (10Hz -Messtakt), GPS (rot), gefilterte Positionen (blau)

Die gefilterten Positionen folgen geglättet der absoluten Positionierung durch die GPS-Messungen, ohne auf sprunghafte Positionsänderungen in den Daten unmittelbar zu reagieren. Die Vergrößerung in Abbildung 5-26 zeigt zudem, dass die geschätzte Trajektorie trotz der beabsichtigten Trägheit bezüglich fehlerhafter Sensordaten, einer gewollten, tatsächlichen Richtungsänderung - ohne ein markantes Überschwingen - folgt.

Aufgrund der ersten positiven Erkenntnisse aus den Handwagenfahrten zur Funktionalität und Übertragbarkeit des KALMAN-Filteransatzes auf den Einsatz im Zuckerrübenanbau wurden weitere Versuchsfahrten mit der Mehrreihensämaschine und dem adaptierten Multi-Sensor-System durchgeführt. Die Adaption mit der landwirtschaftlichen Zugmaschine ergab die Möglichkeit von Versuchsfahrten über einem Ackerboden mit saatkornähnlicher Oberflächenqualität. Die Einflüsse des Untergrundes und die höhere Trägheit einer landwirtschaftlichen Maschine auf das Verhalten der Sensoren und die Filterqualität waren dabei von besonderem Interesse. Die Basis des verwendeten Filters lag wiederum in einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung entlang der geradlinigen Saatrichtung. Zur besseren Verdeutlichung der Auswirkungen des Filteransatzes auf die gleichabständige Aussaat in Längsrichtung fand für diese Feldversuche zunächst nur ein 1D-Filteransatz (vgl. Kapitel 1.3) mit Taktraten von 10 Hz Verwendung. Die Visualisierung der Auswirkungen erfolgt auf Basis einer Differenzbildung der gefilterten Strecken zu den Streckenlängen einer ausgleichenden Geraden („Sollstrecken“). Diese „Sollstrecken“ wurden dabei aus der Messzeit und der konstanten Geschwindigkeit der Zugmaschine gebildet und in den Graphiken in Abbildung (5-27) dargestellt.

Die Ergebnisse (Abbildung 5-27) lassen zunächst deutliche systematische Anteile entlang der ca. 200 m langen Versuchsfahrt mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 km/h über Ackerboden erkennen. Der Grund dafür liegt in den Abweichungen der realen Geschwindigkeit von der vorgegebenen konstanten Geschwindigkeit der Zugmaschine, welche in die Berechnung der „Sollstrecken“ eingeflossen sind. Trotz konstant vorgegebenem Handgas und einer möglichst kurzen Getriebeübersetzung der Zugmaschine zeigen sich diese Schwankungen in der Sägeschwindigkeit. Eine Ursache ist in den Traktionsdefiziten bei landwirtschaftlichen Untergründen sowie in Geländeneigungen zu suchen, wobei eine Modellierung schwierig ist. Trotz der Größenordnung dieser langperiodischen Systematiken im Dezimeterbereich kann bei der Modellierung des Filteransatzes weiter von einer konstanten Sägeschwindigkeit ausgegangen werden, so dass diese Abweichungen in den Störterm fließen. Der Grund hierfür liegt in den rekursiven Filterungen mit Taktraten < 1 sec. Die Versuchsfahrten über Ackerboden zeigen außerdem eine deutliche Glättung der Rohmesswerte nach der Nutzung des Filteransatzes. Die Berücksichtigung der Maschinenträgheit in der Modellierung führt zu einer wesentlich realitätsnäheren Versuchsfahrt, da die erhebliche Masse der Landmaschine kurzzeitige Geschwindigkeitsänderungen physikalisch nicht zulässt. Eine zusätzliche Erhöhung der Redundanz des Filteransatzes durch weitere Streckenmesswerte (Correvit-Messungen) führt zu einer weiteren Verbesserung (Glättung) der koordinatengesteuerten Saatkornablage.

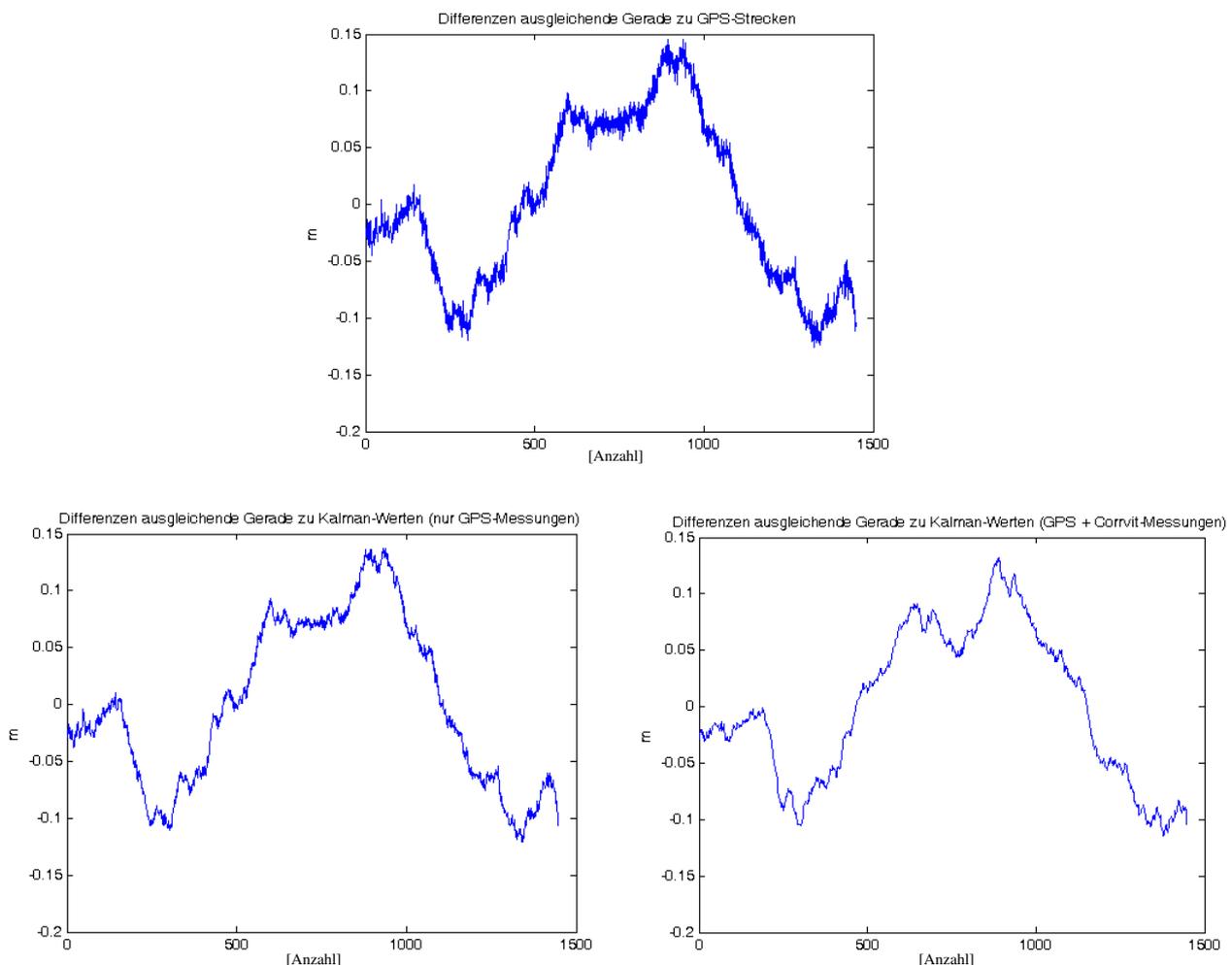


Abb. 5-27: Darstellung der Auswirkungen eines 1D-Filteransatzes auf die Qualität der Positionierung

Die ersten Versuchsfahrten auf Asphalt und Feldboden zur Verifikation des landwirtschaftlichen Filteransatzes lassen bereits das Potential der Lösungsidee zur koordinatengesteuerten Saatkornablage erkennen. Der Einsatz des Multi-Sensor-Systems kombiniert mit einem geeigneten Filteransatz führt in der Präzisionslandwirtschaft zu einem deutlichen Genauigkeitsgewinn durch eine realitätsnahe Trajektorienbewegung. Die natürliche Massenträgheit einer fahrenden Landmaschine unter authentischen Rahmenbedingungen kann auf dieser Filtergrundlage ausreichend berücksichtigt werden. Das Rau-

schen der Messdaten wird gezielt reduziert, ohne einen gravierenden Einschwingvorgang auch bei tatsächlichen Richtungsänderungen zu verursachen. Die vorhandene Filtergrundlage aus dem PKW-Bereich lässt sich somit mit einer gezielten Modifikation an die geforderte Genauigkeit und die größere Trägheit des Fahrzeugs auf die Aufgaben der Präzisionslandwirtschaft übertragen. Die Ergebnisse der Versuchsfahrten über verschiedene Untergründe zeigen weiterhin, dass der Unterschied zwischen einer speziellen Saatbettoberfläche und einer befestigten Oberfläche für die Verifikation des Filteransatzes zunächst vernachlässigt werden kann. Bei den verschiedenen Versuchsfahrten sind eine Glättung und ein Genauigkeitsgewinn von ähnlicher Größenordnung zu erkennen, sodass die Nutzung des Versuchsträgers auch zur weiteren Verifikation ausreichend erscheint.

Trotz der 1D-Problematik einer gleichabständigen Saatkornablage entlang einer Geraden wird für die Lösung im Weiteren die in Kapitel 4.4.7 vorgestellte 2D-Echtzeitfilterung gewählt. Die gleichzeitige Erfassung der Lagekoordinaten für die einzelnen Pflanzenpositionen und die notwendige Anschlussposition für die zukünftige Wendeproblematik kann durch diesen mehrdimensionalen Ansatz berücksichtigt werden. Die Grundlage bilden zwei parallel rechnende Filterungen auf der Basis des Filteransatzes aus dem Pkw-Bereich (vgl. Kapitel 4.5). Der Grund für die Nutzung von zwei Filterungen liegt in der benötigten echtzeitfähigen Ablagepositionsberechnung bzw. Ablagepulserzeugung bei unterschiedlichen Verzögerungs- bzw. Totzeiten der verschiedenen Messwerte. Ein Filterteil ist für die echtzeitfähige Positionsberechnung und die damit verbundene Ablagepulserzeugung verantwortlich, während die andere nicht echtzeitfähige Filterung eine Lösung über alle Messwerte erzeugt. Durch die zusätzliche Nutzung von absoluten GPS-Informationen ergibt sich neben einer Driftreduktion der relativen Filterung die Möglichkeit der absoluten Positionierung entlang der Trajektorie.

Die Saatkornablageposition basiert auf einem permanenten Vergleich der gefilterten Fahrzeugposition mit den beabsichtigten gleichabständigen Ablagepositionen (z.B. 0,3 m). Die Realisierung erfolgt zunächst unter dem Betriebssystem Windows, was die Zykluszeiten für die Messwernerfassung und Filterungen systembedingt auf etwa 4 Millisekunden beschränkt. Dies ergibt bei einer Sägeschwindigkeit von 5 - 7 km/h eine zurückgelegte Wegstrecke von 3 - 4 mm zwischen den einzelnen Filterergebnissen. Kleinere Zykluszeiten können erst durch eine Portierung der Gesamtlösung auf die Basis eines Echtzeitbetriebssystems erreicht werden. Zur Verifikation des echtzeitfähigen Filteransatzes und die Überprüfung der Ablagegenauigkeit auf die geforderte Genauigkeitsanforderung von $\sigma < 2$ cm für die Positionsbestimmung sollten die vorhandenen Rahmenbedingungen zunächst ausreichen.

Eine weitere Optimierung des Gesamtfilteransatzes erfolgt durch eine Übertragung der Ergebnisse der Untersuchungen und Kalibrierungen aus dem Kapitel 5.1 in die Kovarianzmatrix der Beobachtungen. Außerdem wird die erhöhte Trägheit (Gedächtnis des Systems) einer landwirtschaftlichen Maschine bei der Modellierung der Fahrzeugbewegung in Form eines angepassten Störterms berücksichtigt. Die Folge ist eine Reduktion des Messrauschens bei gleichzeitiger Erhöhung der Trägheit auf reale Geschwindigkeitsänderungen, was wiederum zu kurzzeitigen Abweichungen in der Gleichabständigkeit der Saatkornablage führen kann. Die Größenordnung einer optimalen Filterträgheit ist durch die verschiedenen Versuchsfahrten unter landwirtschaftlichen Bedingungen experimentell ermittelt worden.

Die Verifikation des Gesamtkonzepts unter Saatbedingungen stellt aufgrund der Verfügbarkeit eines geeigneten Referenzmesssystems, welches unter landwirtschaftlichen Bedingungen einsetzbar ist, eine Problematik dar. Der Nachweis der Richtigkeit der gefilterten Positionen erfordert entweder ein synchronisierbares Messsystem mit übergeordneter Genauigkeit oder eine Visualisierung der gefilterten Positionen des Multi-Sensor-Systems entlang der Trajektorie. Genaue geodätische Messgeräte wie z.B. Präzisionstachymeter, welche für diese Genauigkeitsansprüche geeignet wären, haben bei Messungen in der Bewegung den Nachteil einer unzureichenden Synchronisation der Weg- und Winkelmessung. Dies führt zu nicht korrigierbaren Fehlereinflüssen in den Referenzkoordinaten. Präzisere Messsysteme - z.B. Lasertracker - sind unter landwirtschaftlichen Bedingungen nicht einsetzbar, sodass die Möglichkeit eines kinematischen Referenzmesssystems nicht weiter verfolgt wurde. Die Möglichkeit einer Visualisierung kann beispielsweise durch die abgelegten Saatkörner und ihren zugehörigen Filterpositionen, verbunden mit einer späteren statischen Einmessung, erfolgen. Von Nachteil ist dabei die Sichtbarkeit und Auffindbarkeit des Saatgutes in der Säfurche bzw. ein Verrollen auf Asphalt. Auch eine spätere Einmessung der aufgehenden Pflanzen mit geodätischen Standardmessme-

thoden ist aufgrund der ausgeprägten zeitlichen Verzögerung und der messtechnischen Bestimmung des Pflanzenzentrums auf dem unbefestigten landwirtschaftlichen Untergrund nicht problemlos möglich. Die benötigten Wachstumszeiten pro Versuchsfahrt schränken zudem die Flexibilität bei der Erprobung des Gesamtsystems ein.

Eine praktikablere Lösung stellt die Verifikation des Gesamtkonzepts mit Hilfe des fahrbaren Versuchsträgers und dem bereits bei der Kalibrierung des RTK-GPS-Systems genutzten, steuerbaren Signiersystems (vgl. Kapitel 5.1.2) über einer befestigten Oberfläche dar. Die Einmessung der erzeugten Ablagemarkierungen, welche mithilfe der in Echtzeit gefilterten Positionen erzeugt wurde, kann zur Überprüfung der Filterung und der resultierenden Genauigkeit der Ablage genutzt werden. Die Verifikation des Gesamtsystems kann somit im PostProcessing durch eine geodätische Tachymeteraufnahme und einem Vergleich mit den gespeicherten Ablagekoordinaten aus der Filterung durchgeführt werden. Zu beachten sind jedoch: die in Kapitel 5.1.2 dargestellte Genauigkeit des Signiersystems, die Genauigkeit der tachymetrischen Punktaufnahme und die Wahl des Zentrums der Markierung mit einem Durchmesser von 1 - 2 cm bei der Einmessung. Diese Einflüsse führen zu Ungenauigkeiten im Zentimeterbereich, was für eine genaue Verifikation des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Genauigkeitsforderung der Ablagepositionen von $\sigma < 2$ cm nicht optimal ist. Das Signiersystem stellt eine realisierbare Methode zur Verifikation des Gesamtsystems in der Bewegung dar, sodass es für die durchgeführten Untersuchungen trotzdem eingesetzt wurde. Außerdem bewegen sich die Ungenauigkeiten dieses Referenzsystems in einem ähnlichen Bereich wie die zu erwartende spätere Ablagegenauigkeit des Prototyps einer gesteuerten Einzelkornsämaschine (vgl. Abb. 5-28) des Institutes für Landtechnik der Universität Bonn, mit Verrollungen bis 1 cm (vgl. Kapitel 2.14).

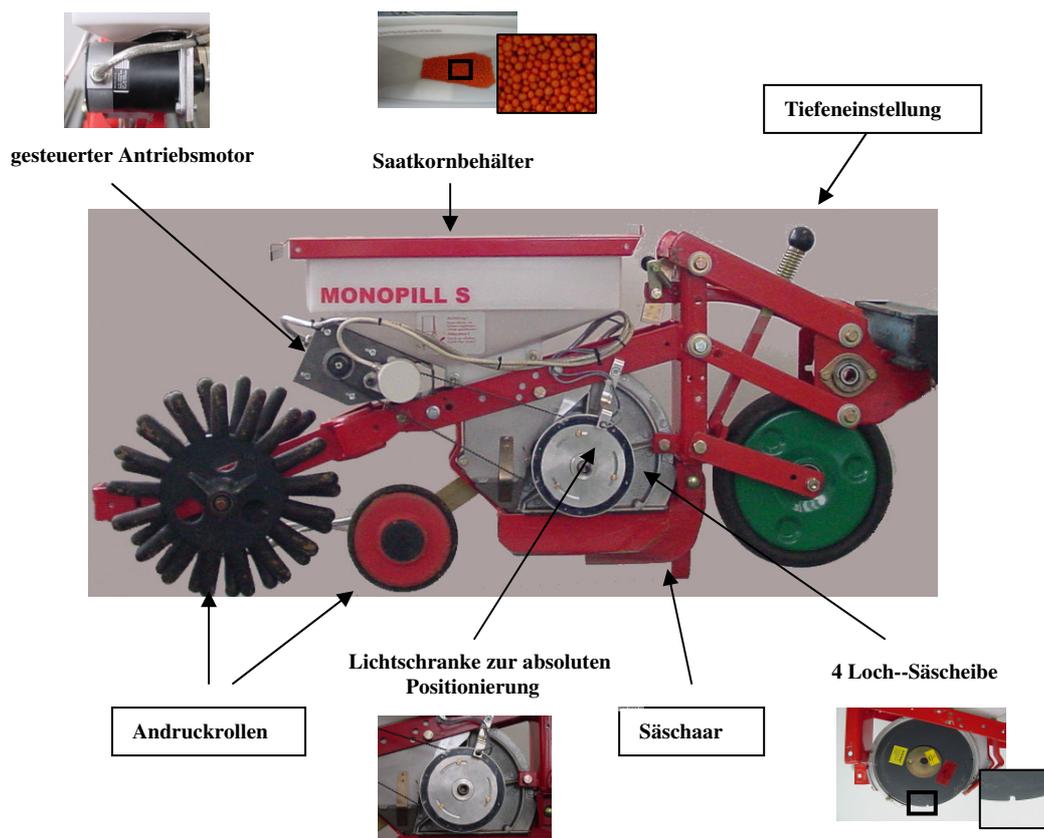


Abb. 5-28: Prototyp einer modifizierten Einzelkornsämaschine mit gesteuerter Antriebseinheit

Alle Versuchsfahrten des Gesamtsystems in Verbindung mit dem Signiersystem wurden auf einem asphaltierten geradlinigen Weg von etwa 150 m Länge unter optimalen RTK-GPS-Empfangsbedingungen durchgeführt. Die Geschwindigkeit des manuell bewegten Versuchsträgers lag bei etwa 5 - 6 km/h.

Zur Simulation einer manuell gesteuerten Säfahrt entlang einer markierten Linie, erzeugt durch eine Anreißscheibe, wurde der Versuchsträger möglichst parallel zum Wegrand geführt. Die Ablageweite ist aufgrund der Anzahl von einzumessenden Ablagepunkten mit einer realistischen Länge von 0,3 m gewählt worden. Dies ergibt eine Anzahl von ca. 300 Ablagestellen mit Koordinaten entlang der Geraden auf dem befestigten Weguntergrund (vgl. Abb. 5-29). Die farblich markierten Ablagepositionen wurden anschließend mit einem Tachymetersystem TCRP 1201 und zugehörigem Prismenstab der FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010) eingemessen. Das Ergebnis der Einmessung besteht aus lokalen Lagekoordinaten der einzelnen Ablagestellen, welche hinsichtlich der Zielstellung den Gesamtprozess verifizieren können. Sowohl die realtiven Saatabstände untereinander als auch die Ablage, bezogen auf die Gesamttrajektorie (absolute Ablageposition), können somit auf die Einhaltung der Genauigkeitsforderungen überprüft werden (vgl. Kapitel 3.2). Die absolute Ablagegenauigkeit entlang eines Schrages ist insbesondere für die Anschlussfahrten und die damit verbundene Erzeugung von Längs- und Querreihen für ein flächendeckend verlustfreies Hacken von großer Bedeutung. Alle Abstände während der Aussat entlang eines Schrages sollten dabei ein Vielfaches der vorgegebenen Ablagelänge unter Beachtung der vorgegebenen Genauigkeit sein, um einen Pflanzenverlust zu vermeiden.

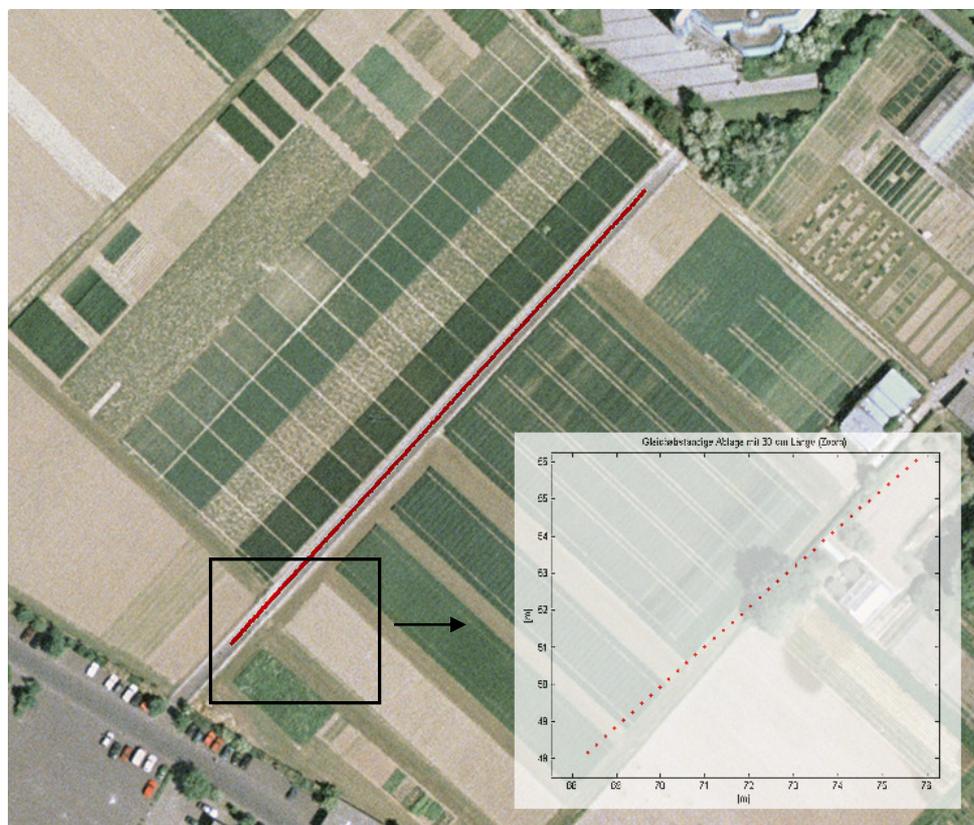


Abb. 5-29: Prototyp einer modifizierten Einzelkornsämaschine mit gesteuerter Antriebseinheit

Eine erste Betrachtung der gefilterten Ablagekoordinaten entlang der simulierten Säfahrt und der daraus berechneten Ablageweiten zeigt, dass eine Kopplung der beiden Filterungen auf der Basis der unterschiedlichen Sensormesswerte sowie der weitere echtzeitfähige Rechenprozess zur Erzeugung des Ablagepulses und der Ablagelageposition im erwarteten Genauigkeitsrahmen arbeitet.

In Abbildung 5-30 sind zunächst die relativen Ablageweiten, deren Mittelwert und das zu erwartende Rauschen zu erkennen. Die mittlere Ablageweite der vorliegenden Koordinatenstichprobe liegt bei der beabsichtigten Sollablageweite von 0,3 m und auch das Rauschband der Einzelwerte zeigt keinen markant systematischen Verlauf im Rahmen der Ablagepunkte. Es kann somit von einem weißen Rauschprozess ausgegangen und die zugehörige Standardabweichung berechnet werden. Die innere

- aus Koordinaten berechnete - Standardabweichung der Einzelstrecken ergibt einen Wert von 0,16 cm, was einer Genauigkeit deutlich unter der geforderten Ablagepositionsgenauigkeit von $\sigma < 2$ cm entspricht. Auch die Bandbreite der Einzelwerte liegt bei der gesamten Stichprobe innerhalb eines Intervalls von 1cm.

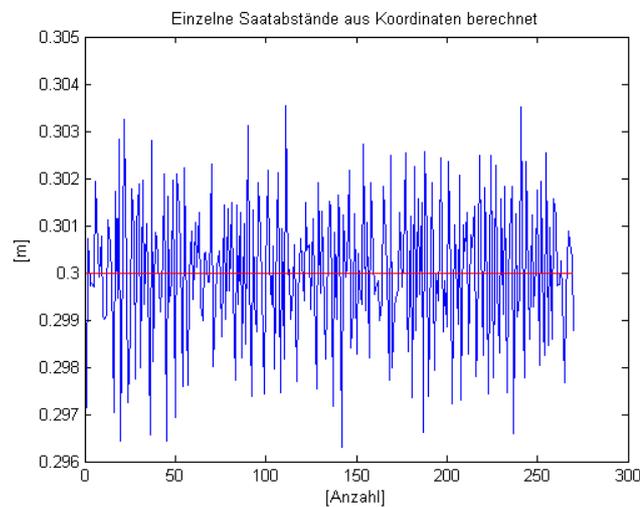


Abb. 5-30: Relative Saatabstände aus den Ablagekoordinaten und mittlerer Saatabstand

Das in Abbildung 5-30 dargestellte Ergebnis stellt jedoch nur eine prozessinterne Rechengenauigkeit dar, sodass eine weitere Verifizierung der Ergebnisse in Form einer Berechnung der äußeren Genauigkeit für ein aussagekräftiges Genauigkeitsmaß der einzelnen Ablageweiten erforderlich ist. Diese Verifizierung hinsichtlich der Einhaltung einer gleichmäßigen relativen Ablageweite entlang der geradlinigen Aussaat kann durch die tachymetrische Einmessung der Ablagepositionen erfolgen. Die bereits erwähnten Defizite der tachymetrischen Punktaufnahme aufgrund des Signiersystems und der genauen zentrischen Aufnahme der Markierungen mit einem Prismenstab sind dabei zu beachten. Dies läßt bereits vor der Auswertung die Vermutung leichter Genauigkeitsdefizite und ggf. das Auftreten systematischer Effekte zu. Die in Abbildung 5-31 dargestellten Ergebnisse der Tachymeteraufnahme bestätigen diese Erwartungen. Es zeigt sich ein erhöhtes Gesamtrauschband der Ablageweiten aus der Tachymeteraufnahme mit einer Breite im Bereich von ca. 1 – 1,5 cm, wobei der überwiegende Teil der realiven Abstände in einer Bandbreite von < 1 cm schwankt. Eindeutige Systematiken sind nicht zu erkennen, auch wenn der Verlauf der Graphik ungleichmäßiger als der Verlauf bei den Abständen aus Koordinaten erscheint.

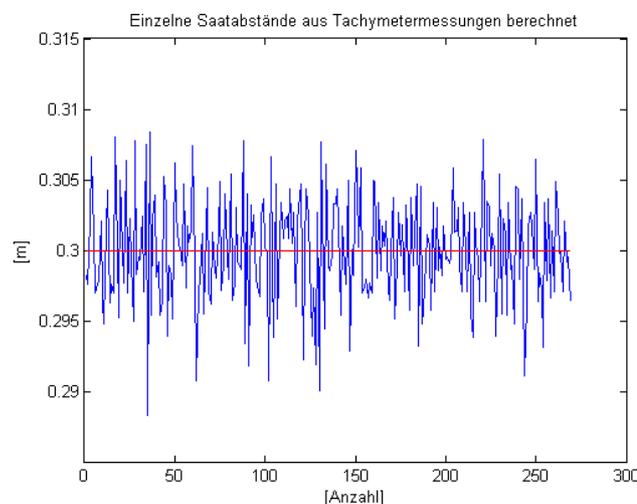


Abb. 5-31: Relative Saatabstände aus der Tachymeteraufnahme und mittlerer Saatabstand

Dieses Verhalten kann mit dem ungleichmäßigen Verzögerungsverhalten der Auslösung des Signiersystems (Ventilverhalten, Pigmentdicke etc.) und der subjektiven Punktaufnahme in Verbindung gesetzt werden. Die Berechnung der Standardabweichung einer Einzelmessung aus Tachymetermessungen ergibt eine äußere Genauigkeit der relativen koordinatengesteuerten Ablage mittels des Gesamtsystems von 0,0038 m. Die Verifizierung der relativen Ablageweiten zeigt, dass die geforderte Ablagegenauigkeit für die Geradenfahrt aus geodätischer Sicht eingehalten werden kann und der Filteransatz unter landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen funktionsfähig ist.

Einen weiteren wichtigen Aspekt für die Beurteilung der Funktionsfähigkeit und Richtigkeit des Gesamtkonzepts stellt die Überprüfung der absoluten Ablagepositionen bzw. Ablageweiten entlang der Säfahrt dar. Für ein verlustfreies rechtwinkliges Befahren der Feldfläche müssen die Ablagepunkte über die gesamte Länge einer Geradenfahrt parallel zu den Ablagepositionen der vorherigen Spur sein. Bei einer angestrebten einheitlichen Ablageweite von 0,3 m bedeutet dies, dass jede einzelne Ablage entlang der Trajektorie einer Fahrt ein Vielfaches der beabsichtigten Sollablageweite sein muss. Die Anforderungen an die Genauigkeit wurden bei diesen absoluten Ablagepositionen innerhalb einer Reihe ebenfalls bei 2 cm festgelegt. Welche Abweichungen später innerhalb einer sich bildenden Querreihe auftreten werden, kann jedoch erst nach der Lösung der ausstehenden Wendeproblematik überprüft werden. Die verschiedenen Anschlussfahrten sollen später ein verlustfrei befahrbares Schachbrettmuster ergeben, mit einer Genauigkeit von ca. 2 cm über die gesamte Saatfläche (vgl. Kapitel 3.2). Die vorliegenden Versuchsfahrten, ohne eine Lösung für die Wende, können zunächst nur die absolute Ablagegenauigkeit innerhalb einer Längsfahrt verifizieren.

Ein Vergleich der während des Ablageprozesses geschätzten Koordinaten sowie der unabhängigen Ergebnisse der Tachymetermessung mit den absoluten Sollpositionen offenbart auch hier die Qualität der Ablage unter Beachtung der Genauigkeit des Messsystems- und Signiersystems. In Abbildung 5-32 sind zunächst die Abweichungen der geschätzten Ablagekoordinaten zu den Sollpositionen, bezogen auf die erste Ablageposition, zu erkennen. Diese Darstellung vermittelt wiederum einen ersten Eindruck in Form einer inneren Genauigkeit und Funktionalität des Lösungsansatzes.

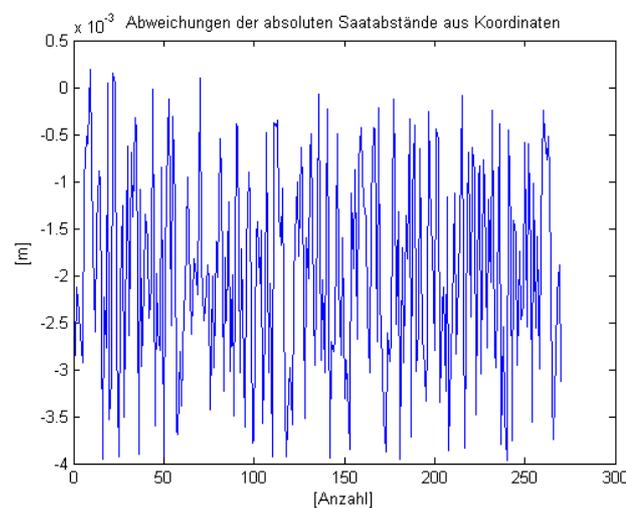


Abb. 5-32: Abweichungen der absoluten Saatabstände aus den Ablagekoordinaten berechnet

Auffällig in dieser Ergebnisdarstellung sind überwiegend negative Abweichungen zur Sollablage, was schon bei der Ablagepulserzeugung auf geringfügig zu kurze absolute Abstände hindeutet. Diese Abweichungen bewegen sich im Bereich von etwa 0 mm bis -4 mm mit einer mittleren systematischen Verschiebung von ca. -2 mm. Die Ursache für diese systematische Verschiebung ist im zeitdiskreten Filteransatz, kombiniert mit der maximalen Messtakrate sowie der Ablagepulsbildung bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit, zu finden. Der verwendete Filteransatz liefert bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit und Messtakrate diskrete Positionen entlang der Trajektorie in Echtzeit. Aufgrund der fehlenden Kontinuität in der Erfassung der Bewegung ergeben sich Lücken zwischen den einzelnen Ist-Positionen, sodass die Wahrscheinlichkeit einer

Übereinstimmung mit der beabsichtigten Soll-Ablageposition gering ist. Eine Lösung für eine lückenlose Aussaat besteht in der Bildung eines Soll-Ablage-Intervall an Stelle einer expliziten Soll-Ablageposition. Die Größe dieses Intervalls muss an die Abstände der einzelnen diskreten Positionen und somit an die Messtaktrate und die Geschwindigkeit angepasst werden. Bei der vorliegenden Geschwindigkeit von 1,5 m/s bis 2 m/s und einer Messtaktrate von 250 Pulsen/s wurde das Soll-Ablage-Intervall zunächst auf ± 4 mm festgelegt. Dies liegt innerhalb der Genauigkeitsforderung für die Ablageposition und ergibt eine zuverlässige Ablage durch den Soll-Ist-Vergleich auf Koordinatenebene. Eine Verringerung der Intervallgröße auf bis zu $\pm 2,5$ mm ist aufgrund der Bandbreite von ca. 4 mm in Zukunft durchaus denkbar. Ansonsten weisen die Ergebnisse keine unmittelbar auffälligen weiteren Systematiken auf, was die Funktionalität des Filteransatzes und der internen Berechnungen auch bezüglich der absoluten Ablagen widerspiegelt. Die Genauigkeitsanforderung für ein verlustfreies Kreuzhacken ist eingehalten, was jedoch ein Vergleich mit einem unabhängigen Messsystem (äußere Genauigkeit) wiederum bestätigen muss.

In Abbildung 5-33 sind entsprechend die Abweichungen der absoluten Saatabstände zu den Sollpositionen aus der Tachymetermessung mit einer Bandbreite von max. 2 - 2,5 cm zu erkennen.

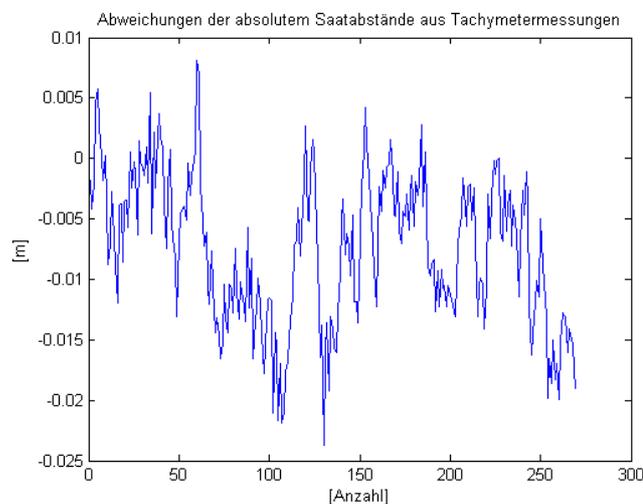


Abb. 5-33: Abweichungen der absoluten Saatabstände aus den Tachymetermessungen berechnet

Der größte genauigkeitsbeschränkende Faktor bei der absoluten Positionierung des Gesamtkonzepts spiegelt sich in der RTK-GPS-Genauigkeit von ca. 2 cm unter optimalen Empfangsbedingungen und einer unzureichenden Berücksichtigung der darin enthaltenen GPS-typischen Restsystematiken wieder. Die vorliegende KALMAN-Filterung ist in der Lage kurzzeitige oder extreme Genauigkeitssprünge durch die Modellierung der Trägheit und die relativen Messinformationen zu verbessern, jedoch keine lanzeitigen systematischen Änderungen in den GPS-Messungen zu berücksichtigen. Bei einer entsprechend schwächeren Gewichtung der absoluten Positionsinformationen kann ein Driften der realtiven Sensoren und reale Schwankungen in der Fahrgeschwindigkeit nur unzureichend berücksichtigt werden.

Der Verlauf der Abweichungen während der Längsfahrt zeigt neben einem zufälligen Rauschen eine sinusförmige Systematik der Ergebnisse. Des Weiteren sind die Ablageweiten des überwiegenden Teils der Stichprobe im Vergleich zur Sollposition wiederum zu kurz erfolgt. Bei der Analyse der Ursachen für diese Abweichungen ist zunächst die bereits erläuterte Systematik in Form des Soll-Ablageintervalls von bis zu ± 4 mm zu beachten, welche zu einem geringfügig kürzeren Ablageabstand führt. Auch eine Veränderung (Verringerung) der Reaktionszeit des Signierventils durch Wärmeeffekte oder Druckluftschwankungen sowie Änderungen in der Viskosität der Farbe sind weitere Gründe für eine Abweichung von den absoluten Sollablageweiten und für die systematischen Schwankungen. Außerdem führen die Fehler in der Punktzentrierung der Tachymeteraufnahme neben den Effekten der RTK-GPS-Messungen zu weiteren farbigen Rauscheffekten, sodass die vorliegenden systematischen Schwankungen in dieser Größenordnung durchaus erklärbar sind. Die Richtigkeit des Gesamtkonzepts hinsichtlich der Genauigkeitsforderung der Pflanzenpositionen kann jedoch auch für

die absoluten Saatabstände bestätigt werden, falls der Prototyp einer gesteuerten Sämechanik (vgl. Abb. 5-28) ähnliche Genauigkeitseinbußen hervorruft wie das Signiersystem in Kombination mit den Tachymetermessungen.

Die Ergebnisse und die Analyse der Versuchsfahrten unter Saatbedingungen lassen erkennen, dass die geforderte Genauigkeit von $\sigma < 2$ cm für die gleichabständigen Pflanzenstandorte von der messtechnischen Seite mit dem vorgestellten Lösungskonzept erreicht werden kann. Das Potential und die Leistungsfähigkeit des 2D-Lösungskonzepts auf Basis eines KALMAN-Filteransatzes sind für den landwirtschaftlichen Bereich klar erkennbar und führen zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit von landwirtschaftlichen Folgeprozessen, wie der maschinellen Unkrautbeseitigung.

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Verbesserungspotential

Das in Kapitel 4 vorgestellte Konzept zur Lösung einer koordinatengesteuerten Aussaat in Längsrichtung ist realisierbar und als Basis für eine mechanische Bestandspflege in der ökologischen Zuckerrübenproduktion nutzbar. Das Potential der geodätischen Sensorik unter landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen zeigen schon die Ergebnisse der Sensorkalibrierungen (vgl. Kapitel 5.1). Die Daten können zur Gewichtung des Filteransatzes in die Kovarianzmatrix der Messgleichungen einfließen. Das Genauigkeitsniveau der Positionsschätzung und die daraus abgeleitete Ablage in Echtzeit entsprechen bei der Längsfahrt den Anforderungen für einen gleichabständigen Rechteckverband, was die Grundlage für ein verlustfreies mechanisches Hacken in Längs- und Querrichtung bedeutet.

Unter optimalen Messbedingungen auf der Versuchsstrecke, mit einer Länge von ca. 150 m und einem Stichprobenumfang von ca. 300 Ablagen, wird bei einer gleichabständigen Aussaat für die relativen Ablageweiten (0,3 m Sollabstand) eine Standardabweichung von 0,0038 m erreicht. Dies liegt im Rahmen der Genauigkeitsforderung von $\sigma < 2$ cm. Die Abweichungen der absoluten Positionen in Längsrichtung über die Gesamtrajektorie fallen mit einer Bandbreite von bis zu 2 cm höher aus. Die Gründe liegen neben Systematiken in der Visualisierung des Referenzsystems u.a. in der maximal möglichen Messgenauigkeit der absoluten Positionierung (RTK-GPS) von 1 - 2 cm (vgl. Kapitel 5.1.2) und der Auslegung des Trägheitsverhaltens der Maschine innerhalb der Filterung. Das Potential der eingesetzten KALMAN-Filterung liegt in einer Verbesserung bzw. Dämpfung der langfristigen Drift der relativ sehr präzise messenden Weg- und Winkelsensorik durch die zusätzliche Nutzung absoluter GPS-Informationen sowie einer Unterdrückung sprunghafter Änderungen während der gleichmäßigen Längsfahrt, hervorgerufen durch kurzzeitige Messfehler. Die absolute Positionsmessung besitzt neben der Trägheit innerhalb des Filterkonzepts einen unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisse. Je höher der Einfluss der Maschinenträgheit gewählt wird desto längerfristig beeinflussen geringfügige Geschwindigkeitsänderungen (z.B. durch Schlupfeffekte der Zugmaschine) die Positionsgenauigkeit. Außerdem ist festzuhalten, dass in Abhängigkeit vom Grad der Trägheit die Filterung bestrebt ist, sich über die Gesamtbewegungszeit der absoluten Positionsgenauigkeit anzunähern. Nicht abschließend zu klären ist die vorwiegend negative Abweichung der absoluten Ablage entlang der Trajektorie bzgl. des Sollabstands. Vermutungen ergeben sich hinsichtlich der „Einlaufeffekte“ des Signiersystems und dessen über Druckluft gesteuerten Ventils sowie des Soll-Ist-Vergleichs des Ablagezeitpunktes.

Insgesamt ist die Verifizierung der Saatkornablagen in Längsrichtung trotz geringer Restsystematiken unter der Genauigkeitsanforderung von 2 cm für die Pflanzen- bzw. Saatkornpositionen erfolgreich verlaufen (vgl. Kapitel 5.2). Der Ansatz einer landwirtschaftlich modifizierten KALMAN-Filterung aus dem Kfz-Bereich ist auf diese spezielle Aufgabe der Präzisionslandwirtschaft übertragbar. Aufgrund der vorliegenden Testfahrten mit Geschwindigkeiten zwischen 1,5 - 2 m/s und Messtakraten unter 300 Hz scheint die programmiertechnische Implementierung im Rahmen der Genauigkeitsanforderungen auf einer nicht echtzeitfähigen Windows-Plattform möglich. Die Zuverlässigkeit der Applikation unter Windows ist jedoch nicht immer 100% zu gewährleisten.

Eine weitere Steigerung der Genauigkeit und eine Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sowie eine präzisere Verifikation des Lösungsansatzes könnten aus den gewonnenen Erkenntnissen der Versuchsfahrten mit entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Folgende Aspekte sind als Verbesserungspotential für zukünftige Entwicklungen zu berücksichtigen:

- Systematische Schwankungen in den absoluten Ablagepositionen entlang der Gesamtrajektorie bis in den Bereich der Genauigkeitsanforderung von 2 cm für die Pflanzen- bzw. Saatkornposition sind im Gegensatz zu den relativen Saatabständen mit einer Genauigkeit im Subzentimeterbereich zu erkennen.

Eine Optimierung in der längerfristigen RTK-GPS-Messgenauigkeit, insbesondere in Bezug auf systematische Messeffekte, ist anzustreben. Dies ist bei kinematischen Messfahrten mit Geschwindigkeiten im Bereich von 2 m/s aufgrund der sich ändernden Umgebungsbedingungen nicht trivial zu lösen. Eine Erweiterung der vorhandenen KALMAN-Filterung durch einen geeigneten Formfilteransatz kann zu einer Reduktion dieser Systematiken führen (WELSCH et al. 2000). Dazu muss eine geeignete Beschreibung bzw. Modellierung der Effekte möglich sein. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der GPS-Messwerte ist durch den Einsatz von zwei unabhängigen absoluten Messsystemen gegeben. Die Nutzung einer Doppelantenne mit fester definierter Basis ist eine weitere Möglichkeit zur Fehlerkontrolle der RTK-GPS-Messung (STEMPFHUBER 2004).

- Es liegen überwiegend negative Abweichungen der absoluten Ablageweiten in Bezug auf die Sollablage vor. Eine umfassende Kalibrierung des neuen Signiersystems zur Simulation der Saatkornablage kann eventuell diesen Effekt erklären. Zusätzlich beeinflusst wird dieser Effekt durch die aktuelle Größe des Ablageintervalls von ± 4 mm um die Sollablageposition.

Höhere Mess- und Berechnungstakraten können mit der aktuellen Windows-Lösung nicht zuverlässig und lückenlos realisiert werden. Die Portierung auf ein echtzeitfähiges Betriebssystem ist für umfangreichere und schnellere Echtzeitereignisse sinnvoll. Eine höhere Diskretisierung der kontinuierlichen Bewegungsvorgänge erlaubt für den Soll-Ist-Vergleich der Ablagepulserzeugung engere Toleranzen. Mögliche Einlaufeffekte des Signiersystems und andere systematische Verhaltenseigenschaften bei der farblichen Markierung der Ablagepositionen müssen zukünftig durch eine ausführliche Systemkalibrierung der Signieranlage ausgeschlossen werden.

- Die aktuelle Verifikation des Gesamtkonzeptes erfolgt aus Mangel an einem geeigneten, echtzeitfähigen Referenzmesssystem in Form einer a posteriori Einmessung der farblich markierten Pflanzen- bzw. Saatkornablagen auf dem Trajektorienuntergrund.

Eine erneute Verifikation des Gesamtkonzeptes zur koordinatengesteuerten Saatkornablage sollte in Kombination mit der gesteuerten Sämaschine und einer größeren Stichprobe erfolgen. Die Einhaltung der Genauigkeitsforderungen kann erst durch die Einmessung einer realen Saatkornablage abschließend überprüft werden. Für die Prüfung der Parallelität von mehreren Längsfahrten und der Genauigkeit der damit entstehenden Querreihen ist zunächst die Wendeproblematik vollständig zu realisieren.

Die aufgeführten Maßnahmen zur Verbesserung des Lösungsansatzes für die koordinatengesteuerte Aussaat in Längsrichtung werden im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten Berücksichtigung finden. Eine weitere Optimierung des im Rahmen der Genauigkeitsvorgaben bereits erfolgreichen koordinatengesteuerten Saatkornablagekonzeptes wird somit möglich.

6 Erste Aspekte zur Wende

6.1 Übertragbarkeit des Lösungsansatzes zur Längsfahrt auf die Wende

Ohne die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit – Lösung der Längsfahrtproblematik – aus den Augen zu verlieren, werden im Folgenden erste Ansätze zur Wendeproblematik präsentiert. Diese Möglichkeit ergibt sich unmittelbar aufgrund des zweidimensionalen Aufbaus des Lösungskonzepts zur Längsfahrt, sodass eine erste vereinfachte Wendefahrt realisierbar sein sollte. Die Dynamik der Fahrbewegungen einer praxisnahen Wendeprozedur mit dem notwendigen Ausheben der Sämaschine - wie in Kapitel 1.2 dargestellt - kann durch diese einfache Übertragung des Lösungsansatzes für die Längsfahrt auf die Wende nicht erreicht werden. Vielmehr soll durch erste Versuche eine Unterstützung der zukünftigen Forschungsarbeiten an der Gesamtproblematik erzielt werden.

Die Konzeption des Multi-Sensor-Systems für die Längsfahrt weist aufgrund der 2D-Gesamtproblematik und der gewünschten Lagekoordinaten der Pflanzenpositionen neben der längsfahrtbezogenen Sensorik zusätzlich einen Winkelsensor auf. Kombiniert mit den absoluten Lagekoordinaten des GPS-Systems ist die Berechnung von 2D-Koordinaten bereits während der Längsfahrt mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Lösungskonzept möglich. Diese Lagekoordinaten sind wiederum die Voraussetzung zur Definition des Startpunktes für weitere Längsfahrten (Anschlussfahrten) im Rechteckverband. Das Lösungskonzept der gleichmäßigen Längsfahrt bildet aus dem Vergleich der Ist-Position mit der beabsichtigten Soll-Ablageposition die Steuerungsgröße für die Ablage der Saatkörner. Eine Übertragung bzw. Weiterführung dieser 2D-Positionsbestimmung der Bewegung entlang eines gleichmäßigen Wendeweges ist somit denkbar. Eine wichtige Voraussetzung zur Übertragung des Lösungsansatzes auf die Wende ist ein gleichmäßig beschleunigter Verlauf der Bewegung ohne Unterbrechungen oder einen Richtungswechsel. Eine großräumige Kurvenfahrt mit quasi konstanter Geschwindigkeit im Anschluss an eine Längsfahrt erfüllt diese Voraussetzungen. Die Positionskordinaten werden dabei während der gesamten Fahrt nahtlos weitergebildet. Lediglich ein Lösungskonzept zur ereignisorientierten Aktivierung bzw. Deaktivierung des Steuerimpulses für die Saatkornablage muss ergänzt werden. Dazu ist die Definition von Start- bzw. Endpunkten für die einzelnen Längsfahrten notwendig.

Bei einer manuellen Säfahrt für gesteuerte Ablageprozesse in Form eines Rechteckverbandes sind alle benötigten Start- bzw. Endpunkte der Längsfahrten zunächst abhängig von einem „Start“-Event zu Beginn der ersten Längsfahrt und einem „Stopp“-Event am Ende dieser Fahrt. Die beiden Endpunkte der ersten Längsfahrt legen somit den Bezug für die Anschlussfahrten fest. In Kombination mit der Orientierung dieser Längsfahrt lassen sich zwei rechtwinklige Geraden zu den beiden Eventpunkten bilden, welche den späteren Rechteckverband begrenzen. Alle weiteren Start- bzw. Endpunkte der anschließenden Längsfahrten (Anschlussfahrten) liegen auf diesen virtuellen Grenzlينien. Der Abstand zwischen den einzelnen Säspuren des Rechteckverbandes wird hingegen weiterhin vom Fahrzeugführer manuell über eine optische Markierung (Spuranreißer vgl. Abb. 1-1) eingehalten. Dies verdeutlicht, dass streng genommen keine punktuellen Start- bzw. Endmarkierungen benötigt werden, sondern die begrenzenden Geraden ausreichen. Ein Überfahren dieser Geraden kann somit zur Steuerung des Starts als auch zum Beenden der koordinatengesteuerten gleichabständigen Saatkornablage während der Längsfahrt dienen.

Eine Möglichkeit zur Realisierung dieses zeit- und ortsbezogenen Steuerungsprozesses zur Aktivierung bzw. Deaktivierung der gleichabständigen Aussaat kann in einem weiteren Soll-/Ist-Vergleich der Begrenzungslinien zu den Positionskordinaten der Sämaschine entlang der Trajektorie liegen. Die Genauigkeit der Steuerung hängt - wie bereits bei der koordinatengesteuerten Saatkornablage erläutert - von der Diskretisierungsrate der kontinuierlichen Bewegung ab. Die Einführung von lokalen Koordinatensystemen mit Ausrichtung einer Achse in Richtung der beiden virtuellen Begrenzungsgeraden vereinfacht die Ermittlung des Zeitpunkts einer Grenzlينienüberfahung nachhaltig. Eine lineare Koordinatentransformation von gleichsinnigen Koordinatensystemen (HÄBLER/WACHSMUTH 1990) ermöglicht diese Überführung der Positionskordinaten in ein Koordinatensystem mit Ausrichtung

entlang der Begrenzungslinien. Dieser Vergleich entlang der Längsfahrtrichtung detektiert somit den Eintritt der Maschine in den Säbereich, bzw. den Austritt aus dem Säbereich. Das Event der Detektion entsteht dann in Form eines Koordinatenübergangs vom positiven in den negativen Bereich oder entgegengesetzt in Abhängigkeit von der Definition bzw. Orientierung der lokalen Koordinatensysteme. Eine erste Steuerungsmöglichkeit der Anschlussfahrten zur Bildung eines Rechteckverbandes ist somit auf der Grundlage der permanenten Positionsbestimmung und einem weiteren Soll-/Ist-Vergleich der Längsfahrt gegeben.

Die vorgestellte Idee verdeutlicht, dass eine erste beschränkte Übertragbarkeit des Lösungskonzeptes der Längsfahrt auf eine vereinfachte Wendeprozedur mit anschließender erneuter Längsfahrt zur Prüfung der Gesamtiee – einer koordinatengesteuerten Aussaat im Rechteckverband – realisierbar ist.

6.2 Erste Versuche einer vereinfachten Wende/mehrreihigen Aussaat

Die in Kapitel 6.1 aufgeführten Aspekte und Überlegungen bzgl. einer vereinfachten Realisierung zur koordinatengesteuerten Aussaat im Rechteckverband können durch die Ergebnisse erster Versuchsfahrten näher beleuchtet werden. Dazu wurden mehrere koordinatengesteuerte Längsfahrten in Kombination mit vereinfachten Wendeprozeduren und parallelen Anfangs- und Endpunkten für die Aussaat in Längsrichtung durchgeführt. Das Multi-Sensor-System der Längsfahrtlösung wurde hierzu erneut auf dem fahrbaren Versuchsträger montiert (vgl. Abb. 5-17) und über befestigtem Untergrund in Form von Asphalt bewegt. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wurde zunächst auf das Signiersystem kombiniert mit tachymetrischen Referenzmessungen, verzichtet. Die ersten Erkenntnisse einer Gesamtlösung basieren somit nur auf den Ablagekoordinaten der Filterung, welche automatisch für jeden Ablagepuls gespeichert werden. Weitere Forschungsarbeiten zur absoluten Ablagegenauigkeit müssen in Zukunft mit einem entsprechenden Referenzmesssystem folgen. Hier ist nur eine erste Untersuchung zur Funktionalität einer mehrreihigen koordinatengesteuerten Aussaat durch parallele Start- und Endpunkte in Form des vereinfachten Lösungsansatzes zur Wende das Ziel.

Die Versuchsfahrten wurden nach folgendem Prinzip durchgeführt: Zunächst erfolgen der Start und die primäre Initialisierung des Sensorsystems mit anschließendem Beginn der ersten Längsfahrt. Dabei werden die ersten Meter dieser Längsfahrt zur Bestimmung der Eingangsorientierung der Filterung benötigt. Die Koordinaten entlang dieses Geradenstücks ergeben die Orientierung der manuellen Fahrt, was die Möglichkeit von Einschwingeffekten der Filterung aufgrund einer schlechten Filterinitialisierung reduziert. Nach dieser Vorlaufstrecke wird die erste Saatkornablage durch ein Event des Fahrers ausgelöst. Es handelt sich dabei, wie bereits oben erwähnt, um eine virtuelle Saatkornablage, da nur der Ablagepuls und die zugehörigen Lagekoordinaten gebildet bzw. gespeichert werden. Im weiteren Verlauf der ersten Spur („Basisfahrt“) findet eine gleichabständige, koordinatengesteuerte Ablagepositionsbestimmung statt, bis ein weiterer manueller Event diesen Prozess am Ende der Säfläche beendet. Die beiden Endpunkte und die Orientierung der ersten Längsfahrt werden zur Bildung der rechtwinkligen Begrenzungsgeraden bzw. der Start-/Endpunkte aller weiteren Längsfahrten in Echtzeit genutzt. Ohne Fahrtunterbrechung geht die Längsfahrt anschließend in die vereinfachte, gleichmäßige Wendeprozedur über. Dabei werden die Bewegungskordinaten weiterhin durch die Filterung berechnet und daraufhin geprüft, ob die Begrenzungsgeraden erneut überfahren worden sind. Ein erneutes Überfahren (Soll-/Ist-Vergleich) startet bzw. beendet die weiteren gleichabständigen Längsfahrten (Anschlussfahrten) automatisch, sodass ein Rechteckverband auf Grundlage der Basisfahrt entstehen kann. Eine wichtige Voraussetzung der Funktionalität dieser ersten Versuchsfahrten ist die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ohne Fahrtunterbrechungen ähnlich der Längsfahrt in Kapitel 5.2.

Auf der folgenden Seite ist in Abbildung (6-1) der oben beschriebene Verlauf einer mehrreihigen, parallelen Säfahrt mit dem Versuchsträger zur Bildung eines Rechteckverbandes zu erkennen. Es sind sowohl die Bewegungsspuren als auch die Ablagepositionen graphisch dargestellt.

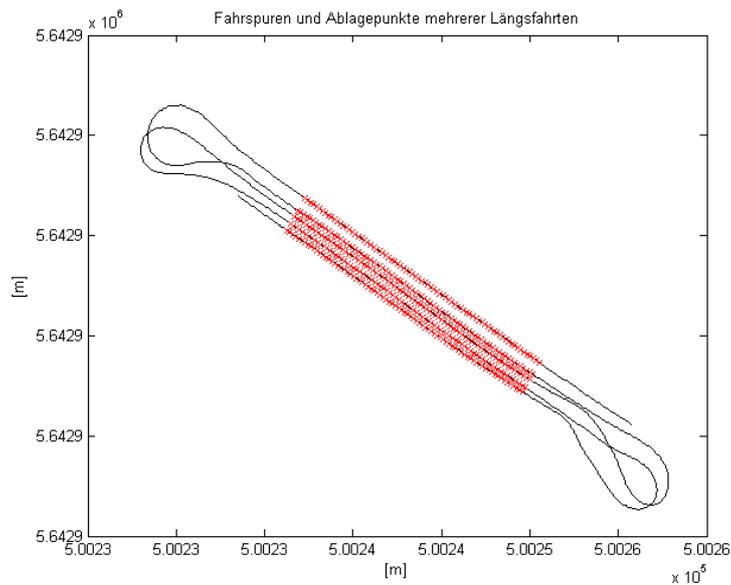


Abb. 6-1: Fahrspuren mit Ablagepunkten (x) im Rechteckverband in Form von mehreren Längsfahrten/Wenden

Aufgrund der vorherrschenden Platzverhältnisse wurden zunächst 5 Längsfahrten mit einer Länge von ca. 15 m durchgeführt. Die Bewegungsspuren weisen eine weiträumige und einfache Wende auf, was sich in Bezug auf die notwendige Gleichmäßigkeit der Fahrbewegung ergibt. Der Abstand zwischen den einzelnen Spuren zeigt zudem deutliche Unregelmäßigkeiten, da ein exakter gleichmäßiger Abstand zwischen den einzelnen Säspuren für diese Untersuchungen zunächst irrelevant war. In der Praxis wird die Gleichabständigkeit der Spuren zueinander vom Fahrzeugführer einer Sämaschine individuell gelöst (z.B.: durch Spuranreißer). Auch die exakte Einhaltung der Geradlinigkeit (Spurtreue) der Längsfahrt ist während der Testfahrt mit dem agilen Handwagen nur bedingt möglich.

Eine rechnerische Rotation dieser Ablagepositionen in Richtung der Basisfahrt, eine Translation auf den Startpunkt und auch eine graphische Spreizung des Spurbabstandes zueinander führen zu einer optisch besseren Darstellung der Säspuren, insbesondere bzgl. der beabsichtigten Parallelität der Ablagen mehrerer Spuren in Querrichtung. Die Umformung (vgl. Abb. 6-2) zeigt die 5 Säspuren somit bezogen auf die Hochachse.

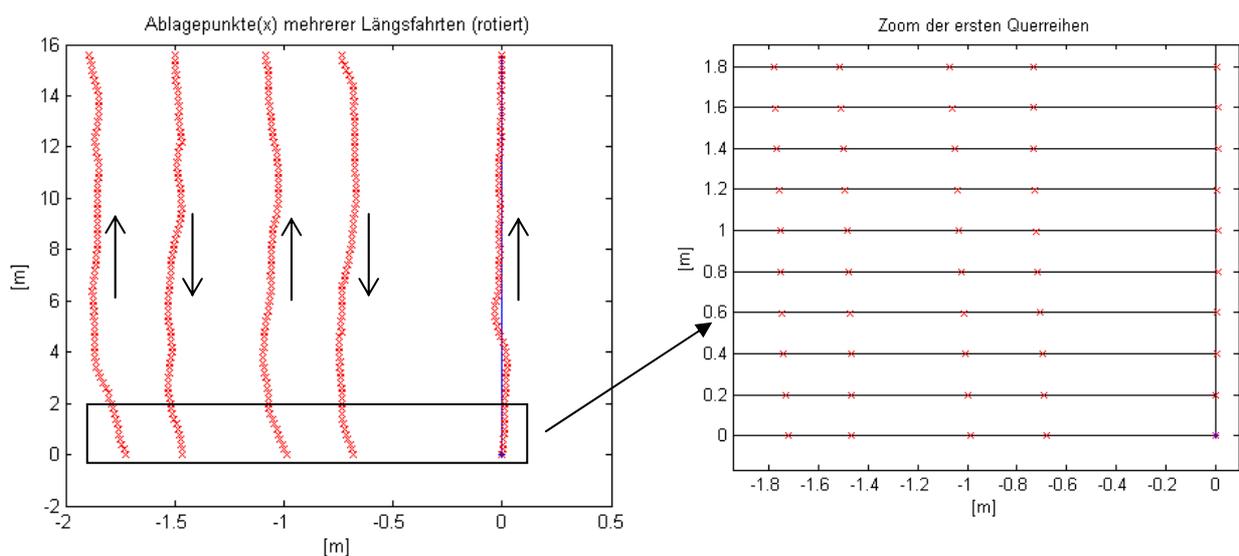


Abb. 6-2: Darstellung der Säspuren mehrerer Längsfahrten zur Bildung eines Rechteckverbandes

Die Fahrtrichtungen der Spuren und der Startpunkt der virtuellen Ablagen sind symbolisch durch Pfeile und Beschriftungen gekennzeichnet. Außerdem sind für einen markierten Ausschnitt Hilfslinien in

die Graphik eingezeichnet worden. Diese sind rechtwinklig zur dargestellten Orientierung der Basislängsfahrt und im Abstand des während dieser Versuchsfahrt verkürzten Säabstandes von 0,2 m eingefügt worden.

Abbildung (6-2) lässt graphisch betrachtet parallele gleichabständige Anschlussfahrten vermuten, sodass mit diesem vereinfachten Wendeverfahren bei den Versuchsfahrten neben den Längsreihen auch Querreihen entstanden sind. Die eingefügten Hilfsgeraden visualisieren diese Vermutung. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Geradlinigkeit der Längsfahrten über die Fahrlänge von ca. 15 m Abweichungen bis in den Dezimeterbereich aufweist. Diese Abweichungen sind einerseits durch die Anlenkung des Versuchsträgers und andererseits durch den fehlenden optischen Bezug (z.B. durch einen Anreißer) während der Längsfahrten auf dem befestigten Untergrund entstanden. Aufgrund des Streckenbezuges der Aussaat in Längsrichtung (1D-Problematik) führen unbeabsichtigte Abweichungen von einer Geradenfahrt zu einem systematischen Fehler in Form einer ansteigenden Weglängenverkürzung, bezogen auf die Geraden des Parallelverbandes. Dieser Fehlereinfluss wirkt sich direkt auf die Qualität der Querreihen aus und muss zukünftig durch entsprechende Maßnahmen ausgeschlossen werden. In den ersten vereinfachten Versuchen zur Wende ist dieser jedoch enthalten.

Die vorhandenen Abweichungen der Querreihen zum Sollabstand von 0,2 m können durch die koordinatenmäßige Differenz der Hochkomponente zu den rechtwinkligen Hilfslinien ermittelt werden. Zu erwähnen ist nochmals, dass alle Erkenntnisse im Rahmen dieser Untersuchungen durch die fehlende, unabhängige Einmessung nur auf Koordinatenebene gewonnen werden können. Die Berechnungen eines Genauigkeitsmaßes der Einzelablagen zu Querreihen im Sollabstand stellen somit nur eine interne Prozessgenauigkeit dar. Das Ergebnis vermittelt dennoch einen ersten Eindruck der prinzipiellen Funktionalität des Gesamtkonzepts.

Der Verlauf und die Größenordnung der Abweichungen entlang der mehrreihigen Fahrbewegungen zu den rechtwinkligen Querreihen mit einem Sollabstand von 0,2 m, bezogen auf den Startpunkt, sind der Abbildung (6-3) zu entnehmen.

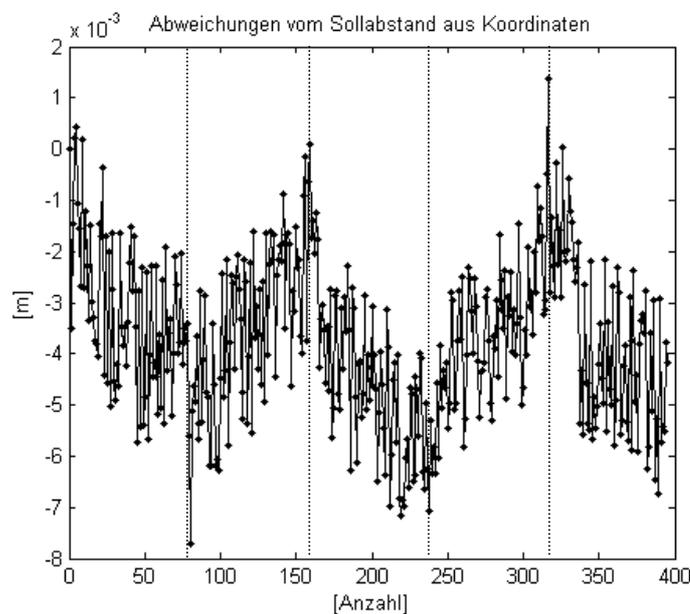


Abb. 6-3: Differenzen der mehrreihigen Ablagepositionen zu den rechtwinkligen Querreihen auf Koordinatenebene

Der Verlauf der einzelnen Abweichungen in der Graphik lässt neben zufälligen Rauschteilen verschiedene systematische Fehlereinflüsse erkennen. Die Systematiken liegen dabei in Form einer wellenförmigen Bewegung des Rauschbandes und einer Verschiebung in den negativen Wertebereich vor. Die 5 Längsfahrten sind durch den wellenförmigen Verlauf der systematischen Abweichungen deutlich abzugrenzen. Die eingefügten Hilfslinien in senkrechter Richtung begrenzen die Wertebereiche

der einzelnen Längsfahrten in der Abbildung (6-3). Die Gesamtbandbreite der Abweichungen beträgt etwa 8 mm, wobei der zufällige Anteil bei etwa 3 mm liegt.

Die systematischen Fehlereinflüsse sind zum größten Teil durch die vorhandenen Unzulänglichkeiten der ersten Versuchsfahrten zur Bildung einer mehrreihigen Aussaat erklärbar. Die geringen Abweichungen der Längsfahrten von einer Geraden führen zwangsläufig zu einer Verkürzung der Gesamtstrecke und der Abstände, bezogen auf die Startposition. Das Resultat zeigt steigende negative Abweichungen zu den beabsichtigten Querreihen eines Rechteckverbandes. Die Anschlussfahrt in Gegenrichtung ist durch die letzte Säposition der Basislängsfahrt begrenzt und beginnt deshalb mit einer ähnlich negativen Abweichung, bezogen auf den Startpunkt der ersten Fahrt. In Abhängigkeit von den Abweichungen der Anschlussfahrt zur Geraden ist überdies ein spiegelbildlicher Verlauf der Abweichungen zu erkennen. Ferner tritt wiederum ein geringfügig zu kurzer Ablageabstand aufgrund der Definition des Ablageintervalls für den Soll-Ist-Vergleich auf (vgl. Kapitel 5.2). Die Berechnung einer Standardabweichung σ aus der Quadratsumme der Abweichungen ist erst nach Abspaltung der Systematiken sinnvoll und wird sich im Bereich weniger Millimeter bewegen. Im Rahmen dieser Vorüberlegungen wurde auf weitere Versuche und Auswertungen verzichtet.

Trotz systematischer Fehlereinflüsse deutet die gute graphische Symmetrie der einzelnen Hin- und Rückfahrten auf eine ausreichende Parallelität der Längsfahrten in Querrichtung hin. Die prinzipielle Funktionalität dieses vereinfachten Ansatzes zur koordinatengesteuerten Aussaat mehrerer Reihen im Rechteckverband ist damit gegeben.

6.3 Resümee der ersten Versuchsfahrten

Die in Kapitel 6.1 vorgestellten ersten Aspekte und Ideen zur Lösung einer mehrreihigen Aussaat im Rechteckverband aufgrund einer vereinfachten Wende, scheinen hinsichtlich der dargestellten Anforderungen für eine ökologische Zuckerrübenproduktion in der heutigen Präzisionslandwirtschaft prinzipiell realisierbar. Es ergeben sich durch die Versuchsfahrten in Kapitel 6.2 folgende Erkenntnisse:

- Die ersten Ergebnisse zur Wende bzw. Aussaat im Rechteckverband sehen vielversprechend aus. Das 2D-Lösungskonzept der koordinatengesteuerten Längsfahrt scheint für einen ersten Nachweis der Funktionalität einer mehrreihigen Aussaat unter Nutzung einer einfachen Wendefahrt ohne Unterbrechungen geeignet. Unabhängige Referenzmessungen zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit stehen noch aus, sodass die Ergebnisse nur einen ersten Eindruck widerspiegeln können.
- Neben den Fahrzeugpositionen entlang der Trajektorie (Längsfahrt + Wende) wird für die mehrreihige Parallelsaart im Rechteckverband eine Steuerung des Starts und des Endes der Ablagepulserzeugung benötigt. Dies ist hier durch eine spezielle Umformung der Bewegungskordinaten auf die Begrenzungslinien des Rechteckverbandes und einen diesbezüglichen Soll-/Ist-Vergleich erfolgt.
- Die Ergebnisse der Versuchsfahrten weisen sowohl systematische als auch zufällige Abweichungsanteile von maximal 7 mm bzgl. der Sollquerreihen auf. Die Gründe für die systematischen Anteile liegen vorwiegend in einer unzureichenden Geradlinigkeit im Rahmen der Längsfahrten. Die Ursache der unzureichenden Geradenfahrt ist sowohl durch die Anlenkung des Versuchsträgers als auch durch eine fehlende Bezugslinie bedingt. Außerdem treten Restsystematiken in Folge des Soll-/Ist-Vergleichs auf. Bei der diskreten Trajektorienerfassung in Kombination mit der maximalen Messwerterfassungsrates wird zur Steuerung des Beginns und des Endes der Längsfahrten an Stelle einer exakten Position ein Intervall gebildet (vgl. Kapitel 5.2). Hierdurch können sich die Ablagepositionen der Längsfahrten geringfügig verschieben. Nach Abzug der Systematiken betragen die zufälligen Abweichungen 2 - 3 mm und spiegeln die innere Genauigkeit des Gesamtkonzepts wider.
- Eine Aussage zur äußeren Genauigkeit kann aufgrund fehlender Referenzmessungen zunächst nur fiktiv in Form einer Übertragung der Erkenntnisse aus Kapitels 5.2 erfol-

gen. Die äußere Genauigkeit des Lösungsansatzes hängt neben maschinellen Fehlereinflüssen von der mittleren Genauigkeit der absoluten Koordinatenbestimmung über die Prozesszeit ab. Die Kombination von relativen und absoluten Messwerten, zusammen mit einer Modellierung der Bewegung in einer KALMAN-Filterung, kann zu einer Verbesserung der Trajektorienkoordinaten untereinander und zu einer Glättung von Koordinatensprüngen der absoluten und relativen Positionen führen. Aufgrund systematischer Fehlereinflüsse der relativen Messsensorik über die Zeit und Abweichungen der realen Bewegung von der Modellierung spielt die absolute Positionsbestimmung und deren maximale Genauigkeit für die Beschreibung der Bewegung bzw. die Saatkornablage im Raum eine wichtige Rolle. Die Verifikation der Längsfahrt hat über die Dauer einer Spur eine äußere Genauigkeit im Bereich von 1 - 2 cm gezeigt, was aufgrund des gleichen Lösungsansatzes zur Koordinatenbestimmung der Wende übertragbar sein sollte.

- Die prinzipielle Funktionalität einer koordinatengesteuerten, mehrreihigen Saatkornablage im Rechteckverband unter Einhaltung der landwirtschaftlichen Anforderungen durch ein geodätisches Gesamtlösungskonzept ist somit gegeben.

Diese Untersuchungen sollen nur einen ersten Eindruck über die Möglichkeiten zur Wendeproblematik, bzw. zur mehrreihigen Aussaat, vermitteln. Optimierte Gesamtlösungsansätze unter Einbezug einer realen Wendefahrt sind im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten zu entwickeln und zu verifizieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Komplexität der koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen, mittels Multi-Sensor-System und Filteransatz, erfordert eine klare Strukturierung in zwei eigenständig zu bearbeitende Teilbereiche: die Längsfahrt und die Wendeproblematik. Der Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit besteht vorrangig in der Lösung einer koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen während der Längsfahrt. In diesem Zusammenhang wird neben einer Darstellung der landwirtschaftlichen und geodätischen Rahmenbedingungen für automatisierte Arbeitsprozesse in der Präzisionslandwirtschaft die Quantifizierung und parametrische Identifikation eines dynamischen Strukturmodells zur Realisierung eines geodätischen Lösungsansatzes zur Bildung einer Führungsgröße für die koordinatengesteuerte Aussaat von Rübenpflanzen in Längsrichtung vorgestellt. Die Grundlage liegt dabei in der Identifikation einer KALMAN-Filterung zur präzisen koordinatenbasierten Beschreibung der Bewegungstrajektorie einer Sämaschine in Echtzeit. Das Ziel ist die Ableitung einer georeferenzierten Führungsgröße zur Steuerung eines bewegten landwirtschaftlichen Arbeitsprozesses in Form eines geodätischen Lösungsansatzes. Die Realisierung der koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen in Längsrichtung kann aufgrund der präzisen 2D-Erfassung der Bewegung gleichzeitig die Basis für die Lösung der Gesamtproblematik sein. Dieser Aspekt führt zur Motivation erster Überlegungen und Versuche zur Wende und damit zur Gesamtproblematik in Form einer Machbarkeitsstudie.

Zu Beginn der Arbeit erfolgte zunächst eine Darstellung der aktuellen Entwicklungen und praxisnahen Automationsprozesse in der Präzisionslandwirtschaft, ergänzt durch die Trends im modernen Zuckerrübenanbau. Vielfältige Forschungsprojekte und Produkte führender landwirtschaftlicher Firmen lassen einen Übergang zur Automation von Produktionsprozessen in der Präzisionslandwirtschaft erkennen. Insbesondere die Unterstützung und Entlastung des Landwirtes im Tagesgeschäft in Form von Informationsmanagementapplikationen und maschinellen Assistenzsystemen können die Wettbewerbsfähigkeit fördern. Sowohl der konventionelle als auch der ökologische Landbau verlangt nach kostengünstigen und ertragreichen Produktionsmethoden. Aus dem einstigen Nischensegment „Ökologischer Landbau“ ist eine Wachstumsbranche mit jährlich zweistelligem Umsatzzuwachs geworden. In diesem Zusammenhang kommt es deshalb vermehrt zu Engpässen in der heimischen Bio-Zuckerproduktion, was die Notwendigkeit und das Potential neuer Produktionsprozesse der Präzisionslandwirtschaft im Rübenanbau widerspiegelt. Eine Betrachtung der Anforderungen und Beschränkungen im modernen Rübenanbau zeigt neben anbauspezifischen Besonderheiten den Bedarf nach einer ausgeprägten Bestandspflege zur Erzielung eines international wettbewerbsfähigen Ertrages bei gleichzeitigen Einschränkungen des Handlungsspielraums aufgrund neuer EU-Richtlinien. Die Bestandspflege bei Rübenpflanzen ist vorrangig durch eine umfassende, chemische oder physikalische Unkrautkontrolle geprägt. Die notwendige Reduktion der Umweltbelastungen und die Resistenz der Unkräuter erfordern zwangsläufig neue Lösungen im Bereich der physikalischen Unkrautkontrolle. Zudem ist in der Präzisionslandwirtschaft der Wandel von einer teilschlagspezifischen zu einer zukünftigen, einzelpflanzenorientierten Bewirtschaftung klar zu erkennen. Die koordinatengesteuerte Einzelpflanzenaussaat im Rechteckverband stellt in diesem Zusammenhang eine neue Basistechnologie für verschiedene pflanzenbezogene Prozesse dar. Eine umfassende ökologische Unkrautkontrolle in Form eines flächendeckenden mechanischen Hackens erfordert die Beseitigung von Unkräutern auch in den Pflanzenzwischenräumen einer Reihe. Durch die neue Basistechnologie kann ein Befahren und Hacken in Querrichtung ermöglicht werden. Neben der Wirtschaftlichkeit und Einfachheit neuer Technologien spielt die Gefahr von Pflanzenverlusten eine wichtige Rolle für die Akzeptanz des Verfahrens. Insbesondere der schutzbedürftige, unmittelbare Pflanzennahbereich muss von einer mechanischen Bearbeitung ausgeschlossen sein, um das Wachstum der Rübenpflanze nicht negativ zu beeinflussen. Gleichzeitig bedarf es für ausreichende Erträge einer Unkrautbeseitigungsrate von über 90%. Dies führt bei der Parallelsaart zu erhöhten Genauigkeitsanforderungen für die einzelnen Pflanzenstandorte auf dem Feld. Erfahrungswerte ergeben eine Genauigkeitsfestlegung von 2 cm für die Pflanzenstandorte. Daraus ergibt sich für die reine Positionsgenauigkeit der kinematischen Bewegung als Führungsgröße der Ablagesteuerung eine höhere Genauigkeitsforderung von $\sigma < 2$ cm. Eine vernachlässigbare Differenz zwischen Saatposition und Pflanzenstandort ist dabei Voraussetzung.

Vor diesem Hintergrund sind die Möglichkeiten und die aktuellen Entwicklungen der kinematischen Geodäsie zu betrachten. Die hohen Genauigkeitsanforderungen der modernen Präzisionslandwirtschaft, im Zusammenhang mit kinematischen Produktionsprozessen, erfordern spezielle Lösungsansätze mit Fachkompetenz. Die aktuellen Entwicklungen in der Geodäsie zeigen, dass der Trend von der Statik hin zur Kinematik bzw. Dynamik von Messaufgaben geht. Neue Messsensoren und Softwarelösungen bieten das Potential, Bewegungen bei langsamen bis mittleren Geschwindigkeiten mit geodätischer Genauigkeit zu erfassen und kombiniert über echtzeitfähige Filterlösungen, unter Beachtung der Stochastik auszuwerten. Hierdurch zeigt sich unmittelbar die Schnittstelle zu anderen Fachdisziplinen mit koordinatengeführten Steuerungsaufgaben. Verschiedene Praxisbeispiele belegen sowohl die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten geodätischer Einzelsensorlösungen als auch die Verknüpfung von präzisen Sensoren zu Multi-Sensor-Systemen, wie u.a. GPS-basierte Multi-Sensor-Lösungen oder Robottachymeter zur Steuerung im Bauwesen. Neben dem Potential geodätischer Lösungen sind auch klare Schwächen vorhanden. Diese zeigen sich insbesondere in der Echtzeitfähigkeit, den geringen Messtakraten und einer unzureichenden oder fehlenden Synchronisation einzelner Sensoren. Diese Tatsache führt zu systematischen Fehlereinflüssen, welche bei höheren Geschwindigkeiten oder größerer Dynamik einen signifikanten Einfluss auf das Resultat haben können. Moderne Produktionsprozesse in der Präzisionslandwirtschaft erfordern aufgrund der Ansprüche neue Lösungskonzepte mit einer präzisen echtzeitfähigen Positionserfassung für den mittleren Geschwindigkeitsbereich. Eine Übertragung geodätischer Lösungskonzepte zur Positionsbestimmung bzw. Georeferenzierung landwirtschaftlicher Aufgaben scheint sinnvoll und realisierbar. Beispiele in Form von Fahrassistenten unter der Nutzung geodätischer Messsensoren sind bereits praxiserprobt.

Der zentrale Teil der Arbeit beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Lösungskonzepts zur koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen in Längsrichtung und der anschließenden Verifikation des Filteransatzes durch empirische Untersuchungen. Voraussetzung dafür ist die Konzeption eines geeigneten Multi-Sensor-Systems, die Quantifizierung des Ansatzes und die Ableitung einer Identifikation für die Bewegung einer Sämaschine während der Längsfahrt durch eine KALMAN-Filterung. Als Sensorsystem kommt eine Kombination aus relativen und absoluten Sensoren zum Einsatz, deren Messdaten synchron erfasst und in Echtzeit weiterverarbeitet werden. Neben einem optischen Wegsensor und einem Drehratensensor ist ein geodätisches RTK-GPS-System integriert. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten und der Kernpunkte einer fehlerfreien echtzeitfähigen Verknüpfung lässt die Komplexität und Schwierigkeit der Konzeption eines Gesamtsystems zur Lösung der koordinatengesteuerten Aussaat erkennen. Für die Quantifizierung des Modellansatzes ist in der vorliegenden Arbeit ein experimenteller Ansatz gewählt worden. Die messtechnische Aufnahme einer Referenzsäfahrt repräsentiert das Bewegungsverhalten der Maschine und ermöglicht eine zweckoptimierte Modellierung als Grundlage der Systemgleichungen einer KALMAN-Filterung. Eine Überführung der nicht-parametrischen Darstellung in eine parametrische zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung ist insbesondere bei kleinen Polynomgraden einfach, da das Bewegungsverhalten physikalisch leicht nachvollziehbar ist. Die Umsetzung des Nutzungskonzeptes durch die Aufzeichnung und funktionale Glättung einer Längsfahrt mittels RTK-GPS lassen erkennen, dass die Modellierung und Überführung einer Längsbewegung bei Landmaschinen, aufbauend auf der funktionalen Glättung von repräsentativen Messwerten, möglich ist. Dies führt im vorliegenden Fall zur Approximation durch eine Gerade und damit zum Beschleunigungsansatz. Ein zweckmäßig funktionales Modell der Systemgleichungen ist somit durch eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung gegeben. Die experimentelle Ermittlung des Modellansatzes ermöglicht gleichzeitig eine erste Abschätzung des zu erwartenden Systemrauschens von $0,01 \text{ m/s}^2$.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Umsetzung des Mess- und Auswertansatzes liegt in der Wahl eines geeigneten Koordinatenbezugssystems. Die Verknüpfung der globalen geozentrischen Messwerte mit den relativen, lokalen Messwerten an der Erdoberfläche erfolgt über die Länge der Hauptkrümmungslinien des GRS80-Ellipsoides. Bezogen auf eine mittlere Position des Versuchsfeldes lassen sich die rechtwinkligen Bogenstücke als Koordinatenunterschiede eines lokalen Erdoberflächensystems berechnen. Aufgrund der Kleinräumigkeit kann diese Lösung als hinreichend eben betrachtet werden, sodass die Fehlereinflüsse im Rahmen der Genauigkeitsanforderungen von 1 cm vernachlässigbar sind. Eine Überführung der Messdaten in ein zweckoptimiertes Bezugssystem - wie z.B. in ein Katasterkoordinatensystem - ist zur reinen Verifikation des Gesamtsystems nicht notwendig und

kann später erfolgen. Die unterschiedliche Echtzeitfähigkeit der einzelnen Komponenten spielt eine weitere entscheidende Rolle bei der Realisierung des Gesamtkonzepts. Markante Verzögerungszeiten wirken sich unmittelbar als systematische Fehlerquelle aus. Sie zeigen sich insbesondere bei der absoluten Positionierung mittels des geodätischen RTK-GPS-Empfängers. Die mittleren Verzögerungszeiten liegen in einem nicht tolerierbaren Bereich von 50 ms (entsprechend 10 cm bei Geschwindigkeiten von 2 m/s). Eine Doppel-KALMAN-Filterung mit unterschiedlicher Echtzeitanforderung berücksichtigt diese Problematik. Neben einer nicht echtzeitfähigen Hauptfilterung, welche alle Informationen des Gesamtkonzepts unter Beachtung eines Zeitbezugs zur Synchronisation verarbeitet, basiert die zweite KALMAN-Filterung nur auf den echtzeitfähigen relativen Informationen. Die Verknüpfung der beiden Filterungen erfolgt durch die Übergabe der Schätzungsergebnisse einschließlich der Stochastik. Die echtzeitfähige Nebenfilterung dient somit der Extrapolation der verzögerten, driftfreien Hauptfilterung. Die erhöhte Messtaktrate der relativen Sensorik ergibt zusätzlich eine detailliertere Erfassung der Fahrzeugbewegung. Der dabei verwendete Filteransatz beruht auf den Grundlagen einer gleichmäßig beschleunigten 2D-Fahrzeugbewegung, welche von der Universität Stuttgart für den Kfz-Bereich entwickelt wurde. Das Bewegungsmodell dieses kinematischen Ansatzes stützt sich dabei auf die geometrisch und physikalisch motivierten Vorstellungen einer zwischen zwei Abtastzeitpunkten gleichförmigen Bewegung. Dies entspricht den Erkenntnissen aus der experimentellen Modellbildung. Die zusätzlich kausale Modifizierung durch die Einführung einer „geometrischen Stellgröße“ ermöglicht außerdem eine unmittelbare Erfassung von Orientierungsänderungen. Eine Reduktion der Trägheit der Systemgleichungen auf Orientierungsänderungen ist die Folge, was insbesondere zur Lösung der Gesamtprobatik (Längsfahrt + Wende) von Vorteil ist. Eine Anpassung der Filterung an die Problemstellung und die Genauigkeitsanforderungen der Präzisionslandwirtschaft ist notwendig als Grundlage des vorgestellten Softwarekonzeptes.

Die stochastische Modellierung stellt durch den Einfluss der Verstärkungsmatrix auf die Filterung einen weiteren wichtigen Aspekt für eine optimale Gesamtlösung dar. Die Vollständigkeit des gewählten KALMAN-Filteransatzes ist erst hierdurch gegeben. Die Basis einer empirischen Aufstellung der Kovarianzmatrix für die Messgleichungen besteht in einer Kalibrierung des Multi-Sensor-Systems in Bezug auf die Längsfahrten durch Laboruntersuchungen als auch Untersuchungen unter Feldbedingungen. Die Ergebnisse zum relativen Wegsensor Correvit L-400 zeigen aufgrund der integrativ anwachsenden Abweichungen eine signifikante Drift zwischen 0,15% und 0,25% der Streckenlänge in Abhängigkeit vom Untergrund. Die Herstellerangabe von 0,1% wird auf der Feldoberfläche somit leicht überschritten. Eine Korrektur bzw. absolute Stützung dieser Messwerte über die Zeit ist für die Aufgabenstellung notwendig. Nach einer Abspaltung dieser Systematik ergibt sich für Messtakraten von > 1 sek. bei üblichen Sägeschwindigkeiten quasi weißes Rauschen mit einer Standardabweichung von $\sigma = 7$ mm für die Streckenmessung. Dieser Wert kann in Form der Varianz direkt in den Filteransatz einfließen. Die Untersuchungen des eingesetzten RTK-GPS-Systems verdeutlichen, dass bei kinematischen Anwendungen im Bereich der koordinatengesteuerten Aussaat von Zuckerrüben mit einer absoluten Lagegenauigkeit von besser 4 cm gerechnet werden kann. Voraussetzung ist ein ungestörter Satellitenempfang. Die Untersuchungen lassen weiterhin vermuten, dass sich sogar die Genauigkeiten statischer RTK-GPS-Messungen von 1 - 2 cm bei Bewegungsgeschwindigkeiten von 2 m/s übertragen lassen. Die Genauigkeitsbeschränkung des zur Verfügung stehenden Referenzmesssystems erlaubt jedoch keine Bestätigung dieser Vermutung. In Abhängigkeit vom Korrektionsdatendienst bzw. Korrektionsverfahren ist außerdem ein unterschiedlich großes Streuen der einzelnen Messungen einer Initialisierung und bei unterschiedlichen Initialisierungen zu beobachten. Bei hohen Messtakraten ist somit die Nutzung einer lokalen Referenzstation sinnvoll, da der Nutzer einen direkten Einfluss auf die Aktualität der Korrekturdatenübermittlung und somit auf die Qualität der Messung hat.

Die Verifikation des Gesamtkonzepts erfolgt anschließend in mehreren Schritten. Zunächst werden die Richtigkeit und die Umsetzbarkeit des Konzepts anhand von unterschiedlichen Versuchsfahrten überprüft. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Form von Durchführbarkeitsanalysen, Kovarianzmatrizen, Totzeiten sowie einer optimierten Modellierung der Bewegungen in den KALMAN-Filteransatz ein. Das Potential des Lösungsansatzes für die Präzisionslandwirtschaft zeigt sich schon in der Entwicklungsphase in Form eines massiven Genauigkeitsgewinns bei der Erfassung der Trajektorienbewegung in Echtzeit im Gegensatz zu einer reinen GPS-Lösung. Durch die Filterung kann die hohe Trägheit der Maschine zusätzlich integriert werden, was zu einer realeren Erfassung des Bewegungs-

verhaltens der Maschine führt. Weiterhin zeigen diese Versuchsfahrten, dass eine Übertragbarkeit des Filteransatzes aus dem PKW-Bereich auf Problematiken der Präzisionslandwirtschaft möglich ist. Voraussetzung ist eine gezielte Modifikation bzgl. der Genauigkeitsforderungen und der größeren Masse landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Weitere Versuchsfahrten über unterschiedlichen Untergründen zeigen zudem keinen signifikanten Unterschied zwischen einer speziell vorbereiteten Saattbetoberfläche und einer befestigten Straßenoberfläche. Die Verifikation des Gesamtkonzeptes in Form eines unabhängigen Referenzmessverfahrens wurde aus Gründen der Praktikabilität mit Hilfe eines fahrbaren Versuchsträgers auf einer befestigten Wegoberfläche durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine präzise koordinatengesteuerte Aussaat von Zuckerrüben in Längsrichtung, unter Einhaltung der Anforderungen, an eine ökologische Zuckerrübenproduktion anhand eines geodätischen Sensorsystems realisierbar ist. Unter optimalen Bedingungen ermöglicht das vorgestellte Lösungskonzept für eine gleichabständige Aussaat (z.B. 0,3 m Sollabstand) eine relative Genauigkeit der Ablageweiten zueinander von 0,0038 m. Die relative Ablagegenauigkeit liegt somit deutlich unter der Genauigkeitsanforderung von $\sigma < 2$ cm für die reine Positionierung. Die Ablagegenauigkeit, bezogen auf die Gesamttrajektorie (absolute Genauigkeit), fällt mit ca. 2 cm jedoch höher aus. Die Gründe dafür liegen insbesondere in der Messgenauigkeit des absolut messenden RTK-GPS-Sensors von 1 - 2 cm und in der Höhe des modellierten Trägheitsverhaltens der Maschine innerhalb der Filterung. In Abhängigkeit der eingeführten Trägheit ist die Filterung bestrebt sich über die Gesamtbewegungszeit an die Genauigkeit der absoluten Positionsmessung anzunähern. Die Genauigkeit des vorgestellten Lösungskonzeptes, bzw. der KALMAN-Filterung, ist über die Dauer des Prozesses aufgrund des Driftverhaltens der relativen Sensorik zunehmend von der absoluten Messgenauigkeit abhängig. Die maximale Genauigkeit des eingesetzten absoluten Messsensors von 1 - 2 cm ist bzgl. der Genauigkeitsanforderungen für ein langfristig verlustfreies und umfassend mechanisches Hacken von Zuckerrüben noch ausreichend. Eine weitere Optimierung der absoluten Positionierung ist anzustreben.

Insgesamt ist die Verifizierung der Saatkornablage in Längsrichtung bezüglich der Einhaltung einer Genauigkeitsanforderung von 2 cm für die Pflanzen- bzw. Saatkornpositionen, trotz geringer Restsystematiken, erfolgreich verlaufen. Der bekannte KALMAN-Filterungsansatz aus dem Kfz-Bereich konnte durch eine Anpassung an die speziellen Anforderungen der Präzisionslandwirtschaft auf die Rübensaat übertragen werden. Durch die 2D-Auslegung des Lösungskonzeptes und die kausale Modifizierung der Filterung ist sowohl die Grundlage einer direkten Verfügbarkeit der Lagekoordinaten aller Ablagepositionen für weitere Nutzungsprozesse als auch die Grundlage für eine Lösung der Wendeproblematik gegeben. Die Implementierung auf einer nicht echtzeitfähigen Windows-Plattform scheint bei Geschwindigkeiten zwischen 1,5 - 2 m/s und Messtakraten unter 300 Hz mit Einschränkungen möglich. Die Zuverlässigkeit auf einer Windows-Plattform ist jedoch nicht zu 100% gewährleistet.

Vor diesem Hintergrund wurden am Ende der Arbeit erste Überlegungen und Untersuchungen zur Lösungsfähigkeit der Gesamtproblematik (Längsfahrt + Wende) dargestellt. Die Grundlage dafür bilden die Ergebnisse der Längsfahrt. Auf dieser Basis werden erste Aspekte einer vereinfachten Wende im Rahmen einer Gesamtlösung diskutiert und durch Versuchsfahrten gestützt. Die aufgezeigten Ideen und Ergebnisse können aufgrund der Vereinfachungen im Bereich der Wende nur einen ersten Hinweis zur Realisierbarkeit einer koordinatengesteuerten Aussaat im Rechteckverband unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen geben. Neben den Fahrzeugpositionen entlang der Trajektorie (Längsfahrt + Wende) wird für eine mehrreihige Parallelsaar im Rechteckverband eine Automation des Saatbeginns und des Endes pro Spur benötigt. Dies kann durch eine spezielle Umformung der Bewegungskordinaten auf die Begrenzungslinien des Rechteckverbandes und einen diesbezüglichen Soll-/Ist-Vergleich erfolgen. Die Ergebnisse der ersten Versuchsfahrten, basierend auf den Ablagekoordinaten der Längsfahrten, zeigen sowohl systematische als auch zufällige Abweichungen bis maximal 7 mm bzgl. des Sollabstandes in den rechtwinkligen Querreihen. Nach Abzug der systematischen Anteile ergibt sich ein Rauschband von 2 - 3 mm. Aufgrund fehlender Referenzmessungen spiegeln diese Ergebnisse nur die innere Genauigkeit wider. Eine Aussage zur äußeren Genauigkeit kann deshalb nur fiktiv - in Form einer Übertragung der Erkenntnisse zur Längsfahrt - erfolgen. Die Verifikation der Längsfahrt hat eine Abhängigkeit der äußeren Genauigkeit von der Qualität der absoluten Messung im Bereich von 1 - 2 cm gezeigt. Aufgrund des identischen Lösungsansatzes für die Positionsbestimmung während der Wende sollten die erzielten Genauigkeiten übertragbar sein. Die prinzipielle

Funktionalität einer koordinatengesteuerten, mehrreihigen Saatkornablage im Rechteckverband, unter Einhaltung der landwirtschaftlichen Anforderungen durch ein geodätisches Gesamtlösungskonzept, ist somit gegeben.

Zukünftig ist die Übertragung des aufgezeigten Lösungsansatzes auf eine echtzeitfähige Computerplattform anzustreben. Hierdurch wird für den praktischen Feldeinsatz eine höhere Prozesssicherheit erreicht und höhere Mess- und Rechentaktraten sind realisierbar. Sondersituationen während des Feldeinsatzes und verschiedene Szenarien der Fahrtunterbrechungen müssen gezielt gelöst werden, um die Praxisreife des Verfahrens zu fördern. Die aufgezeigten ersten Aspekte zur vereinfachten Wendeproblematik sind im Rahmen weiterer Forschungen in Form von realer Wendeverfahren zu erweitern und anschließend durch einen spezifischen Lösungsansatz zu konkretisieren. Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich bereits mit der realen Wendethematik und deren Realisierung. Durch die erhöhte Dynamik bei einer realen Wende ist u.a. eine Ergänzung des Sensorsystems um weitere Messgrößen durch Versuchsfahrten zu prüfen. Die Entwicklung einer gesteuerten Einzelkornablagemechanik, zur Verarbeitung der Führungsgröße des geodätischen Multi-Sensor-Systems und KALMAN-Filterung, muss durch das Institut für Landtechnik der Universität Bonn verwirklicht werden, um reale Säfahrten unter Nutzung des vorgestellten Lösungskonzeptes zu ermöglichen. Anschließend bedarf das Gesamtsystem in Kombination mit der gesteuerten Einzelkornsaatmechanik einer Gesamtverifikation unter Feldbedingungen. Hierbei ist ein alternatives Referenzmesssystem zwecks fundierterer Aussage zur äußeren Genauigkeit des Systems in der Feldpraxis zu entwickeln. Die Möglichkeiten aktueller Lasertracker für synchronisierte Echtzeitmessungen sind in diesem Zusammenhang zu sondieren.

Literaturverzeichnis

- ALKHATIB, H./NEUMANN, I./HEUNER, H./KUTTERER, H. (2008): *Comparision of Sequential Monte Carlo Filtering with Kalman Filtering for Nonlinear State Estimation*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.273-284
- AUERNHAMMER, H. (1999): *Precision farming for site-specific Fertilisation*. In: Zeitschrift für Agrar-informatik (GIL), 7. Jahrgang, S.58-66
- AUERNHAMMER, H. (2004): *Informationstechnik Präziser Ackerbau*. In: Matthies, H.J./Meier, F. (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik, Band 16, Münster, S.31-38
- AUSSEMS, T. (1999): *Positionsschätzung von Landfahrzeugen mittels KALMAN-Filterung aus Satelliten und Koppelnavigationsbeobachtungen*. Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 55, Aachen
- BAKKER, T./VAN ASSELT, C.J./BONTSEMA, J./MÜLLER, J./VAN STRATEN, G. (2006): *Autonomous Navigation with a Weeding Robot*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.51-58
- BAUER, M. (2003): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. 5.Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- BAYER, G. (2004): *Geometrische Führung von Baumaschinen*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.215-232
- BAYLFU (2009): Unter: <http://www.lfu.bayer.de>, Stand: 11.2009
- BEEZ, A./SCHWIEGER, V. (2008): *Universal Developer Platform for Machine Control Applications*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.263-272
- BILL, R./KORDUAN, P./KOF AHL, M. (2005): *Entwicklung von internetbasierter Informationsplattform und Datendokumentationssystem für das Verbundprojekt (TP 22)*. Unter: <http://www.preagro.de>, preagro-Zwischenbericht 2005, internetbasierte Informationsplattform premis
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT – JAHRESBERICHT (2003): Unter: <http://www.jki.bund.de>, Stand: 11.2009
- BLACKMORE, S./STOUT, B./WANG, M./RUNOV, B. (2005): *Robotic Agriculture – The Future Of Agricultural Mechanisation?*. Paper of 5th European Conference on Precision Agriculture Uppsala, Sweden, 9-12th June 2005
- BÖSE-FISCHER, C. (2007): *Biozucker ist gefragt – aber es gibt zu wenig*. In: Hannoversche Allgemeine Zeitung, 30.08.2007
- BÖSE-FISCHER, C. (2009): *Biozucker ist in Europa Mangelware*. In: Schaumburger Nachrichten, 14.02.2009, <http://www.sn-online.de/Nachrichten/Wirtschaft/Niedersachsen/Biozucker-ist-in-Europa-Mangelware>, Stand: 11.2009
- BORCHERS, S./HEER, R. (2002): *Bauwerksüberwachung mit GOKA (GPS-basiertes Online Kontroll- und Alarmsystem) an der Schleuse Uelzen I*. In: GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen, Beiträge des 57. DVW-Seminars am 16. und 17. September 2002, Karlsruhe, S.65-84
- BRANDHUBER, R. (2006): *Bodenbelastung durch Landmaschinen – Wirkungsmechanismen und Risikobeurteilung*. In: Ackerbau vor neuen Herausforderungen. Hrsg.: Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Schriftenreihe 21 2006. ISSN 1611-4159
- BRINKSCHULTE, B./UNGERER, T. (2002): *Mikrocontroller und Mikroprozessoren*. Springer-Verlag, Berlin
- BRONSTEIN, I. N./SEMENDJAJEW, K.A. (1987): *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Thun & Frankfurt/Main

- BÜRCKY, K./LANG, C. (2000): *Anbauhinweise 2000*. In: Zuckerrüben-Magazin, Beilage zur dzz - Die Zuckerrüben Zeitung, Nr. 27, Februar 2000
- BULOWSKI, T. (2002): *GPS-Anwendungen bei RWE Rheinbraun AG im Tagebau Grazweiler (GPS-Bagger)*. In: GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen, Beiträge des 57. DVW-Seminars am 16. und 17. September 2002, Karlsruhe, S.85-93
- BURGHHAUS, S./BELL, R./KUHLMANN, H. (2009): *Improvement of a Terrestrial Network for Movement Analysis of a Complex Landslide*. FIG Working Week 2009, Surveyors Key Role in Accelerated Development, 3-8 May, Eilat, Israel
- CAVALIERI, A./JANSSEN, S./SMITHSON, A./BUISMAN, T. (2001): *Economic Viability of Weeding Strategies in Organically Grown Sugar Beets*. Socrates theme 'Ecological Agriculture I' at The Royal Veterinary and Agricultural University, Frederiksberg C, Denmark, 28 May
- CLARKE-HACKSTON, N./BELZ, J./HENNEKER, A. (2008): *Guidance for Partial Face Excavation Machines*. In: Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.31-38
- CZAJA, J./NEUHIERL, TH./STEMPFHUBER, W. (2001): *Hybrides Meßsystem zur kinematischen Positionierung von Schiffen*. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Ausgabe: 11-12/2001, S.374 ff.
- CZOMMER, R. (2001): *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 535, München
- DELINGAT, E. (1976): *Berührunglose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung*. In: Leitz Mitteilungen für Wissenschaft und Technik, Band VI, Nr. 7, S.249-257, Wetzlar
- DEMMELE, M./HAHNENKAMM, O./PETERREINS, M. (2002): *Höhere Erträge durch bessere Standraumverteilung*. In: MAIS, Heft: 1/2002, S.4-7
- DEUTSCHER BUNDESTAG - 16. WAHLPERIODE (2006): *Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung - Precision Agriculture*. In: Drucksache 16/3218, 01.11.2006
- DICKE, D. (2005): *Lenkung teilschlagspezifischer Unkrautkontrollverfahren unter Berücksichtigung der Populationsdynamik von Unkräutern mit computergestützten Modellen*. Dissertation, Institut für Pflanzenbau der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau
- DIETZEL, H., DIEMANN, R., JACOBS, R. U. OTTO, R. (2000): *Schlaggröße und Schlagform in Ackerbaugebieten der neuen Bundesländer*. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 41, Heft 2, S.68-73
- EHRL, M. (2007): *Steer-by-Wire via ISOBUS*. In: Landtechnik, Sonderheft 2007, S.286-287
- EICHHORN, A./KUHLMANN, H./BETTERMANN, R./CZOMMER, R. (2001): *Entwurf eines Kalman-Filters zur kartenunabhängigen Fahrzeugortung*. Abschlussbericht im Auftrag der DaimlerChrysler AG, Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, unveröffentlicht
- EICHHORN, A./MÖHLENBRINK, W. (2001): *Identification of Physical Parameters by Means of Differential Equations in the Adaptive Dynamic Filter Model*. In: Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, S.326-335
- EICHHORN, A. (2005): *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung*. Dissertation, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Institut für Anwendung der Geodäsie im Bauwesen
- ELING, D./KUTTERER, H. (2007): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung am Beispiel einer Talsperre*. In: Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.119-130
- ENGEL, T. (2008): *Precision Farming aus dem Hause John Deere in Nordamerika und Europa – Was macht die Unterschiede?*. Preagro Forschungsverbundprojekt, Vorträge und Präsentationen der Abschlusskonferenz, Sektion 2, 21. Februar 2008. Unter: <http://www.preagro.de/kalkscheune.php>, Stand: 11.2009

- EBER, C./MÜLLER, T. (2007): *Exoten auf dem Rübenacker*. In: Zuckerrübe, 56. Jahrgang, Heft 3/2007, S.138-139
- EULER, H.-J./LANDAU, H. (1992): *Fast GPS ambiguity resolution on-the-fly for real-time application*. Proceedings of Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, 17-20 March, pp. 650-659.
- EU-REGULATION 2092/91: Unter: <http://eur-lex.europa.eu/>, Stand: 11.2010
- EU-VERORDNUNG 178/2002 (ARTIKEL 18): Unter: <http://eur-lex.europa.eu/>, Stand: 11.2010
- FIRMA AGRI CON (2010): Unter: <http://www.agricon.de>, Stand: 11.2010
- FIRMA BOSCH (2010): Unter: <http://bosch.de>, Stand: 11.2010
- FIRMA CORRSYS-DATRON (2010): Unter: <http://www.corrsys-datron.com>. Stand: 11.2010
- FIRMA GPS NETWORKING INCORPORATED (2010): Unter: <http://www.gpsnetworking.com>. Stand: 11.2010
- FIRMA LEICA-GEOSYSTEMS (2010): Unter: <http://www.leica-geosystems.com>, Stand: 11.2010
- FIRMA NATIONAL INSTRUMENTS (2010): Unter: <http://www.ni.com>, Stand: 11.2010
- FIRMA TRIMBLE (2010): <http://www.trimble.com/agriculture> bzw. <http://www.trimble.com/survey>, Stand: 11.2010
- FIRMA TRINKEL (2010): *HackBlitz*. Unter: <http://www.gemuesetechnik.de>, Hacktechnik/HackBlitz, Stand: 11.2010
- FIRMA WAGNER PFLANZEN-TECHNIK GMBH (2010): Unter: <http://www.w-p-t.biz>, /Pflanzmaschinen/IPS-Drive, Stand: 11.2010
- FIRMA WAHLTER SPRITZ- UND LACKIERSYSTEME GMBH (2010): Unter: <http://walther-pilot.de>, Stand: 11.2010
- FÖLLINGER, O./FRANKE, D. (1982): *Einführung in die Zustandsbeschreibung dynamischer Systeme*. R. Oldenbourg Verlag, München Wien
- FÖRSTER, C. (2009): *Ein Beitrag zur Untersuchung von Fehlereinflüssen bei RTK-GPS-Messungen im Bereich bewegter Landwirtschaftlicher Multisensorsysteme*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät, Institut für Geodäsie und Geoinformation
- FOPPE, K./SCHWIEGER, V./STAIGER, R. (2004): *Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechniken*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.3-18
- FUHLBRÜGGE, H.-J. (2004): *Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen*. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, ISSN 0723-4325
- GANDORFER, M./MEYER-AURICH, A./HEIBENHUBER, A. (2006): *Wirtschaftlichkeit von Precision-Farming*. In: Rheinische Bauernzeitung Nr.25
- GARBURG, W. (2004): *Spätverunkrautung in Zuckerrüben beachten*. In: Zuckerrübe, 53. Jahrgang, Heft 3/2004, S.112-115
- GEHRING, K. (2006): *Unkrautmanagement im Rübenbau - Allgemein*. Unter: <http://www.lfl.bayern.de>, Pflanzenschutz/Unkrautbekämpfung/Rüben/Allgemeine Informationen, März 2006
- GELB, A./KASPER, J.F./NASH, R.A./PRICE, C.F./SUTHERLAND, A.A. (1974): *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press, Cambridge London
- GERHARDS, R./SÖKEFELD, M./TIMMERMANN, C./KROHMANN, P./KÜHBAUCH, W. (2000): *Precision Weed Control – more than just saving herbicides*. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Special Issue XVII, S.179-186
- GERHARDS, R./SÖKEFELD, M./NABOUT, A./THERBURG, R.D./KROHMANN, P./TIMMERMANN, C./KÜHBAUCH, W. (2002A): *Online weed control using digital image analysis*. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Special Issue XVIII, S.421-427

- GERHARDS, R./SÖKEFELD, M./TIMMERMANN, C./KÜHBAUCH, W./WILLIAMS, M.M. (2002B): *Site-specific weed control in maize, sugar beet, winter wheat, winter barley*. In: Precision Agriculture, Heft: 3/2002, S.25-35
- GERHARDS, R. (2005): *Weniger Herbizide dank GPS, Geo-Informationssystemen und digitaler Bildanalysetechnik*. 17. FAL-Tagung Januar 2005, Agroscope FAL Reckenholz (Sig.2005-005)
- GLÄSER, A./SCHOLLMAYER, R. (2004): *Messwerterfassung und –synchronisation in Multisensorsystemen*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.35-60
- GLAUS, R./PEELS, G./MUELLER, U./GEIGER, A. (2004): *Precise Rail Track Surveying*. In: GPS World, Mai 2004
- GLAUS, R./MUELLER, U./AMSLER, M. (2005): *The Swiss Trolley - A Modular System for Track Surveying*. Trimble Dimensions 05, Las Vegas, USA. 23.-25. Oktober 2005
- GOBOR, Z. (2007): *Development of a novel mechatronic system for mechanical weed control of the intra-row area in row crops based on detection of single plants and adequate controlling of the hoeing tool in real-time*. Dissertation, Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- GOBOR, Z./SCHULZE LAMMERS, P. (2007): *Prototype of a rotary hoe for intra-row weeding*. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, France
- GRÄFE, G. (2007): *Präzise kinematische Vermessung von Tunnel- und Brückenbauwerken sowie Fahrbahnoberflächen*. In: Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.395-406
- GRÄFE, G./HEISTER, H. (2004): *Kinematische Erfassung des Straßenraums mit Hilfe von Laserscannern*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.245-264
- GRIEPENTROG, H.W./NOERREMARK, M. (2001): *Bestandsführung mittels kartierter Pflanzenpositionen*. In: Proceedings VDI Conference on Agricultural Engineering Hanover, S.285-290
- GRIEPENTROG, H.W./NOERREMARK, M./NIELSEN, H./BLACKMORE, S. (2003): *Individual plant care in cropping systems*. In: Proceedings 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany, S.247-251
- GRIEPENTROG, H.W./SKOU, P.T./SORIANO, J.F./BLACKMORE, B.S. (2005): *Design of a Seeder to achieve highly Uniform Sowing Patterns*. In: Proceedings 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, S.675-682
- GRIEPENTROG, H.W./NOERREMARK, N./NIELSEN, J./IBARRA, J.S. (2006): *Autonomous Inter-row Hoeing using GPS Based Side-shift Control*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.117-124
- GRIEPENTROG, H.W./GULHOLM-HANSEN, T./NIELSEN, J. (2007): *First Field Results from Intra-row Rotor Weeding*. In: Proceedings 7th EWRS Workshop: Physical and Cultural Weed Control, Salem (Mecklenburg-Western Pomerania), Germany, 11-14 March
- GRIEPENTROG, H.W. (2008): *Tendenzen der Robotics in der Pflanzenproduktion*. Vortrag zur Preagro 2008, Berlin
- GUOCHANG XU, (2003): *GPS – Theory, Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- HÄBLER, J./WACHSMUTH, H. (1990): *Formelsammlung für den Vermessungsberuf*. Wilhelm Bing Verlag, 4. Auflage, Korbach
- HAMBERGER, J./CZAJA, J. (2001): *Navigation und Einmessung mit DGPS im Wald*. In: AFZ/Der Wald, Heft Nr. 25, S.1327-1330
- HEEGE, H.W./BILLOT, J.F. (1999): *Seeders and planters*. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume III, Plant Production Engineering (ASAE, St. Joseph, USA), S.217-240

- HEISTER, H./CASPARY, W./HOCK, C./KLEMM, J./STERNBERG, H. (1995): *KISS – a Hybrid Measuring System for Kinematic Surveying*. In: Linkwitz, K., Hangleiter, U. (Eds.) *High Precision Navigation 95*, Proceedings, Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, S.561-568,
- HEISTER, H./GRÄFE, G. (2004): *Projekterfahrungen beim Einsatz der kinematischen Messsysteme KiSS® und MoSES*. In: *Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<*, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.95-112
- HEISTER, H./LIEBL, W./PINK, S./RIESEN, H.-U. (2007): *Racer – ein automatisiertes, kinematisches System zur Gleisvermessung*. *Ingenieurvermessung 07*, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.55-68
- HEITZ, S. (1988): *Coordinates in Geodesy*. Springer Verlag, Berlin
- HEKKERT, G./LENGE, R. (2007): *Wenn der Automat am Lenkrad dreht*. In: *topagrar*, Heft 2/2007, S.100-105
- HEUNECKE, O. (1995): *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter)*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, Hannover
- HOFMANN-WELLENHOF, B./LICHTENEGGER, H./COLLINS, J. (2001): *GPS – Theory and Practice*. Fifth revised edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- HOPFIELD, H.S. (1971): *Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data*. In *Radio Science*, Heft 6(3), S.357-367
- ISERMANN, R. (1974): *Prozeßidentifikation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- ISERMANN, R. (1988): *Identifikation dynamischer Systeme*. Band 1/2, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- JUNG, R. (2008): *3D Asphalt Paving of Special Profiles for Comfort Tests at the Example of a New HGV-Test Track*. In: *Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance*, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.211-222
- KAHMEN, H. (2006): *Angewandte Geodäsie – Vermessungskunde*. Gruyter Lehrbuch, Walter de Gruyter Verlag, Berlin New York
- KALMAN, R. (1960): *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. In: *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, S.35-45, New York
- KALMAN, R./BUCY, R.S. (1961): *A New Results in Linear Filtering and Prediction Theory*. In: *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 83, S.95-108, New York
- KASTEN, P. (2005): *Sorten, Aussaat, Ernte bei Zuckerrüben*. Unter: <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/zuckerrueben/sortenwahl-pdf.pdf>, Stand: 11.2009
- KAUFMANN, K./ANDEREGG, R. (2008): *GPS-based Compaction Technology*. In: *Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance*, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.287-297
- KAYA, R./BUZLUK, S. (2006): *Integrated Weed Control in Sugar Beet through Combinations of Tractor Hoeing and Reduced Dosages of a Herbicide Mixture*. In: *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, Volume 30, Issue 2, S.137-144
- KELLAR, W./ROBERTS, P./ZELZER, O. (2008): *A Self Calibrating Attitude Determination System for Precision Farming using Multiple Low-Cost Complementary Sensors*. In: *Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance*, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.161-169
- KIRSCHNER, H./STEMPFHUBER, W. (2008): *The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations – A State of the Art Report on the Leica TPS1200+*. In: *Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance*, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.51-60
- KNICKMEYER, E.T./KNICKMEYER, E.H./NITSCHKE, M. (1996): *Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalman-Filter*. Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen, Bd. 22, Stuttgart, S.141-166

- KÖNIG, H.-P./KOCH, H.-J. (2005): *Strategien der Unkrautregulierung in Zuckerrüben – Ergebnisse aus Anbauvergleichen*. In: Heß & Rahmann (hrsg.): Ende der Nische, 8. Wissenschaftstagung ökologischer Landbau, Universität Kassel, S.55-56
- KORDUAN P./GRENZDÖRFFER G./BILL R. (2000): *Informationsmanagementsystem und Informationsbeschaffung in der modernen Landwirtschaft*. Proceedings der 2. Wismarer Wirtschaftsinformatiktag, 15./16. Juni 2000
- KORDUAN, P. (2001): *Informationsmanagement als Application Service für das Precision Farming*. In: Gesellschaft für Informatik in der Landwirtschaft (Hrsg.): Referate der 22. GIL-Jahrestagung, Rostock, S.66-70.
- KRAMER, E./SCHWARZ, J. (2004): *Anforderungen zukünftiger Einsatzszenarien an autonome Feldroboter*. In: Landtechnik, 59. Jahrgang, Heft 5/2004, S.258-259
- KUHLMANN, H./PELZER, H. (1997): *Models of Deformation Analysis*. In: Altan, M.O./Gründig, L. (Eds.): Second Turkish German Joint Geodetic Days, Berlin
- KUHLMANN, H. (1999): *Sensorik zielverfolgender Tachymeter*. In: Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46. Jahrgang, Heft 2, Stuttgart
- KUHLMANN, H., EICHORN, A. (2003): *Positionsbestimmung von PKW mit Sensoren der Serienausstattung*. POSNAV 2003, Beiträge des DGON-Symposium Positionierung und Navigation 2003 in Dresden, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, Bonn
- KUHLMANN, H. (2004A): *Mathematische Modellbildung zu kinematischen Prozessen*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.19-34
- KUHLMANN, H. (2004B): *Bestimmung von Bewegung – eine geodätische Sicht*. In: Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 5, Luchterhand Verlag
- KUHLMANN, H. (2004C): *Mathematische Modellbildung zu kinematischen Prozessen*. In: Schriftenreihe DVW, Band 45 „Kinematische Messmethoden ‚Vermessung in Bewegung‘“, Wißner Verlag, Augsburg
- KUHLMANN, H., HEISTER, H. (2006): *Steering problems and solutions during constructions of roads*. Proceeding of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 12th FIG Symposium on Deformation Measurement, CD-Rom
- KUHLMANN, H./SIEMES, M. (2007): *Nutzung eines Multi-Sensor-Systems mit KLAMAN-Filterung für die Bestimmung von Längsbewegungen einer Landmaschine in der Präzisionslandwirtschaft*. In: Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.369-382
- KUHLMANN, H./SIEMES, M./SCHÖLDERLE, F (2008): *Multi Sensor System Requirements for a Position Steered Seed Deposition in Sugar Beet Cultivation for the Generation of a Rectangular Formation*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.129-140
- KUSCHE, J. (1994): *Ein Modell für die hochgenaue Navigation autonomer flächenbeweglicher Fahrzeuge*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 410, München
- KUTZBACH H.-D./STOLL, A. (2004): *Autonome Fahrzeuge – Mit Satellitennavigation präzise fahren*. In: Landinfo, Heft 3/04, Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, Landwirtschaftlicher Hochschultag, S.16-24
- LENGE, R. (2007): *Die erste unbemannte Schlepperfahrt*. In: top agrar, Heft 2/2007, S.106-107
- LOSER, R. (2004): *Kinematische Messmethoden im industriellen Nahbereich*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.233-244
- LÜTTIKEN, R. (1996): *Realisierung des Raum-Zeit-Bezugs von Daten zur Umsetzung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau*. Dissertation an der Universität Hohenheim PLITS 14(4):178

- MAIDL, F.-X./SCHÄCHTL, J./HUBER, G. (2000): *Ergebnisse von Streifenversuchen zur Untersuchung unterschiedlicher N-Düngungsstrategien im Precision Farming*. In: Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswissenschaft 13, S.123-126
- MATTIVI, N. (2008): *Trimble offers the Connected Construction Site Connecting Office, People and Machines: The Way to Increase Productivity on Earthmoving and Road Construction Sites*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.181-188
- MAY, M. (2001): *Sugar Beet - Crop Protection in sugar beet*. In: Pesticide Outlook - 2001, Volume 12, Issue 5, S.188-191
- MAYERHOFER, B./PRESSL, B./WIESER, M./HOFMANN-WELLENHOF, B. (2007): *Sensorfusion in einem Navigationssystem für Blinde*. In: Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.395-406
- MERKES, R. (2003): *Produktionstechnik 2002 – Umweltschonung und Leistungssteigerung*. In: Zuckerrübe, 52. Jahrgang, Heft 6/2003, S.274-281
- METTENLEITER, M./OBERTREIBER, N./HÄRTL, F./EHM, M./BAUR, J./FRÖHLICH, C. (2008): *3D Laser Scanner as Part of Kinematic Measurement Systems*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.61-70
- MILEV, I. (2008): *Schienenvermessung und Lichtraumberechnungen aus Laserscannerdaten mit Si-RailScan*. VDV-Schriftenreihe, Band 26
- MÖHLENBRINK, W./KUHLMANN, H./DÜNISCH, M. (2004): *Prozessintegrierte kinematische Absteckung am Beispiel „Feste Fahrbahn“*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.265-282
- NAGASAKA, Y./KITAGAWA, H./MIZUSHIMA, A./NOGUCHI, N./KANETANI, Y./UMEDA, N./KOKURYU, T. (2006): *Full Automated Rice Transplanting Operation Using GPS Guided Rice Transplanter with long Mat Type Hydroponic Rice Seedlings*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.133-138
- NEUNER, H./HEER, R./HESSE, C. (2004): *Kombination verschiedener geodätischer Sensoren zur Überwachung von Kaimauern*. In: Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.185-214
- NOACK, P.O. (2007): *Standards für den elektronischen Datenaustausch in der Landwirtschaft*. In: Landtechnik, Sonderheft 2007, S.283- 285
- NOERREMARK, M./GRIEPENTROG, W. (2004A): *Physical Methods to Control Weeds within the Crop Rows*. In: Proceedings of AgEng2004, Engineering the Future, Leuven, S 7
- NOERREMARK, M./GRIEPENTROG, H.W. (2004B): *Analysis and definition of close-to-crop area in relation to robotic weeding*. 6th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control, 8-10 March, Lillehammer, Norway
- NOERREMARK, M./SORENSEN, C.G./JORGENSEN, R.N. (2006): *HortiBot: Comparison of present and future phytotechnologies for weed control – part III*. ASABE Annual International Meeting, 9-12 July, Portland , Oregon, paper number 067023
- NORDZUCKER (2010): Unter: <http://www.nordzucker.de>, Stand: 11.2010.
- OEBEL, H./GERHARDS, R. (2006): *Kameragesteuerte Unkrautbekämpfung – eine Verfahrenstechnik für die Praxis*. In: Journal of Plant Diseases and Protection Special Issue XX, S.181-187
- OEKOLANDBAU (2008): *Pflanzenbau - Zuckerrüben*. Unter: <http://www.oekolandbau.nrw.de/umstellung/pflanzenbau/zuckerrueben/index.html>
- OSTERMEIER, R./ROGGE, H.I./AUERNHAMMER, H. (2006): *Multisensor Data Fusion Implementation for a Sensor based Fertilizer Application System*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.215-226
- PARISH, S (1990): *A Review of Non-Chemical Weed Control Techniques*. In: Biological Agriculture and Horticulture, Volume 7, S.117-137

- PELZER, H. (1971): *Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen*. Dissertation, DGK, Reihe C, Heft 164, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1971
- PELZER, H. (1977): *Ein Modell zur messtechnischen und mathematischen Erfassung kontinuierlicher Deformationsvorgänge*. In: XV. International Congress of Surveyors, Commission 6, Stockholm, 607.1
- PELZER, H. (1985): *Statische, kinematische und dynamische Punktfelder*. In: Pelzer, H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Kontaktstudium 1985, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart
- PELZER, H. (HRSG.) (1988): *Ingenieurvermessung: Deformationsmessungen, Massenberechnung*. Ergebnisse des Arbeitskreises 6 des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) e.V., Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart
- PELZER, H. (1993): *Kinematische und dynamische Fragestellungen der Ingenieurgeodäsie*. Vermessungswesen und Raumordnung, 55. Jg., Heft 8, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn
- PROPLANTA (2007): *Intelligente Pflanzenschutzspritze erreicht Praxisreife*. Unter: <http://www.proplanta.de>, Pressemitteilung vom 22.Mai.2007
- RAMM, K./SCHWIEGER, V. (2004): *Multisensorortung für Kraftfahrzeuge*. In: *Kinematische Messmethoden >>Vermessung in Bewegung<<*, Beiträge zum 58.DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004, Stuttgart, S.75-94
- RATHMANN, S. (2006): *Latest Trends in Automotive Electronic Systems – Highway meets Off-Highway?*. In: *Automation Technology for Off-Road Equipment*, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.337-344
- REICHARDT, M. (2007): *Was halten die Landwirte vom präzisen Landbau?*. In: *Landtechnik*, 62. Jahrgang, Heft 1/2007, S.28-29
- REKOW, A. (2001): *System Identification, Adaptive Control and Formation Driving of Farm Tractors*. Dissertation of the Department of Aeronautics and Astronautics and the Committee on Graduate Studies of Stanford University, March 2001
- RESKE-NIELSEN, A./MEJNERTSEN, A./ANDERSEN, N./RAVN, O./NOERREMARK, M./GRIEPENTROG, H.W. (2006): *Multilayer controller for outdoor vehicle*. In: *Automation Technology for Off-Road Equipment*, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.41-50
- RIEMENSCHNEIDER, A. (2008): *Das 3D-multisensor-System auf der Basis des Messsystems, Gleis Surver in der Gleis- und Bauvermessung*. VDV-Schriftenreihe, Band 26
- RIETHMULLER, G.P./HASHEM, A./PATHAN, S.M. (2007): *Weed control in wide lupines in Western Australia*. In: *Proceedings 7th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control*, S.54-57
- RÖMER, H.P. (2001): *Einzelpflanzenorientierte Prozessführung im Freilandgemüsebau*. Dissertation, Lehrstuhl für Landtechnik der Technischen Universität München
- ROTHMUND, M (2002): *Die Gewannenbewirtschaftung als virtuelle Flurbereinigung*. In: *B&B Agrar*, 55. Jahrgang, Heft 7/8, S.236
- ROTHMUND, M. (2006): *Near Infrared Spectroscopy for Measurement on Forage Swathes – First Test Bed Experiments*. In: *Automation Technology for Off-Road Equipment*, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.267-272
- ROTHMUND, M./STEINBERGER, G./AUERNHAMMER, H. (2007): *Zweidimensionale mechanische Unkrautbekämpfung im Maisanbau durch Einzelkornsaat im spurübergreifenden quadratischen Verband*. In: *Proceedings 15th Seminar of Work Science (VDI-MEG-Working Group Work Science in Agriculture)*, Wien, S.138-144
- ROTHMUND, M./STEINBERGER, G./AUERNHAMMER, H. (2008): *Das Kreuzhackverfahren – Zweidimensionale mechanische Unkrautbekämpfung im Maisanbau durch Einzelkornsaat im spurübergreifenden quadratischen Verband*. Unter: http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H931/AKAL-Seminar/Praesentationen/AKAL-Wien-Rothmund.pdf, Stand:04.2008

- ROVIRA-MÁS, F./HAN, S./WIE, J./REID, J.F. (2006): *Edge Detection for Autonomous Guidance of a Corn Harvester Using Stereo Vision*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.171-182
- RUCKELSHAUSEN, A./KIELHORN, A./LINZ, A./TRAUTZ, D. (2004): *Innovative Methoden in der nicht-chemischen Unkrautbekämpfung*. In: Wissenschaftliches Kolloquium Vielfalt-Ideen-Fortschritt/Weed Science on the GO, Universität Hohenheim, S.67-77.
- RUCKELSHAUSEN, A./KLOSE, R./LINZ, A./MARQUERING, J./THIEL, M./TÖLKE, S. (2006): *Autonome Roboter zur Unkrautbekämpfung*. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XX, S.173-180, ISSN 1861-4051
- SCHÄFER, M./THOMSEN, S. (2007): *Baufortschrittsdokumentation mit terrestrischem 3D-Laserscanning im Rahmen des Projektes future: workspace – die Arbeitswelt von morgen*. In: Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich, S.109-118
- SCHMITTMANN, O./SCHULZE LAMMERS, P. (2004): *Mechanische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen - Technische Möglichkeiten zur Steigerung ihrer Wirksamkeit*. In: Landtechnik, 59. Jahrgang, Heft 2/2004, S.90-91
- SCHMITZ, S. (2001): *Aktueller Stand der Einzelkornsätechnik*. In: Zuckerrübe, 50. Jahrgang, Heft 1/2001, S.22-27
- SCHREIBER, F./RAUSCH, P./DIEGELMANN, M. (2008): *Use of a Machine Control & Guidance System, Determination of Excavator Performance, Cost Calculation and Protection Against Damaging of Pipes and Cables*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.21-30
- SCHRICK, K. W. (1977): *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik*. Oldenbourg Verlag, München
- SCHULZE LAMMERS, P./KAM, H./SCHMITTMANN, O. (2010): *Technical approach for row crop seeding in square to improve mechanical weed control efficiency*. Accepted paper for XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), Québec City, Canada, 13-17 June
- SCHWENKE, T./AUERNHAMMER, H. (2001): *GPS-Stützung mit Mikrowellensensoren in der Landwirtschaft*. In: VDI-MEG Tagung Landtechnik 2000, Münster, VDI-Verlag, Germany, S.301-306
- SCHWIEGER, V./HEMMERT, J. (2008): *Integration of a Multiple-Antenna GNSS System and Supplementary Sensors*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.103-112
- SONTHEIMER, A. (2008): *Zuckerrübensorten für die Anforderungen des Marktes - Der lange Weg der Entstehung einer Zuckerrübensorte*. Unter: <http://www.strube-dieckmann.de>, Stand: 2008
- STAFFORD, J.V./MILLER, P.C.H. (1993): *Spatially selective application of herbicide to cereal crops*. In: Computers and Electronics in Agriculture 9, S.217-229
- STEFFEN, R./FÖRSTNER, W. (2008): *On Visual Real Time Mapping for Unmanned Aerial Vehicles*. In: 21th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). Beijing, China 2008, S.57-62 Part B3a.
- STEINBERGER, S. (2007): *Fahrgassen im Zuckerrübenanbau*. Unter: <http://www.suedzucker.de>, Beratung/Anbautechnik, 09.11.2007
- STEINMAYR, T./AUERNHAMMER, H./MAURER, W./DEMMELE, M./STEMPFHUBER, W./SCHENKE, T./RÖMER, H.P. (2000): *First evaluation of the applicability of infrared-tracking-systemes for examining the accuracy of DGPS in field works*. In: Proceedings 28. International Symposium on Agricultural Engineering. Opatija-Kroatien, S.53-61
- STEMPFHUBER, W./MAURER, W. (2001): *Leistungsmerkmale von zielverfolgenden Tachymetern bei dynamischen Applikationen*. In: DVW-Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, S.189-205
- STEMPFHUBER, W. (2002): *Kalibrierung GPS gestützter Positionsbestimmung im Precision Farming*. In: GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen, Beiträge des 57. DVW-Seminars am 16. und 17. September 2002, Karlsruhe, S.94-106

- STEMPFHUBER, W. (2004): *Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen*. Dissertation der TU München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
- SÜDZUCKER (2010): Unter: <http://www.bisz.suedzucker.de>, Stand: 11.2010.
- TORGE, W. (2003): *Geodäsie*. Gruyter Lehrbuch, Walter de Gruyter Verlag, Berlin New York
- VAN HENTEN, E.J./MÜLLER, J. (2007): *An International Design Contest in Agricultural Engineering*. In: VDI-Berichte, Nr.2001, S.169-174
- WEIS, M./GUTJAHR, C./RUEDA AYALA, V./GERHARDS, R./RITTER, C./SCHÖLDERLE, F. (2008): *Precision farming for weed management: techniques*. Gesunde Pflanzen, Band 60, S.171-181, Springer
- WELSCH, W. M. (1981): *Gegenwärtiger Stand der geodätischen Analyse und Interpretation geometrischer Deformationen*. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 2, Wichmann Verlag,
- WELSCH, W. M./HEUNECKE, O./KUHLMANN, H. (2000): *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. In: Moser, M./Müller, G./Schlemmer, H./Werner, H. (Hrsg.): Handbuch Ingenieur-geodäsie, Wichmann Verlag, Heidelberg
- WELSCH, W. M./HEUNECKE, O. (2001): *Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations*. In: Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Commission 6, Orange, S.390-412
- WELT ONLINE (2007): *EU will Gift aus der Landwirtschaft verbannen*. Unter: http://www.welt.de/welt_print/article1179659/EU_will_Gift_aus_der_Landwirtschaft_verban_nen.htm, Stand: 11.2010
- WIESEHOFF, M./KÖLLER, K. (2004): *Genauigkeit der wegabhängig dosierten Saatmenge*. In: Landtechnik, 59. Jahrgang, Heft 3/2004, S.142-143
- WIESER, A. (2007): *GPS based velocity estimation – and its application to an odometer*. Engineering Geodesy – TU Graz, Shaker Verlag, Aachen
- WITTE, B./SCHMIDT, H. (2006): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Wichmann Verlag, Heidelberg
- WOLLENWEBER, D. (2007): *Zukunftsstrategien für den Rübenanbau – im Frühjahr kostensparend arbeiten – Optimale Intensität bringt höchsten Gewinn*. In: Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 2/2007, S.29-37
- YOUNSE, P.J./BURKS, T.F. (2006): *Greenhouse Robot Navigation Using KLT Feature Tracking For Visual Odometry*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.71-90
- ZEBHAUSER, B. (2000): *Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode*. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr.523, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 2000
- ZEITZEW, M.A. (2006): *Autonomous Utility Mower*. In: Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, S.247-256
- ZIMMERMAN, D. (2004): *Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen*. In: Proceedings of the 14th International Course on Engineering Surveying, Hrsg.: Ingensand, ETH Zurich
- ZÖBEL, D./ALBRECHT, W. (1995): *Echtzeitsysteme – Grundlagen und Techniken*. Informatik Lehrbuch-Reihe, International Thomson Publishing
- ZOGG, H.-M./GRIMM, D. (2008): *Kinematic Surface Analysis by Terrestrial Laser Scanning*. In: Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance, June 24-26, ETH Zurich, Schweiz, S.307-314

In der Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn sind erschienen:

- Heft 29
2012 Matthias Siemes
Ein Beitrag zur koordinatengesteuerten Aussaat von Rübenpflanzen mittels Multi-Sensor-System und Filteransatz
- Heft 28
2012 Jörg Schmittwilken
Attributierte Grammatiken zur Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden
- Heft 27
2012 Markus Rembold
Die Anerkennung und Feststellung von Grundstücksgrenzen
Ein Beitrag zur Entwicklung des Liegenschaftskatasters im Lande Nordrhein-Westfalen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
- Heft 26
2012 Lihua Li
Separability of deformations and measurement noises of GPS time series with modified Kalman filter for landslide monitoring in real-time
- Heft 25
2012 Benedikt Frielinghaus
Ökonomisches Entscheidungstool zur Wohnbaulandentwicklung
Wirtschaftlichkeitsanalysen potenzieller Wohnbauflächen auf der Ebene des Flächennutzungsplanes
- Heft 24
2011 Enrico Kurtenbach
Entwicklung eines Kalman-Filters zur Bestimmung kurzzeitiger Variationen des Erdschwerefeldes aus Daten der Satellitenmission GRACE
- Heft 23
2011 Sarah Böckmann
Robust determination of station positions and Earth orientation parameters by VLBI intra-technique combination
- Heft 22
2011 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy
Proceedings
- Heft 21
2011 Philipp Zeimetz
Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor
- Heft 20
2011 Alessandra Roy
Effects on the Geodetic-VLBI Observables Due to Polarization Leakage in the Receivers
- Heft 19
2011 Dietmar Weigt
Auswirkungen von Flughäfen insbesondere von Fluglärm auf den Immobilienmarkt am Beispiel des Marktsegments „individuelles Wohnen“
- Heft 18
2011 Anno Löcher
Möglichkeiten der Nutzung kinematischer Satellitenbahnen zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde
- Heft 17
2010 Basem Elsaka
Simulated Satellite Formation Flights for Detecting the Temporal Variations of the Earth's Gravity Field
- Heft 16
2010 2nd International Conference on Machine Control & Guidance
Proceedings
- Heft 15
2009 Alexandra Weitkamp
Brachflächenrevitalisierung im Rahmen der Flächenkreislaufwirtschaft
- Heft 14
2008 Akbar Shabanloui
A New Approach for a Kinematic-Dynamic Determination of Low Satellite Orbits Based on GNSS Observations

- Heft 13
2008 Frank Friesecke
Stadtumbau im Konsens!?
Zur Leistungsfähigkeit und Fortentwicklung des städtebaulichen Instrumentariums
unter Schrumpfungsbedingungen
- Heft 12
2008 Heinz Rütz
Zur Kostenanalyse der privaten Umlegung
als Teil der konsensualen integrierten Baulandentwicklung
- Heft 11
2008 Gaby Alexandra Boele-Keimer
Kommunales Kennzahlenmanagement
am Beispiel von Vermessungs- und Katasterämtern in Nordrhein-Westfalen
- Heft 10
2008 Annette Eicker
Gravity Field Refinement by Radial Basis Functions
- Heft 9
2008 Torsten Mayer-Gürr
Gravitationsfeldbestimmung aus der Analyse kurzer Bahnbögen
- Heft 8
2008 Boris Kargoll
On the Theory and Application of Model Misspecification Tests
- Heft 7
2008 Hamza Alkhatib
On Monte Carlo Methods
- Heft 6
2008 Klaus Borchard
Annäherungen an Städtebau und Raumentwicklung
- Heft 5
2008 Jens Jähnke
Zur Teilmarktbildung beim Landerwerb der öffentlichen Hand
- Heft 4
2008 Atef Abd-Elhakee Makhloof
The Use of Topographic Isostatic Mass Information
- Heft 3
2008 Markus Vennebusch
Singular Value Decomposition and Cluster Analysis
- Heft 2
2007 Christian Beder
Grouping Uncertain Oriented Projective Geometric Entities
- Heft 1
2007 Klaus Börger
Geodäsie und Quantenphysik

Vertrieb: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Geodäsie und Geoinformation
- Bibliothek -
Nußallee 17
53115 Bonn

Tel.: +49 (0)228 73-3566

Fax: +49 (0)228 73-2988

Internet: <http://www.igg.uni-bonn.de>

