

Auto Trac - Überprüfung der Fahrgenauigkeit und Funktionabilität eines automatisch geführten Fahrzeuges

1. Problemstellung und Ziele

In der Landwirtschaft werden Produktionssysteme benötigt, die die Kosten senken, die Produktionssicherheit erhöhen und negative Umweltauswirkungen minimieren. Dabei wird die Anzahl der in der Landwirtschaft Tätigen in den entwickelten Ländern weiter zurückgehen. Derzeit regiert die Industrie darauf mit schnelleren Traktoren und mit breiteren Arbeitsgeräten.

Eines der bedeutendsten Probleme der modernen Landbewirtschaftung weltweit ist die Verdichtung der Böden. Neben den Bodeneigenschaften Feuchte und Bodenart sind hierfür die Maschinengewichte, die Antriebstechnik und die Anzahl der Überfahrten weitere Schlüsselgrößen. Es ist evident, dass sich seit Jahrzehnten ein Kreislauf aus: stärkere Verdichtung – höherer Kraftbedarf – schwerere Maschinen – stärkere Verdichtung aufgebaut hat, der zu einer immer stärkeren Bodenverdichtung führt. Nur in Ansätzen ist es durch die Verwendung von Breitreifen und Verfahren der reduzierenden Bodenbearbeitung gelungen, diesen Teufelskreis zu durchbrechen. Ein Entkommen ist offensichtlich nur dadurch möglich, dass in allen Produktionsschritten auf dem Acker und Grünland wesentlich leichtere Maschinen eingesetzt werden.

Bei den zunehmenden Arbeitsbreiten nehmen auch die Überlappungen überproportional zu. Im Mittel betragen sie ca. 8% der Arbeitsbreite. Besonders gravierend können sie bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln auf unbestellten Äckern (z.B. Ausbringen eines Totalherbizids auf den bearbeiteten, wiederbegrünten Stoppelacker) und bei sehr breiten, angehängten Bodenbearbeitungsgeräten sein, die im Osten verbreitet eingesetzt werden. Hier ist die Orientierung auf einem Schlag ohne Pflanzenreihen oder Spuren so schlecht und der Sichtwinkel so ungünstig, dass in der Praxis verbreitet Überlappungen von 1,4m bei Bodenbearbeitungsgeräten von 10m auftreten. Überlappungen werden von Fahrern viel eher in Kauf genommen als Auslassungen, da diese sehr viel sichtbarer sind.

Durch kleinere und agilere Fahrzeuge und durch die Reduzierung der Arbeitsbreiten könnten auch die Wendezeiten proportional deutlich vermindert werden können (Palmer 1984).

Heute wird ein Traktor oder selbstfahrendes Arbeitsgerät von einer Bedienperson gesteuert. Das überwiegend parallele Fahren ist monoton und ermüdend, was dadurch verstärkt wurde, dass der Fahrer aus ergonomischen Gründen durch moderne Kabinen und durch Sensortechniken zunehmend von der ihn umgebenden Umwelt isoliert wurde. Dies erfordert beträchtlichen finanziellen Aufwand und erhöht das Traktorengewicht. Zudem sitzt die Kabine in der Mitte des Traktors, wo eigentlich besser der Motor platziert wäre. Trotz aller ergonomischer Bemühungen ist das Fahren eines Traktors insbesondere über einen rauen Acker eine gesundheitsgefährdende Tätigkeit und ist für über 50% aller Unfälle in der amerikanischen Landwirtschaft verantwortlich (Kelsey, 1992). Gerade die Stabilität von Traktoren würde verbessert, wenn auf die Kabinen an ihrem hohen, exponierten Platz

verzichtet werden könnte. Viele Unfälle passieren aber auch dadurch, dass die Landwirte ihren Traktor wie ein autonomes Fahrzeug behandeln: häufig wird beim Pflügen zum Einstellen des Pfluges der fahrende Traktor verlassen oder wird bei der Saat die Arbeitsqualität der Kreiselegge im fahrenden Zustand überprüft.

Daher ist es nicht verwunderlich, dass schon vor über 80 Jahren der Traum einer automatischen Fahrzeugführung entstand (Reid und Niebuhr, 2001) und die Vision eines Roboters, der die Feldarbeit erledigt und immer wiederkehrende Tätigkeiten effizienter, präziser, billiger und verlässlicher als der Mensch durchführt, aufkam. Neben einzelnen autonomen Fahrzeugen ist dabei auch an Flotten kleinerer Fahrzeuge mit oder ohne ein bemanntes Führungsfahrzeug zu denken.

Ein Führungssystem für ein Fahrzeug hat dabei grundsätzlich folgende Aufgaben zu lösen:

- Stellt die aktuelle Position fest
- Vergleicht sie mit der gewünschten Position
- Ergreift geeignete Steuerungsmaßnahmen.

Bisher hat diese Aufgaben der Mensch als Fahrzeugführer übernommen, künftig könnten diese von elektronischen Systemen übernommen werden. Dabei sind durch die Entwicklung hin zur Teilschlagbewirtschaftung von Schlägen, die ja Ortungs- und Informationssysteme auf dem Traktor und eine informationstechnische Koppelung Traktor-Gerät benötigt, schon wesentliche Bausteine für ein autonom betriebenes Fahrzeug gegeben. Automatische Führungssysteme werden zu einem integralen Teil der Teilschlagbewirtschaftung (Stombaugh et al., 1998). Da diese Systeme im Freien unter stark variierenden Boden- und Witterungsbedingungen arbeiten, müssen sie sehr robust sein.

Im Folgenden soll überprüft werden, ob ein von der Firma GEO TEC, Hallbergmoos, Deutschland, entwickeltes System der autonomen Fahrzeugführung die geforderte Genauigkeit und Stabilität des Fahrbetriebes erbringt und ob dieses System für Anwendungen in der Landwirtschaft geeignet ist.

2. Hypothesen

Hypothese 1: das System Agro Nav bringt unter günstigen Bedingungen eine Fahrgenauigkeit von ± 10 cm (mittlere Abweichung). Einzelne Werte weichen wesentlich weiter ab.

Hypothese 2: die Fahrgenauigkeit nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit exponentiell ab.

Hypothese 3: das System ist nicht geeignet, um mit einer Kombination Traktor-Gerät autonom übliche Feldarbeiten mit einer Genauigkeit durchzuführen, die den Ansprüchen der guten fachlichen Praxis genügen.

3. Material und Methoden

3.1 Stand der Technik

Die einfachste Weise, einen Traktor ohne Eingriff des Fahrers zu führen, ist entlang von Furchen. Dies wird beim konventionellen Pflügen genutzt und der Landwirt weitgehend von Lenkarbeiten entlastet. Julian (1971) entwickelte daraus ein Lenksystem für Traktoren.

Vielfach wurde versucht, Fahrzeuge entlang bereits existierender Kulturpflanzenreihen zu führen (Reid, 1987; Marchant, 1997; Billingsley, 1997, Han et al. 2002). Allerdings weisen diese optischen Führungssysteme im Feldeinsatz aufgrund des Schattenwurfs, verschiedener Bodenfarben und Bodentypen und infolge von Störungen durch Unkraut erhebliche Probleme auf. Dickson et al. (2001) konnten aber nach Han et al. (2002) ein System mit einer Fahrgenauigkeit von 2cm entwickeln.

Toda et al. (1999) setzten ein Sonar-System (Ultraschall) ein, um einen kleinen Roboter durch 2 Wochen alten Mais fahren zu lassen. Die Genauigkeit beträgt 3,4cm. Sogaard (1998) ortet den Traktor mittels eines gepulsten Lasers, dessen Licht von (15) Reflektoren, die am Feldrand aufgestellt sind, zurückgeworfen wird. Die Genauigkeit reicht aber für eine Navigation in Reihenkulturen nicht aus (Sogaard, 1998, S. 8).

In den 70er Jahren wurde versucht, die Fahrwege durch Kabel, in denen Strom mit geringer Spannung und Stromstärke fließt, zu definieren und an ihnen entlang Maschinen zu führen (Reid und Niebuhr, 2001). Aufgrund des hohen Aufwands ist dieses in der Industrie verbreitete Verfahren allenfalls in gantry-Systemen denkbar.

Die Fa. KUBOTA Co., Japan, hat ein System entwickelt, bei dem ein Fahrzeug mit Hilfe eines magnetischen Feldes geführt wird. Dazu müssen entlang der Außenseiten des zu bearbeitenden Schlages (die in Japan sehr klein sind) Kabel eingebracht werden. Die Genauigkeit wird mit 5cm bei 10Hz oder besser angegeben (Matsuo et al. 1998), auf einem Reisfeld von 100m*50m wurde eine Abweichung von der Geradefahrt von 6,1cm erreicht (Matsuo et al. 1998). Allerdings sind die Aufwendungen sehr hoch, so dass diese Technologie für landwirtschaftliche Anwendungen kaum mehr verfolgt wird.

Vielfach wurden zur Positionsbestimmung der Fahrzeuge konventionelle geodätische Verfahren eingesetzt. Mit den modernen Tachymeter-Systemen, die mit einem Trackingmodus ausgestattet werden können, ist eine automatische Zielverfolgung möglich. Tachymeter –Systeme messen den diagonalen Abstand, den Horizontal- und Vertikalwinkel zwischen einer Basisstation und einer mobilen Station (Prisma auf dem Fahrzeug). Die Genauigkeitsanforderungen sind mit $\pm(10\text{mm}+5\text{ppm})$ (Schwenke 2001) grundsätzlich erfüllt (Matsuo et al. 1998), allerdings beträgt die Reichweite max. 700m, freie Sicht vorausgesetzt. In engen Kurven geht das Signal jedoch manchmal verloren (Matsuo et al. 1998). Gute Ergebnisse erzielten Matsuo et al. (2002), wo auf einem ebenen 286m*66m großem Feld mit einer Abweichung von der Geraden von 4,7cm gesät wurde. Die Ortungsgenauigkeit hängt grundsätzlich von der Anordnung des Tachymeters zum Fahrzeug ab: je größer die relative Veränderung des Horizontalwinkels bei der Bewegung im Raum, desto höher wird die Genauigkeit sein. Schwenke (2001) wies darauf hin, dass das von ihm als Referenzsystem

verwendete Geodimeter System 4000 fehlerbehaftete Koordinaten liefert, da die Messdaten der eigenständigen Subsysteme für Winkel- und Distanzmessungen nicht optimal synchronisiert sind. Aufgrund der begrenzten Reichweite und des hohen Aufwands an teurer Technik wird diese Technologie wohl keinen Einsatz in der praktischen europäischen Landwirtschaft, sondern eher als Referenzsystem in Wissenschaft und Forschung finden.

Seit Anfang der 90er Jahre wurde die Möglichkeit diskutiert, ein GPS als Führungssystem zu verwenden (Demmel 2001). Larsen et al. haben 1994 die Möglichkeiten aufgezeigt, die sich durch den Einsatz von GPS ergeben, die erreichbare Genauigkeit definiert und auf die Notwendigkeit, eher die Position des Arbeitsgerätes als die des Traktors relativ zu einem vorherbestimmten Punkt zu kontrollieren (Larsen et al 1994, S. 88) hingewiesen. Sie haben ein Modell zur Führung des Traktors mit angebautem Gerät entwickelt. Stombaugh et al. (1998), Will et al. (1988), Noguchi et al. (1998), Matsuo et al. (1998), Bell (2000), Yukumoto et al. (2000), Noguchi et al. (2002) und in Deutschland Stoll (1999, 2000), Kutzbach und Stoll (2000) und die Fa. GeoTec (Bittner und Freimann, 2000) haben Fahrzeuge mit dGPS ausgerüstet und ihr Fahrverhalten getestet.

Während konventionelles GPS zu ungenau ist, bieten kinematisches und differentielles GPS (RTK dGPS) eine absolute Positionierung mit einer Genauigkeit von $\pm 3\text{cm}$ mit einer ausreichenden update-Rate. O'Connor et al. (1996) nennt eine Genauigkeit von 1,5 bis 2,5cm bei 0,33m/s Fahrgeschwindigkeit, Nieminen et al. (1996) eine Genauigkeit von 2cm, Noguchi et al. (2002) 2cm. Die absolute Zuverlässigkeit ist allerdings gering, da im Schatten von Gebäuden und unter Bäumen die Ortung ausfällt und auch sonst kurzfristige GPS-Ausfälle zu kompensieren sind. Darüberhinaus ist aus dem GPS alleine die Fahrtrichtung nicht immer sicher anzugeben.

Diese GPS-Systeme können mit traktorinternen Systemen (z.B. Inertialsystemen) mit einer sehr hohen update-Rate und exzellenter Genauigkeit über kurze Strecken gekoppelt werden (Koppelortungssysteme). Die Inertialsysteme sind nur für einen relativ kurzen Zeitraum von einigen Minuten stabil, können in dieser Zeit aber die Schwächen des GPS optimal kompensieren. Yukumoto et al. (1995), Noguchi et al. (1998) und Mizushima et al. (2002) verwendeten ein GDS (geomagnetic direction sensor), das aber durch magnetische Felder, die von der Fahrzeugkarosserie, von Magnetventilen oder dem Bordrechner ausgehen, gestört wird. Robuster in dieser Hinsicht sind faseroptische Kreisel (FOG), wie sie Noguchi et al. (2002), Nagasaka et al. (2002) oder die Firma GEO TEC (Bittner und Freimann, 2000) einsetzen.

Zur Integration der Messwerte verschiedener Messsysteme wird verbreitet ein Kalman-Filter eingesetzt, der je nach Qualität und Verlässlichkeit der Messwerte die Sensoren gewichtet. (z.B. Noguchi et al., 1998; Bittner und Freimann, 2000).

Das hier getestete Koppelsystem aus RTK GPS und FOG der Firma GEO TEC wurde bereits von Freimann (2000) auf Genauigkeit untersucht. Dabei wurde das Gesamtsystem AGRO NAV, integriert in ein landwirtschaftliches Fahrzeug, zugrunde gelegt. Als Entwicklungsziel hatte die Firma GEO TEC eine Fahrgenauigkeit von besser $\pm 10\text{cm}$ angestrebt. Auf der vermessenen Bahn wurden Pylonen installiert und der Abstand von den

Pylonen beim „Überfahren“ mit einem Laserabstundsmesser dokumentiert. Die tatsächlich gemessenen Werte ergaben dabei eine absolute Genauigkeit, die immer besser als +/- 10cm war. Die Wiederholgenauigkeit lag dabei sogar immer besser als +/- 5cm (Freimann 2000).

Tests über Genauigkeit der Schlepperführung bzw. der Geräteführung an Seitenhängen fehlen weitgehend. In Japan wurde die Entwicklung von autonomen Systemen für den Einsatz in Reisfeldern, die ja absolut eben sind, vorangetrieben, und auch die Arbeiten in Finnland wurden auf ebenen Versuchsfeldern durchgeführt. Hilton und Chestney (1973) testeten ihr System, das einen onland-pflügenden Traktor entlang von Pflugfurchen führt, an einem Hang mit 12,5% Neigung und fanden keinen Einfluss auf die Positionsfehler. Testergebnisse von autonomen Fahrzeugen an einem Seitenhang sind nicht bekannt.

3.2 Spezifikation des autonomen Traktors

Die Versuche wurden mit einem Traktor MF4255 (70kW) durchgeführt. Dieser verfügt über ein Powershuttle-Getriebe (24/24), EHR, hydrostatische Lenkung und Druckluft-Bremsanlage. Der Traktor wurde wie folgt umgerüstet:

- Einbau eines Lenkwinkel-Sensors
- Einbau eines proportionalen Lenkventils (Bucher)
- Einbau eines Gas-Aktuators (Tauchmagnet) mit Relais
- Einbau des Bucher-Hydraulik-Systems (Joystick, Hydraulik-Block, Bucher-ESX)
- Einbau des Bremszylinders (Betriebsbremse)
- Einbau einer Federspeicher-Bremsanlage (Federspeicher, Stromstoßrelais)
- Einbau eines zusätzlichen Geschwindigkeits-Sensors mit hoher Auflösung und Vor-/Rück-Erkennung
- Anbau des AGRO NAV Behälters, der Sensorik-Halterung für GPS, IMU, Puffereinheit, für ESX und Prioplatine
- Anbringen von GPS- und Funk-Antenne
- Einbau des Terminal-Halters und der Bedienelemente im rechten Holm (NOT- Aus, Schlüsselschalter, Taster)
- Verlegung der Kabelbäume aus dem vorderen Bereich (Lenkwinkel-Sensor, Gas-Aktuator), von der vorderen Konsole (Fahrhebel, Handbremse und Öldruck, ..) von den Bedienelementen (12V Schlüsselschalter, Taster, Lampen, ..), von der Seitenkonsole (Hubwerk, EHR-Fehler, Allrad, Differentialsperre, ..) und vom Terminal (2*CAN-Bus mit twisted pair Kabel und separatem CAN-GBD, 12V Puffereinheit, CAN-Enable, GND, Datenleitungen für GPS und IMU) zum AGRO NAV-Behälter, der hinter dem Fahrersitz eingebaut wurde.
- Verlegen der Antennenkabel zum AGRO NAV-Behälter.

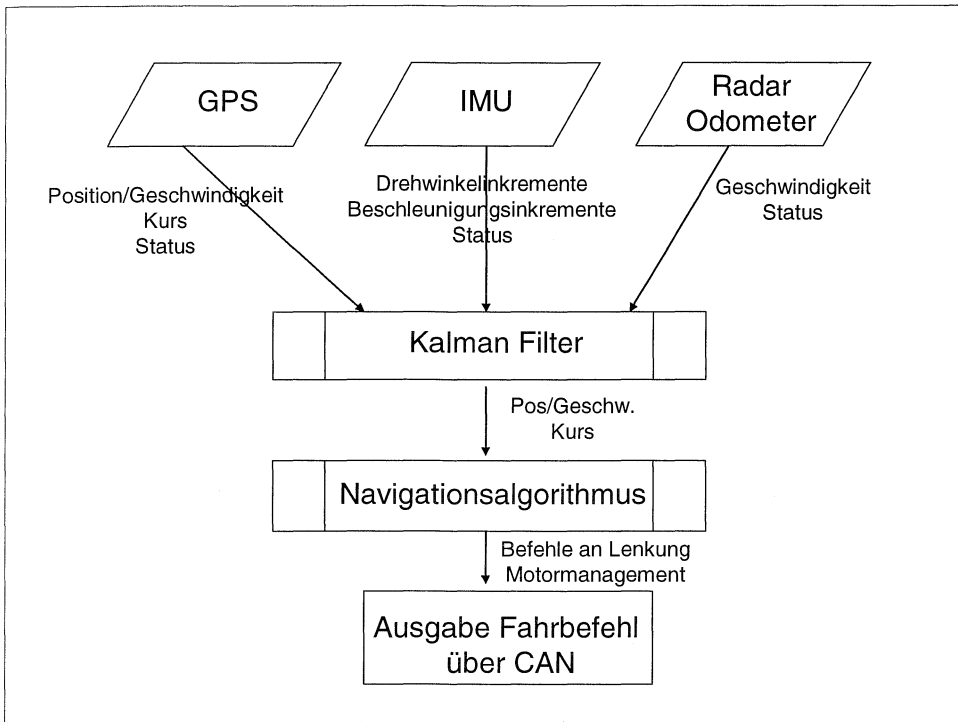


Abb. 1: Aufbau des AGRO NAV-Systems

Die zusätzliche Elektronik und Sensorik besteht im Wesentlichen aus einem Navigationsrechner mit Anzeige- und Bedieneinheit GT2000 von GEO TEC, einem hochgenauen GPS-Empfänger (s. Tab.) und einer IMU (s. Tab.) zur Überbrückung bei GPS-Signalverlust und zur Erfassung der Roll- und Nickbewegungen des Fahrzeuges.



Abb.2: MMI (man-machine-interface)

Tab. 1: Spezifikation des GPS-Empfängers und der IMU

Spezifikation des für den Fahrbetrieb installierten GPS-Empfängers	
Hersteller:	Thales Navigation Inc.
Frequenzen	Zweifrequenz-Empfänger
	RTCM-Standard
OEM Board	Z-Eurocard board mit real-time position accuracy-synchronized RTK bei 10Hz von +-2cm
Radio-Frequenz	902-928 MHz
Spezifikation des eingebauten Inertialsystems (IMU)	
einachsigen Faserkreisel (FOG):	SFIM Industries
	Drift 3°/h
2 Beschleunigungsmesser:	Sundstrand
	Auflösung ca. 3 mg

Das Softwarepaket AGRO NAV, welches auf dem Navigationsrechner GT2000 läuft, kann als das Herzstück des Gesamtsystems bezeichnet werden. Das im Zentrum stehende Kalman Filter „beobachtet“ ständig die Eingangssensoren und „schätzt“ die bestmögliche Konfiguration. Solange das GPS einwandfreie Resultate meldet (guter Empfang und einwandfreier Status), werden diese Eingangsgrößen zur Navigation verwendet und das Kreiselsystem dient lediglich der Glättung. Verschlechtert sich nun der GPS-Empfang, etwa durch Satellitenabschattung, so wird die Navigationsinformation mehr und mehr aus dem Kreiselsystem und die Geschwindigkeit aus dem Radargerät gewonnen. Die Daten am Ausgang des Kalman Filters beinhalten die Istposition, und den Geschwindigkeitsvektor. In Verbindung mit den aus den Vorbereitungen erarbeiteten Daten steuert das System zum einen das Fahrzeug vollautomatisch oder unterstützt den Fahrer durch Anzeige des exakten Fahrweges auf dem Bildschirm, zum anderen werden die angebauten Arbeitsgeräte am richtigen Ort mit den richtigen Informationen versorgt, um die geplanten Arbeiten durchzuführen (Bittner, 2000)

Um autonom auf einem Feld fahren zu können, sind verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen bzw. Vorbereitungen zu treffen. So ist es unabdingbar, dass das Feld besser +/- 5cm vermessen wurde. Die Vermessungsdaten werden auf dem „Hof-PC“ in das Software-Paket AGRO PLAN eingelesen (Bittner, 2000).

Die geometrischen und physikalischen Daten der Fahrzeuge, aber auch der Anbaugeräte müssen exakt bekannt sein. Diese Daten sind in einer Fahrzeug-Bibliothek und in einer Geräte-Bibliothek hinterlegt und können frei selektiert werden. Das Programm errechnet sich daraus automatisch die gültige Arbeitskombination. Mit diesen Daten konstruiert nun AGRO PLAN automatisch mögliche Fahrwege. Diese können entweder akzeptiert oder von Hand

geändert werden. Eventuell müssen noch Arbeitsschritte (z.B. Ausbringmengen) ergänzt werden. Diese so erzeugten Fahrwege werden nun vor Arbeitsbeginn dem Fahrzeug übertragen, mittels Datenträger PCMCIA-Karte (Bittner, 2000).

Nachdem die Anweisungen aus dem AGRO PLAN in das System AGRO NAV übertragen wurden, wird der Fahrer zum geplanten Startpunkt geführt. Sobald dieser innerhalb einer gewissen Toleranz erreicht ist erscheinen zwei „Smilies“ auf dem Bildschirm. Dies zeigt dem Fahrer, dass er nun durch Drücken des Softkeys „Start“ die automatische Arbeitsdurchführung beginnen kann.

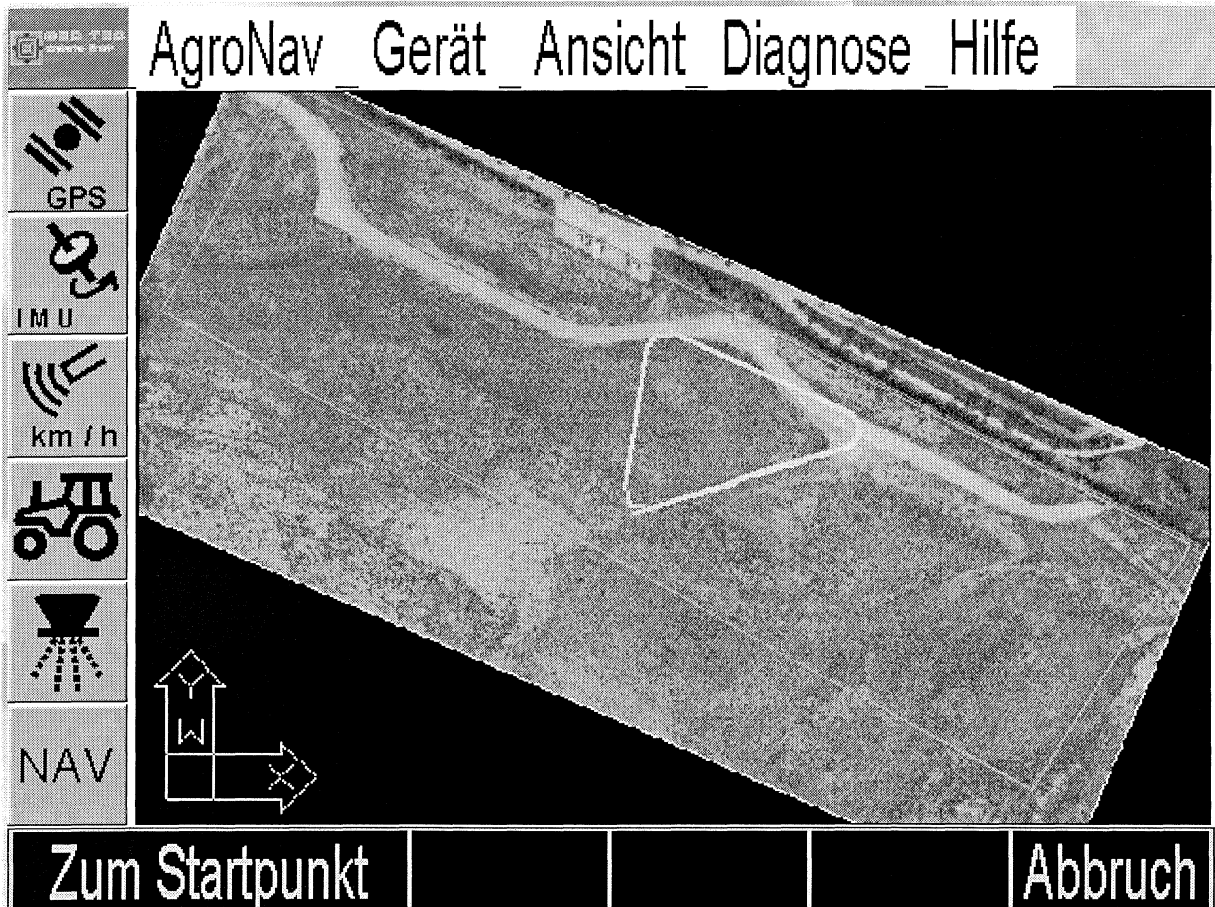


Abb. 3: AGRO NAV - Startbildschirm

Ohne weitere Einwirkung werden nun die Arbeitsschritte durchgeführt und alle Ereignisse automatisch und örtlich hochgenau dokumentiert. Diese Informationen werden auf einem Datenträger (z.B. PCMCIA-Karte) gespeichert und nach Abschluss der Arbeiten dem AGRO PLAN auf dem „Hof-PC“ zur Verfügung gestellt. Sie sind also für spätere Überlegungen (z.B. Düngemittelmenge) ortsbezogen verfügbar.

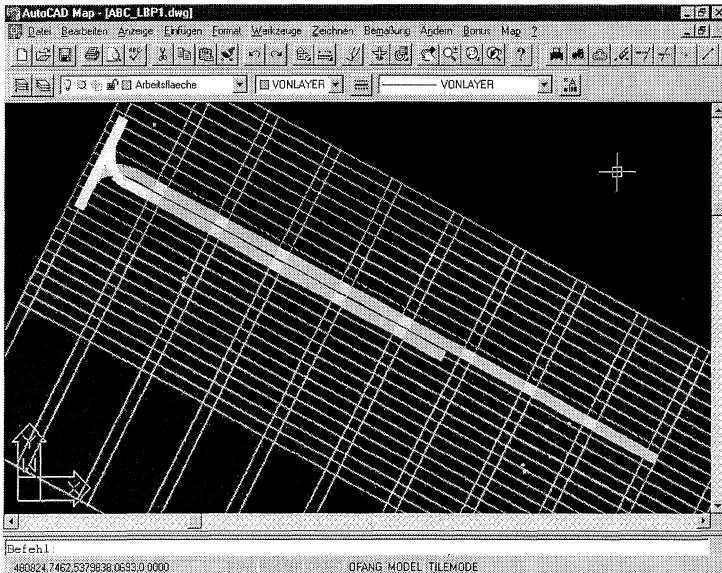


Abb. 4: Beispiel für die Festlegung des Fahrweges und des Geräteinsatzes (Bittner und Freimann, 2000)

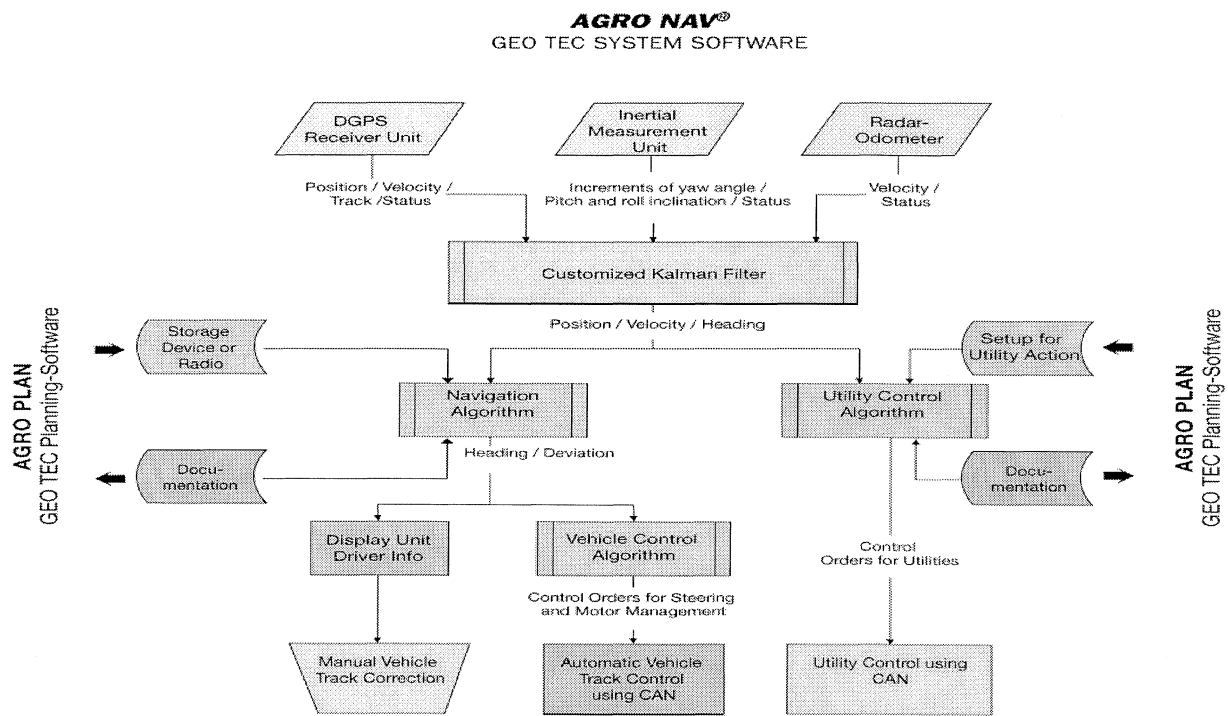


Abb. 5: Struktur der Software für die Navigation und den Geräteinsatz (Bittner, 2000)

3.3 Messungen in Dürnast

3.3.1 Das Referenzsystem

Folgende Forderungen sind an ein Referenzsystem zu stellen:

1. Generell wird in der Messtechnik die Forderung erhoben, dass das Referenzmesssystem 3fach genauer als die bei der Messung gewünschte Genauigkeit sein soll. Um prüfen zu können, ob der autonom betriebene Traktor innerhalb eines Bandes von $\pm 10\text{cm}$ fährt (Hypothese 1), wird ein Referenzsystem benötigt, das im dynamischen Betrieb eine Genauigkeit von $\pm 3\text{cm}$ erbringt.
2. Das Referenzsystem soll vollständig unabhängig vom zu messenden System sein und auf keine Daten aus dem zu messenden System zurückgreifen.

Als Lösungen bieten sich an:

1. Die Installation und präzise Vermessung einer Solllinie, die bei der Überfahrt mit einem Referenzsystem abgegriffen wird. Diese Vorgehensweise ist nur auf einer befestigten Fahrbahn möglich und scheidet im Acker gänzlich aus.
2. RTK DGPS als Referenzsystem. Dabei besteht das Problem, dass die Antenne auf dem Dach angebracht werden muss, wobei eine ev. Seitenneigung des Fahrzeugs einen systematischen Fehler produziert. Bereits bei einer Seitenneigung (der Fahrbahn) von ca. 3,8% liegt der Fehler im Bereich von 10cm, und damit in einer Größe, die als zu erzielende Genauigkeit definiert wurde. Das System AGRO NAV erhält diesen Neigungswert auf der IMU (Beschleunigungsmesser) und verrechnet diese mit 10Hz. Da die systeminternen Daten für das Referenzsystem nicht herangezogen werden, entfällt die Verwendung dieser hochgenauen Korrekturdaten für die Seitenneigung. Als Lösungsweg verbleibt nur, in (möglichst großem) seitlichem Abstand 2 Referenzantennen anzubringen, aus der Differenz der z-Koordinaten die Seitenneigung zu bestimmen, und damit die xy-Koordinaten zu korrigieren. Dabei musste zu Projektbeginn davon ausgegangen werden, dass systembedingt die z-Koordinaten mit $\pm 10\text{cm}$ recht ungenau sind, und es damit gerade möglich sein sollte festzustellen, ob sich der Traktor in einem Sollband von $\pm 10\text{cm}$ neben der Sollbahn bewegt. (Stempfhuber, pers. Mitt). Somit ist davon auszugehen, dass mit diesem Referenzsystem die gestellte Aufgabe erfüllt werden kann.

Da die 2. Lösung auch im rauen Gelände einsetzbar ist, wurde diese angewandt. Die Mitarbeit des LS Geodäsie bei den Messungen und Auswertungen ist dafür unabdingbar. Hr. Stempfhuber hat dankenswerterweise das Referenzsystem eingesetzt und die nötigen Koordinatentransformationen und Berechnungen mit Hilfe von MATLAB durchgeführt.

3.3.2 Messumgebung Dürnast 1:

Am Messstandort Dürnast 1 wurde die Fahrgenauigkeit des unbelasteten Schleppers in Geradeausfahrt bei verschiedenen Geschwindigkeiten getestet. Dazu wurde auf einer Teerdecke, die eine Längsneigung von ca. 4,5 % und aufweist, eine Teststrecke mit einer Länge von 180m (brutto) festgelegt. Die mittlere Messstrecke beträgt 176,8 m. Diese Strecke soll auf einer geraden Bahn durchfahren werden. Ein entsprechender Job wurde in System Agro Plan festgelegt (Sollbahn). Während der Fahrt wurde vom System Agro Nav der gefahrene (Antennen)-Kurs mit 10Hz aufgenommen und abgelegt (GeoTec-Bahn). In der Fahrbahn befinden sich mehrere Querrillen.

Als Referenzsystem wurde vom Lehrstuhl für Geodäsie der TUM, Hr. Stempfhuber, ein System Leica SR530 mit eigener Referenzstation und 2 Rovers eingesetzt. Das System wurde mit einer Messfrequenz von 10Hz mit einer absoluten Lagegenauigkeit von $\pm 2\text{cm}$ betrieben. Die Rovers sind auf dem Dach des Traktors angebracht. Die Daten werden im NMEA mit UTC-Zeit zurückgeschrieben.

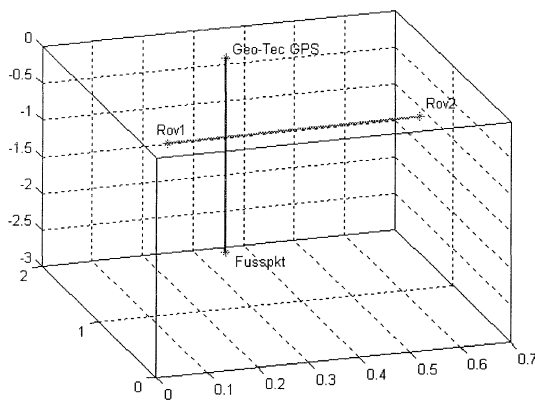


Abb. 6: Lage der Antennen relativ zum Fußpunkt (Mitte Traktor-Hinterachse, projiziert auf die Bodenoberfläche)

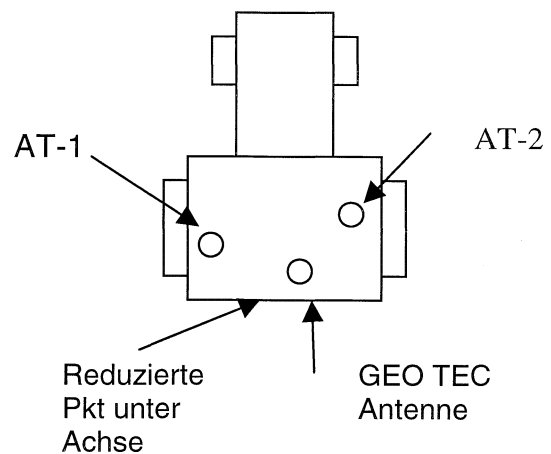


Abb. 7: Anordnung der Antennen

Pkt-Bezeichnung	HzDist	Hz	V
AT-1	23.390	270.1765	100.3795
AT-2	23.441	271.5425	100.4319
GeoTec	24.679	270.8439	100.3795
Fußpunkt v. GeoTec			
Pkt-Bezeichnung	HzDist	Hz	V
AT-1	23.390	270.1765	100.3795
AT-2	23.441	271.5425	100.4319
GeoTec	24.679	270.8439	100.3795
Fußpunkt v. GeoTec			

Tab. 2: Messwerte der Lagevermessung der Antennen

Fahrgeschwindigkeit		Messpunkte bei 170m Fahrstrecke und 10Hz
[km/h]	[m/s)	
2	0,55	3060
4	1,11	1530
6	1,67	1020
12	3,33	510

Tab. 3: Das System AgroNav der Fa. GeoTec fährt mit einer update-Rate von 10Hz. Damit ergeben sich je nach Fahrgeschwindigkeit zwischen 510 und 3060 Messpunkte pro Messfahrt.

3.3.2 Messumgebung Dürnast 2:

In der Nähe von Dürnast 1 wurde ein unregelmäßiger Kurs mit Kurven auf einem Grasweg befahren. Die Geschwindigkeit variierte, betrug im Mittel ca. 12km/h.

3.4 Messumgebung Scheyern

An der Versuchstation Scheyern besteht die Aufgabe, über Jahre ortstabil Langparzellenversuche zu bewirtschaften. An die Lagegenauigkeit der je 7,5m breiten Parzellen wird eine Anforderung von im Mittel +/-0,15 m gestellt. An die Anschlussfahrten wird eine Genauigkeit im Getreide von im Mittel +/- 0,05 m gestellt, da größere Abstände zu einer stärkeren Bestockung der Rendreihen und einer ev. Verfälschung von pflanzenbaulichen Messergebnissen führen. Bei Kartoffeln und Mais werden bei Anschlussfahrten +/- 0,10m toleriert. Eine Kumulation der Fehler ist zu vermeiden, da damit die Fahrgassenabstände von 15,0 m nicht eingehalten werden und sich somit streifenweise Über- oder Unterbehandlungen ergeben. Diese Forderungen sind durch den Einsatz üblicher Technik und die Orientierungshilfe Spurreißer nicht zu erreichen, sondern allenfalls durch die Orientierung an vorher durch ein Vermessungsbüro eingemessenen Orientierungspunkten.

Die Versuche wurden durchgeführt in Scheyern auf den Schlägen A20 und A18. Beide Schläge weisen eine Neigung quer zur Fahrtrichtung auf (Seitenhang). Die Böden waren zum Zeitpunkt der Befahrung trocken (A18) bzw. nass (A20).

Die Schläge wurden von der Fa. GEO TEC mit Hilfe des Traktors MF4255, der mit dem System AGRO NAV ausgestattet ist und der als Rover genutzt wurde, eingemessen. Die Daten wurden in AGRO NAV Plan überführt, und dann die Fahrwege im Abstand von 3m, die Kehren und der Geräteeinsatz (Kraftheber, Zapfwelle) geplant. Mittels PCMCIA-Karte wurden die Planungsdaten auf die Bordrechner der Traktoren übertragen.

Tab. 4: Eigenschaften der Versuchsstandorte in Scheyern

	Schlag 18	Schlag20
Größe	6ha	3,5ha
Längsneigung	<1%	0-1%
Querneigung	2-8%	0-14%
Böden	suL	sL
Bedingungen bei Befahrung		
Vorfrucht	Silomais	Weizen
Vorhergegangene Bodenbearbeitung	Grubber	-
Bodenzustand	nass	Trocken
Rauhigkeit	rau	eben
Eingesetzte Technik		
Zeitpunkt	Ende Oktober 2001	Mitte August 2001
Traktor	MF4255	Agrotron 200, anschließend mit MF4255 ohne AGRO NAV
Anbaugerät	Kreiselegge + Sämaschine	Grubber mit Dammformer
Arbeitsbreite	3m	3m
Bearbeitungstiefe	0,12m	0,22m
Fahrgeschwindigkeit	3 km/h	7 km/h
Messung		
Zeitpunkt	April 2002	April 2002
Messpunkte	Saatreihen; Außenreihe alle 3m	Dammkronen; Außenreihe alle 3m
Messstrecke	3 Transekte je 96m	3 Transekte je 96m
Messpunkte	96	96

Weizensaat:

Zur Saat des Winterweizens auf Schlag A20 wurde der MF4255 mit einer 3m breiten Kreiselegge und aufgebauter Accord-Sämaschine mit Accord Säschiene eingesetzt. Die Fahrgeschwindigkeit ist durch die Leistungsfähigkeit des Schleppers bei den vorgefundenen Bodenverhältnissen auf ca. 4km/h begrenzt. Da die Fahrgassenschaltung nicht extern elektrisch zu steuern ist und wegen des angestrebten mäandrierenden Fahrens eine automatische Fahrgassenschaltung nicht brauchbar war, wurde das System angewiesen, zuerst die Spuren mit Fahrgassen zu säen und dann nach manuellem Umschalten die restliche Fläche. Die Arbeit wurde – mit Ausnahme dieses Eingriffs und des Ansteuerns des Saatgutvorratswagens zum Befüllen des Saatguttanks und anschließendem Wiedereinfädeln – autonom durchgeführt.



Abb. 8: Lage der untersuchten Transekte im Weizenfeld

Anlage von Kartoffeldämmen:

In Scheyern wird das sog. Mulchpflanzverfahren von Kartoffeln in begrünzte Sommerdämme durchgeführt. Dazu wird nach der Getreideernte der Boden gelockert (Grubber) und Dämme gezogen (mittels am Grubber angebaute Hohl-scheiben und Dammformer). Hierzu wurde der von der Fa. GEO TEC zur Verfügung gestellte Deutz-Fahr AGROTRON 200 mit normaler Bereifung in autonomer Fahrweise eingesetzt. Da die Dämme in einer Überfahrt unzureichend ausgeformt werden, werden sie in einer weiteren Überfahrt fertiggestellt, wobei einer leichter Schlepper mit Pfliegerädern eingesetzt wird. Die Lageabweichungen der ersten Fahrt (s.u.) führten dazu, dass bei der 2. Fahrt auf den vorgeplanten Fahrwegen z.T. die Dammflanken befahren wurden, so dass hier von einer autonomen bzw. gesteuerten Befahrung Abstand genommen wurde.

Messungen und Auswertung:

Die Lage der Fahrspuren wurde bestimmt, indem die Abstände der je äußeren östlichen Weizenreihe vom talwärts liegenden Feldrand ermittelt wurden. Die Messungen wurden im April 2002 mittels geeichten Stahlmaßbands durchgeführt. Es wurden 3 Transekte senkrecht zur Bearbeitungsrichtung mit jeweils ca. 96m Länge aufgenommen. Ausgewertet wurde die Lagegenauigkeit als Differenz des Abstand der äußeren östlichen Weizenreihe vom Erwartungswert und die Genauigkeit des Anschlussfahrens als Abweichung des Abstands der je äußeren Reihen benachbarter Fahrspuren vom Erwartungswert (= Abstand der Drillreihen).

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse Dürnast

Um die Daten, die von AgroNav zurückgeschrieben wurden, mit denen des Referenzsystems kompatibel zu machen, mussten die Formate ineinander umgerechnet werden (GK-Transformation, Umrechnen der GEO TEC-Zeit in UTC-Zeit). In Abb. ... sind die grundsätzlichen Zusammenhänge der Messdaten abgebildet:

- Schwarz: durch AGRO NAV Plan vorgegebene Sollbahn, die der Traktor zu durchfahren hat
- Grün: von System AGRO NAV als gefahrene Strecke zurückgeschrieben. Dieser Wert wird systemintern nicht verwendet.
- Rot, blau: Rover 1 und Rover 2 des RTK GPS-Referenzsystems.
- Lila: räumlicher Zusammenhang der GEO TEC-Antenne und der beiden Referenz-Antennen.

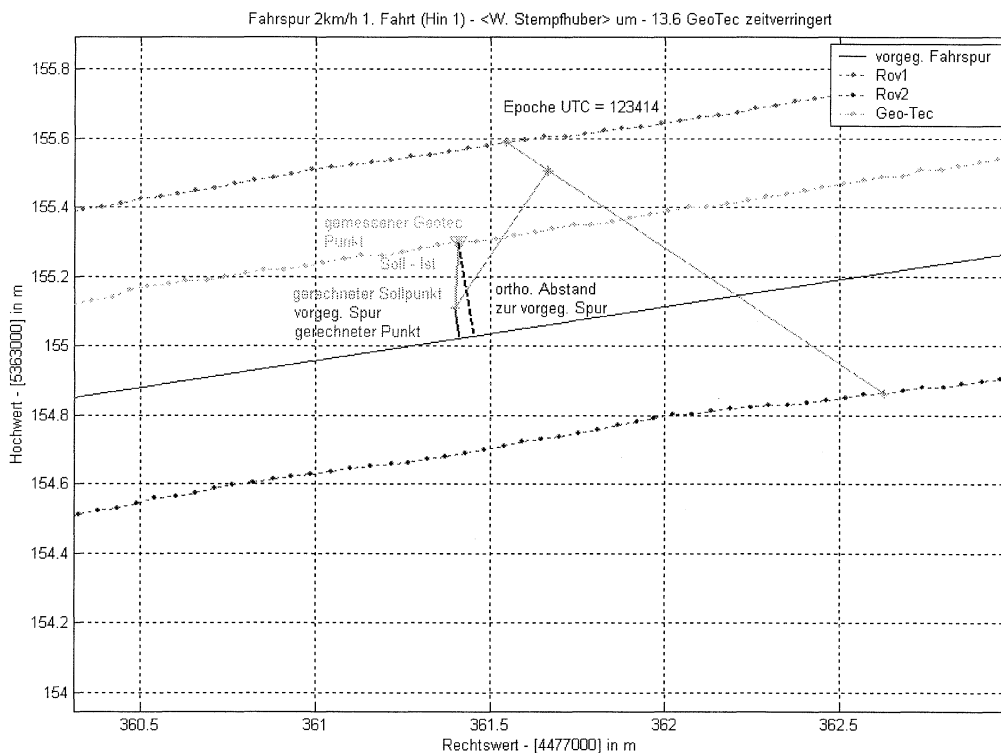


Abb. 9: Räumlicher Zusammenhang der geplanten Sollbahn (schwarz), der von AGRO NAV zurückgeschriebenen Fahrbahn (grün) und der Fahrbahn der beiden Referenz-Rover (rot, blau) (Stempfhuber 2002)

Das letztlich entscheidende Kriterium zur Beurteilung der Fahrgenauigkeit des Traktors mit dem System AGRO NAV ist die Länge der durchgezogenen blauen Linie, nämlich des Abstands des aus den Rover-Daten errechneten Istwerts (Ende der lila Linie) vom geplanten

Sollwert (schwarze Gerade). Weitere Größen werden herangezogen, um die Reaktion des Systems besser beschreiben zu können.

Für die Umrechnung der GEO TEC-Zeit in allg. UTC-Format existiert ein eindeutiges Verfahren. Nach der Umrechnung musste aber festgestellt werden, dass offensichtlich ein offset von 13,6s besteht, der durch den zeitlichen Abgleich bei Wendemanövern eindeutig und wiederholt definiert werden konnte (Abb.10). Alle Daten wurden folglich um diesen Wert bereinigt. Es konnte nicht geklärt werden, wie es zu diesem offset kommt.

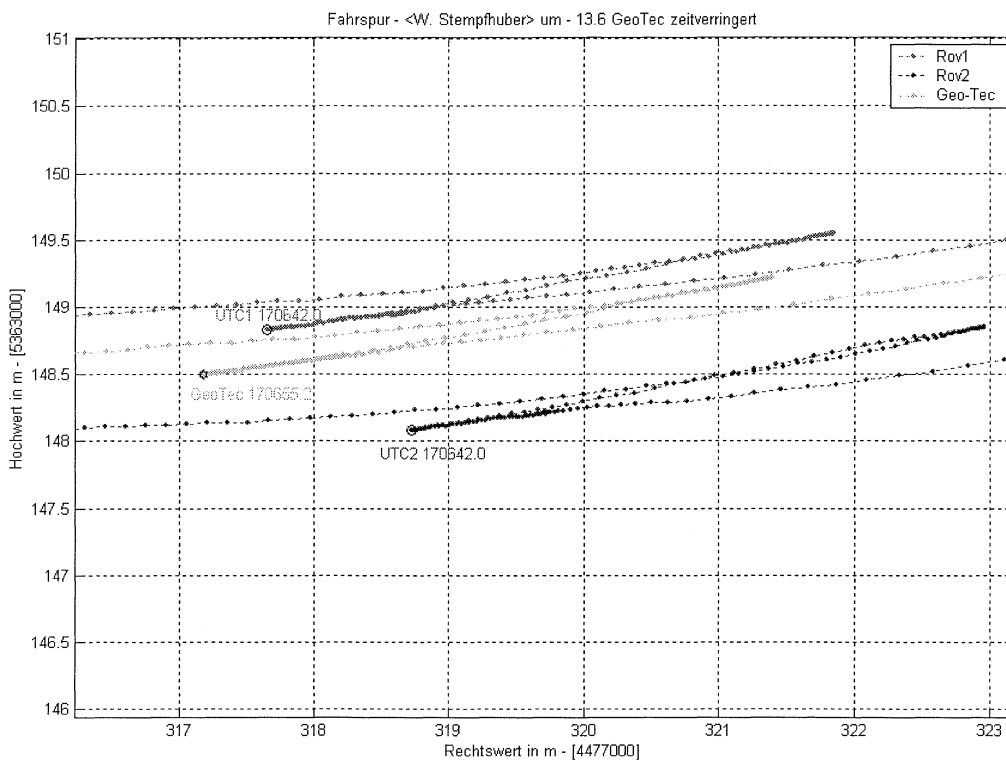
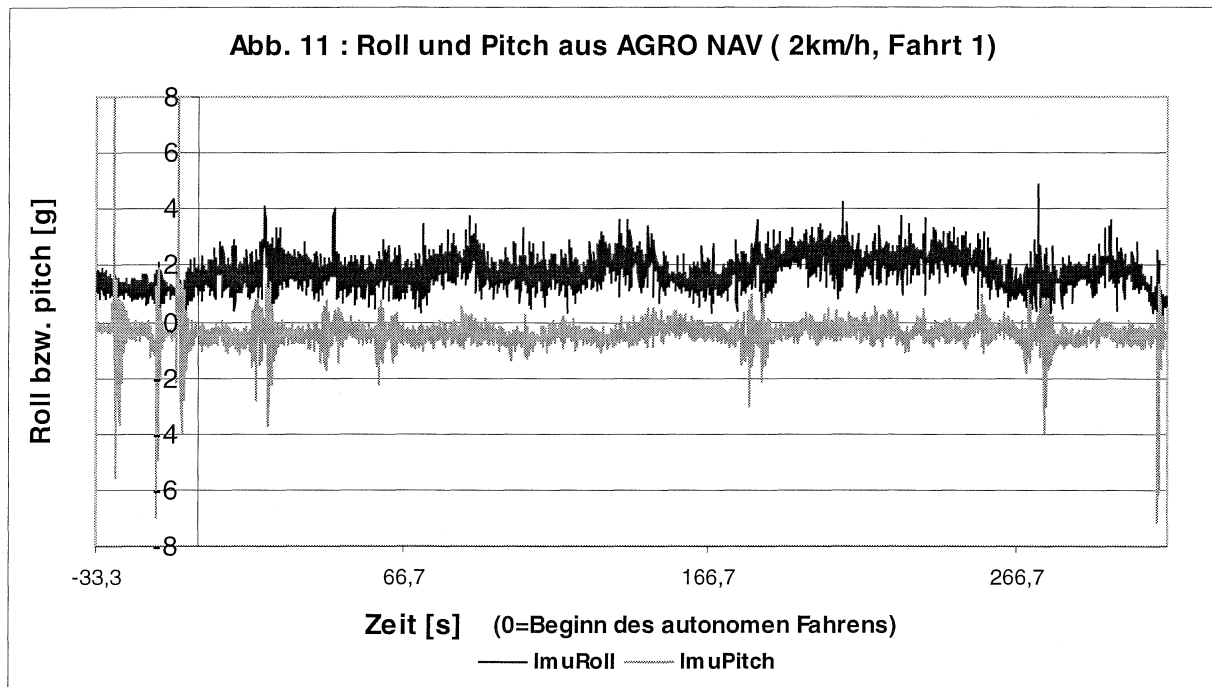


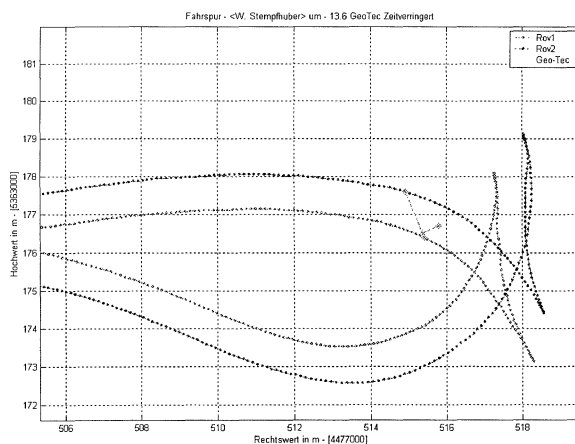
Abb. 10: Aus der räumlichen Lage der Rover zur GEO TEC-Antenne lässt sich eindeutig der Zeit-offset von 13,6s bestimmen.

Zur Interpretation der Ergebnisse werden die von AGRO NAV zurückgeschriebenen Daten herangezogen. In Abb. sind beispielhaft die von den Neigungsmessern erfassten Längs- und Seitenneigung während der Fahrt1 bei 2km/h abgebildet: Am Beginn der Fahrt (vor Erreichen des Start-Messpunktes) finden heftige Nickbewegungen (pitch) statt, ebenso beim Bremsen am Ende der Fahrt. Die Wankbewegungen (roll) dagegen sind weniger ausgeprägt, einige Ausschläge fallen aber mit Ausschlägen bei Nickbewegungen zusammen (z.B. bei Zeit=25 s). Zu diesem Zeitpunkt wird eine kurze Querrille mit zusätzlich einer ausgeprägter Delle auf der Nordseite der Fahrbahn durchfahren, in der der Traktor durch die Vertiefung abgebremst und dann wieder autonom auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt wird und durch die Delle zusätzlich ins Wanken gerät. Dadurch ergeben sich in der AGRO NAV Aufzeichnung Abweichungen für XTE von bis zu 0,05m (Abb. 11) die jedoch nur für eine Fahrtstrecke von 0,5m anhalten. Noch an 4 weiteren Stellen sind (flachere) Querrillen

vorhanden, die sich bei allen Fahrten durch höhere Abweichungen ausprägen. Die Fa. GEO TEC gab an (Muerth, pers. Mitt.), dass XTE für die Bodenoberfläche angegeben wird, indem roll und pitch rechnerisch berücksichtigt werden. Vor dem Licht der hier gewonnenen Daten erscheint dies zweifelhaft, da bei allen ausgewerteten Fahrten eine recht enge positive Beziehung zwischen XTE und Roll besteht. Auch die Höhendaten, die von AGRO NAV zurückgeschrieben werden, lassen einen Bezug auf die Bodenoberfläche unwahrscheinlich erscheinen: die Höhendaten entsprechen recht genau denen, die mit dem Referenzsystem für die auf dem 2,65m hohen Schlepperdach montierten Rover gemessen wurden.

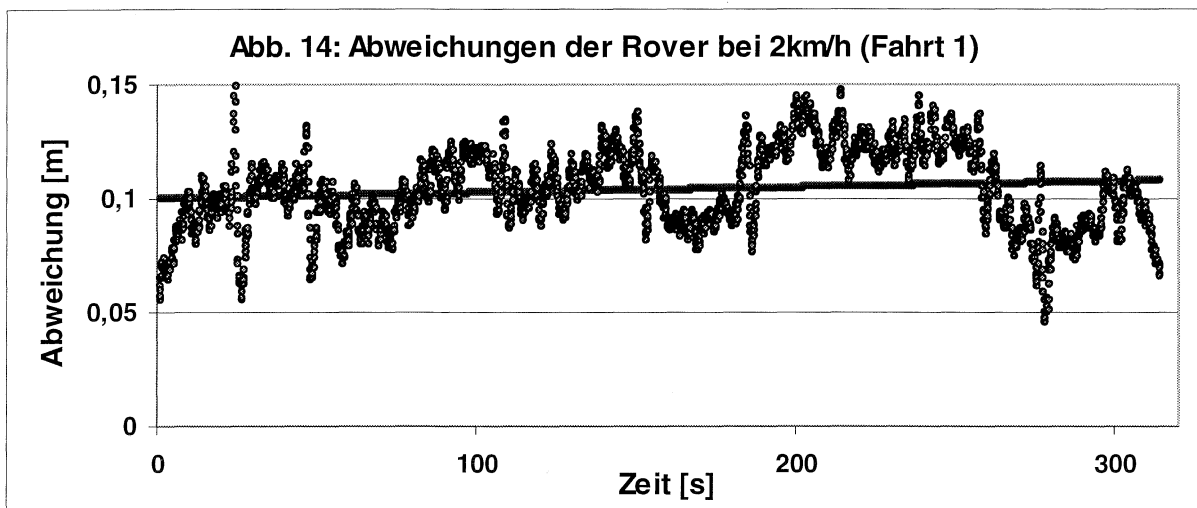
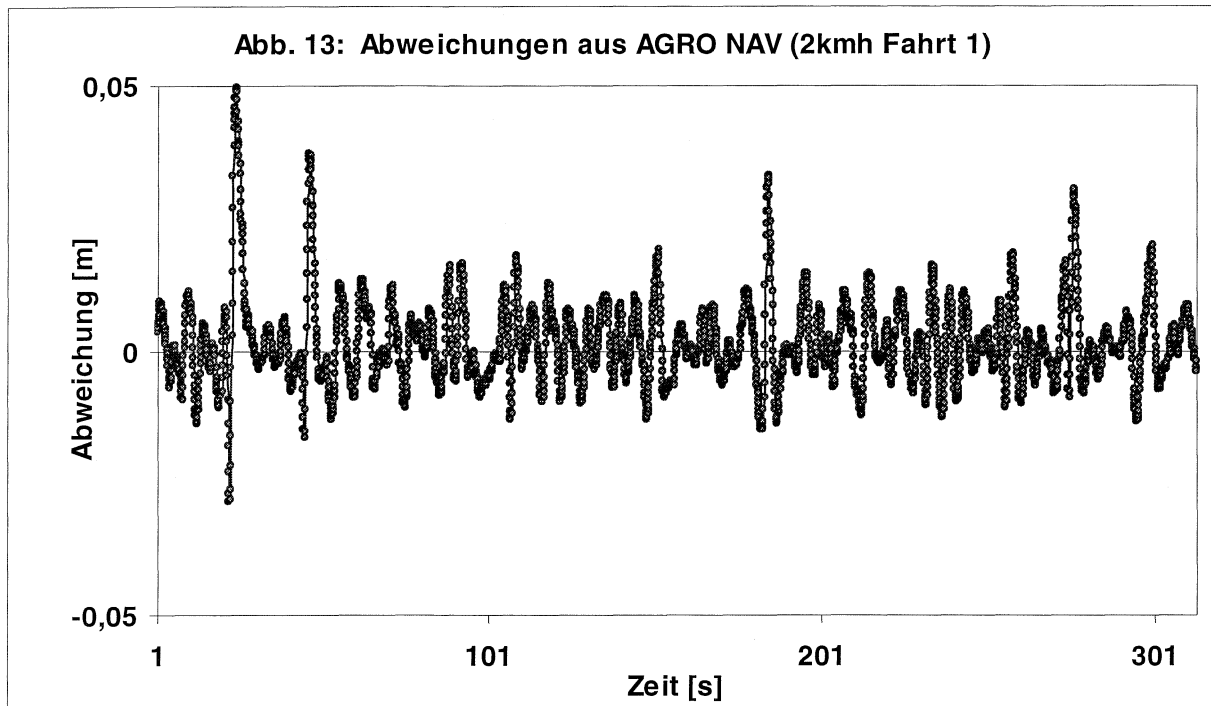


Auffällig ist, dass die Roll-Werte bei Fahrt 1 stets im positiven Bereich liegen. Als Mittelwert

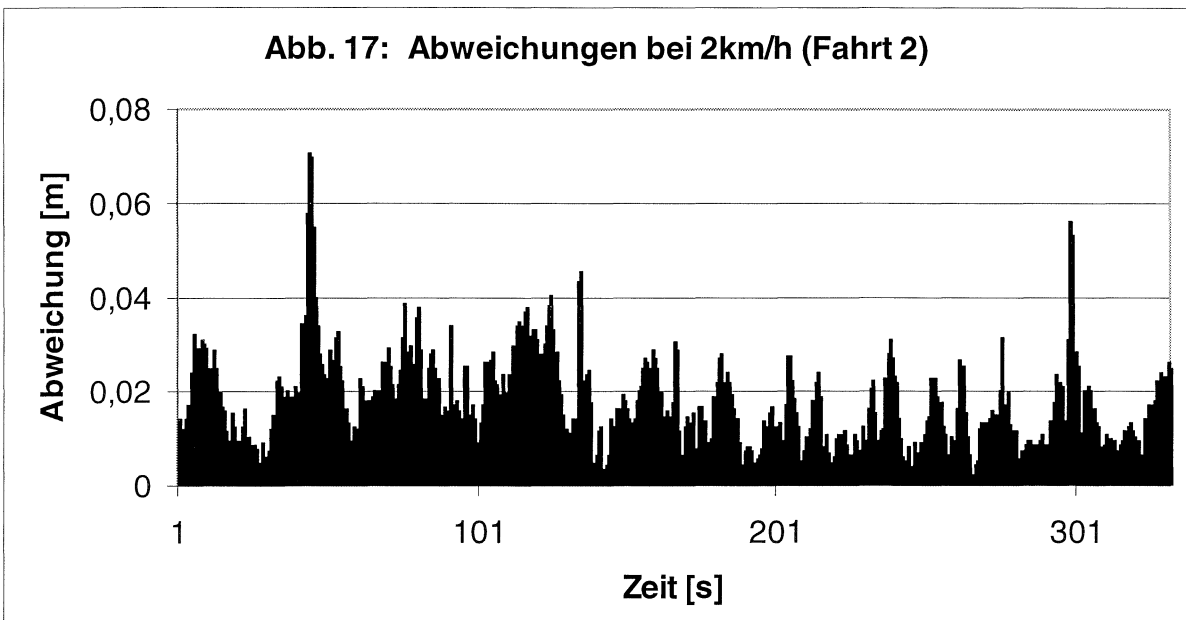
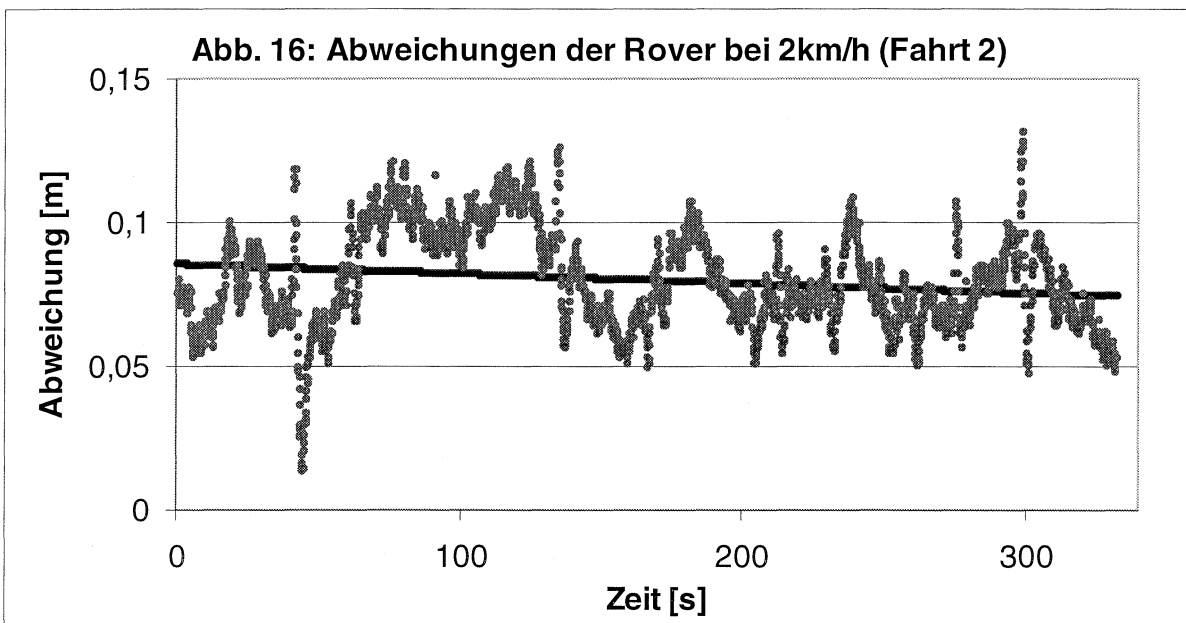
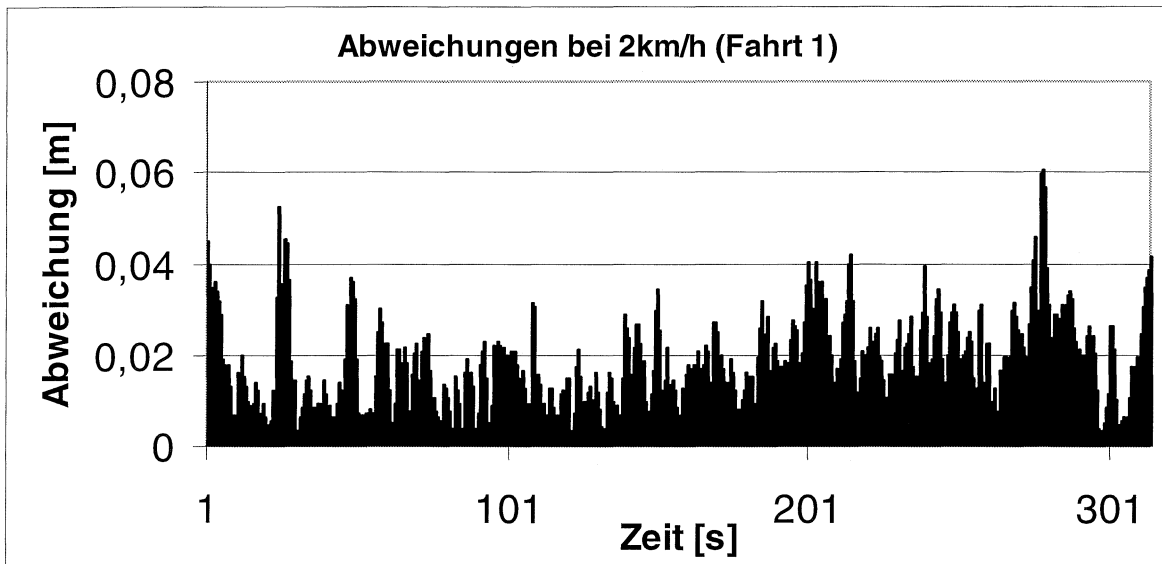


ergibt sich +1,85g. Bei einer Höhe der AGRO NAV-Antenne über der Bodenoberfläche ergibt sich für diese Zielfläche eine mittlere Abweichung von 0,086m. Das Phänomen kann dadurch erklärt werden, dass die gesamte Fahrtstrecke eine Querneigung aufweist. Dass die Abweichungen offensichtlich nicht ganz konstant sind, liegt wohl daran, dass die Querneigung von Osten (Beginn von Fahrt 1) nach Westen

etwas zunimmt und wohl auch in der Streckenabwicklung nicht ganz konstant ist. Es konnten mit einfachem Vermessungsgerät Querneigungen von 0,5 bis 3,5% ermittelt werden. Aus den o.g. AGRO NAV-Roll-Werten ergibt sich eine mittlere Querneigung von 3,2%.



Die Abweichungen der Rover von den in AGRO NAV Plan konstruiertem Sollweg, den der Traktor zurücklegen sollte, sind in Abb. 14 abgebildet. Sie betragen für die o.g. Fahrt 0,1037m. In die Abb.14 eingearbeitet ist die lineare Regressionsgerade dieser Abweichungen, die fast parallel zur x-Achse verläuft und einen Abstand von 0,0998 bis 0,108m aufweist. Diese Gerade kann als rechnerische Korrektur der Wankbewegung (roll) des Traktors benutzt werden, da das Referenzsystem ja die Querneigung nicht explizit erfasst wurde. Dieses Verfahren hat gegenüber dem Verfahren, die Differenz der Höhenwerte der beiden Rovers zu benutzen den Vorteil, dass die Werte stabiler sind. Die Höhenwerte der Rover weisen nämlich Messfehler von ca. 0,05m auf, so dass die Differenz der Einzelwerte nicht als Maß der Querneigung verwendet werden kann. Die Regressionsgeraden aller durchgeführten Fahrten weisen eine nur geringe Steigung auf.



Tab. 5: Messwerte der Befahrung in Dürnast

Test			Zeitmarken		Position (RW Rov1)		n	Ergebnisse [m]			
v [km/h]	Fahrt	Fahrabschnitt	Beginn	Ende	Beginn	Ende		offset	mittlere abs. Abw.	max. abs. Abw.	mittlere gewichtete abs. Abw.
2	1		123306,0	123819,6	324,28	495,95	3137	0,1037	0,0147	0,061	
	2		123933,0	124456,4	495,99	322,00	3317	0,0796	0,0137	0,071	
	3	a	124613,8	125029,5	322,05	461,14	2558	0,1005	0,0108	0,066	
	3	c	125038,5	125140,0	462,28	495,95	616	0,0976	0,0122	0,046	
	4	a	125310,0	125438,5	490,30	442,76	886	0,0767	0,0116	0,044	
	4	b	125447,0	125830,1	441,87	322,01	2232	0,0730	0,0125	0,068	
	5		129947,1	130504,6	323,43	495,98	3176	0,1088	0,0142	0,085	
2	Summe						15922	0,0914	0,0128	0,063	0,0132
4	1	a	130855,2	131024,1	495,34	412,95	890	0,0820	0,0143	0,061	
	1	b	131032,2	131209,2	411,98	322,06	971	0,0720	0,0114	0,067	
	2	a	131220,1	131502,8	320,99	414,00	1230	0,0940	0,0151	0,091	
	2	b	131510,3	131625,9	415,23	490,47	757	0,1050	0,0184	0,078	
	2	c	131640,7	131647,1	491,09	496,95	65	0,0350	0,0113	0,033	
	3	a	131756,2	131940,8	495,30	399,05	1047	0,0830	0,0144	0,056	
	3	b	131948,1	132009,9	398,26	378,28	219	0,0770	0,0047	0,029	
	3	c	132019,1	132119,8	377,56	321,38	608	0,0780	0,0084	0,061	
	4	a	132243,7	132320,5	321,96	368,60	369	0,0830	0,0116	0,091	
	4	b	132324,4	132509,9	386,90	496,94	1056	0,0980	0,0168	0,082	
	5	a	132659,4	132745,2	495,99	458,27	300	0,0640	0,0163	0,064	
	5	b	132752,4	133019,5	457,34	322,05	1472	0,0790	0,0105	0,072	
	6		133129,6	133434,7	322,00	495,35	1852	0,0970	0,0150	0,083	
4	Summe						10836	0,0805	0,0129	0,067	0,0137
6	1	a	133806,9	133834,5	495,23	453,32	277	0,0680	0,0131	0,065	
	1	b	133844,3	133933,9	451,54	376,69	497	0,0896	0,0146	0,068	
	1	c	133945,6	134018,0	370,66	321,38	325	0,0745	0,0151	0,051	
	2	a	134135,5	134245,6	329,19	436,70	702	0,0941	0,0180	0,083	
	2	b	134251,0	134,308,6	438,32	465,48	177	0,1360	0,0187	0,058	
	2	c	134315,2	134334,8	467,36	497,48	197	0,0858	0,0143	0,060	
	3	a	135507,3	135559,8	495,12	415,25	526	0,0642	0,0152	0,064	
	3	b	135607,3	135707,5	412,94	322,04	574	0,0775	0,0152	0,060	
	4		135810,5	135958,5	322,86	494,79	1222	0,0980	0,0210	0,080	
	5	a	140106,3	140113,2	494,86	484,45	70	0,0390	0,0081	0,020	
	5	b	140121,0	140137,0	482,01	456,71	161	0,0584	0,0147	0,075	
	5	c	140144,3	140235,4	454,27	377,08	512	0,0710	0,0097	0,064	
	5	d	140243,0	140316,5	374,83	322,35	326	0,0650	0,0168	0,064	
	6	a	140502,4	140603,3	324,68	417,56	610	0,0793	0,0181	0,067	
	6	b	140610,5	140701,8	419,43	482,94	514	0,1010	0,0196	0,078	
6	Summe						6690	0,0801	0,0155	0,064	0,0167
12	1	a	170417,1	170424,1	494,29	474,88	71	0,0650	0,0180	0,046	
	1	b	170434,3	170450,9	470,53	428,47	167	0,0970	0,0168	0,062	
	1	c	170501,6	170541,5	424,78	321,41	385	0,0830	0,0263	0,082	
	2	a	170656,3	170752,7	321,53	469,44	565	0,0800	0,0364	0,122	
	2	b	170804,4	170811,7	479,52	498,85	74	0,0980	0,0270	0,048	
12	Summe						1262	0,0846	0,0249	0,072	0,0291

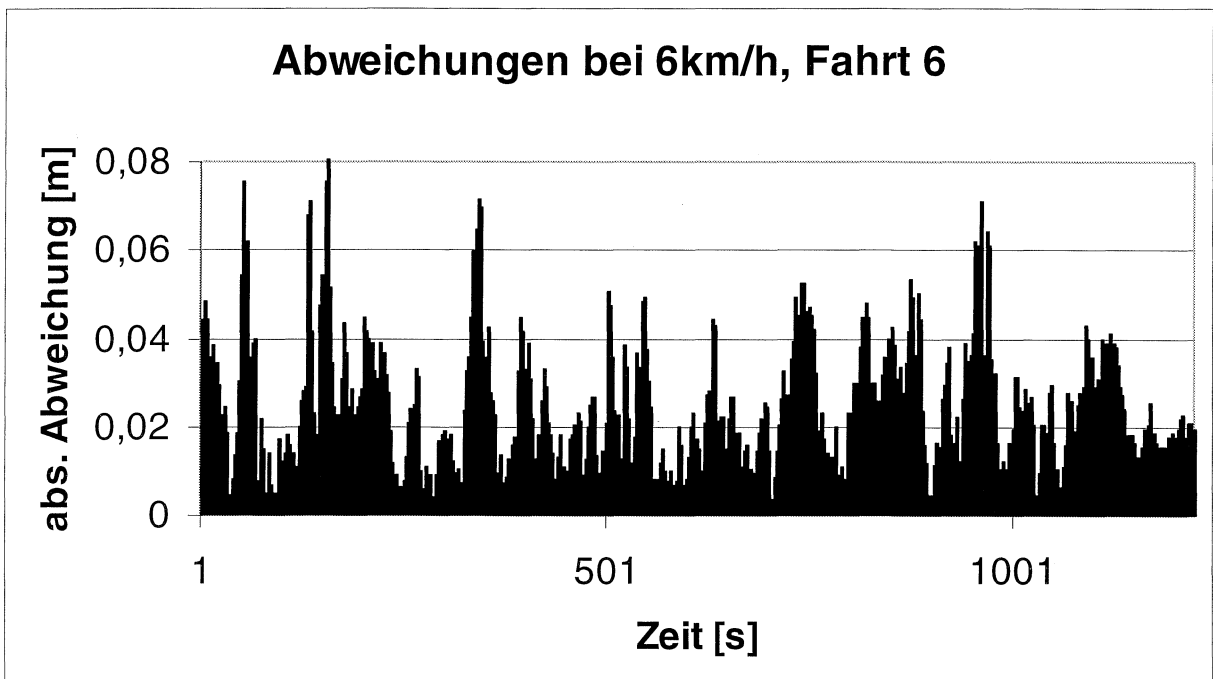
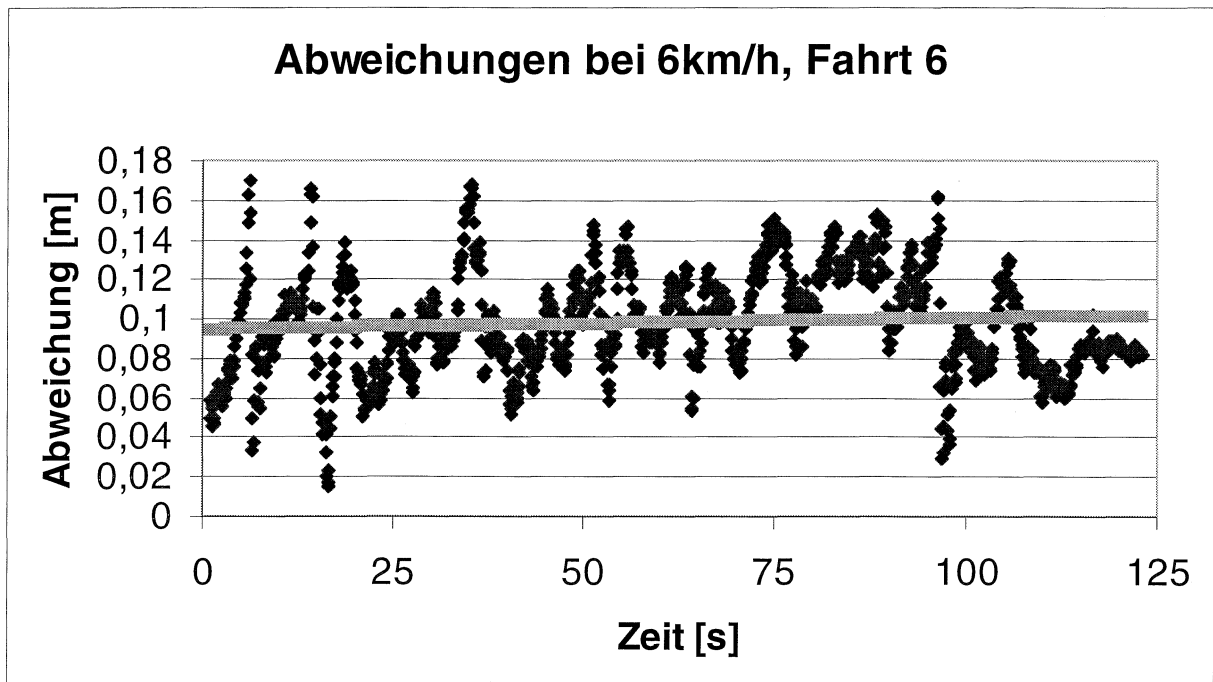
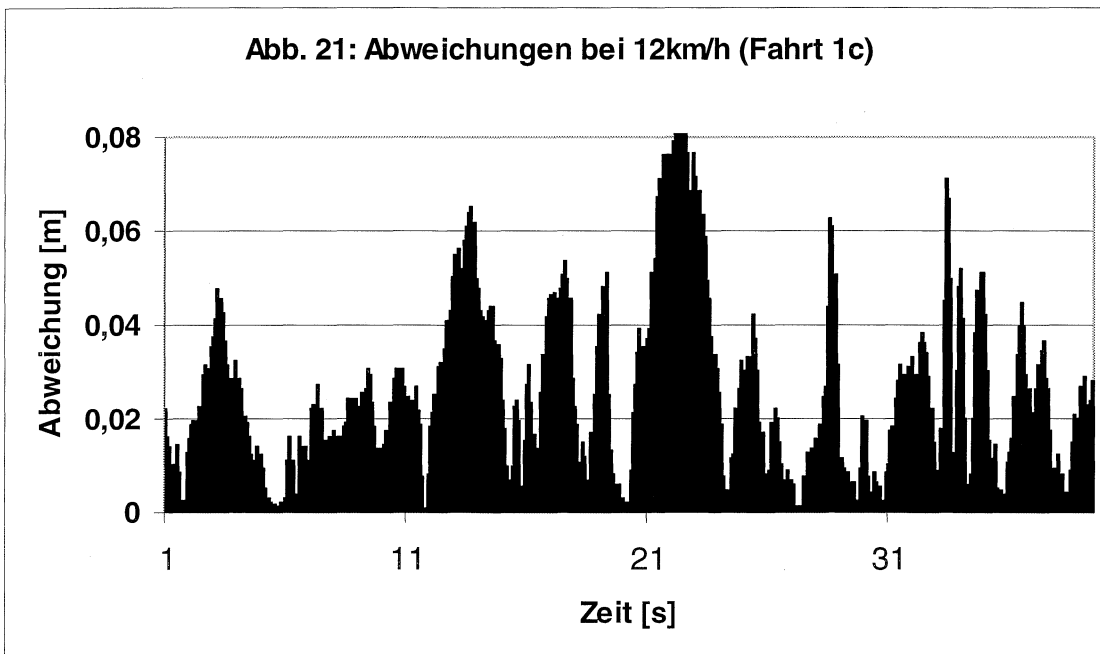
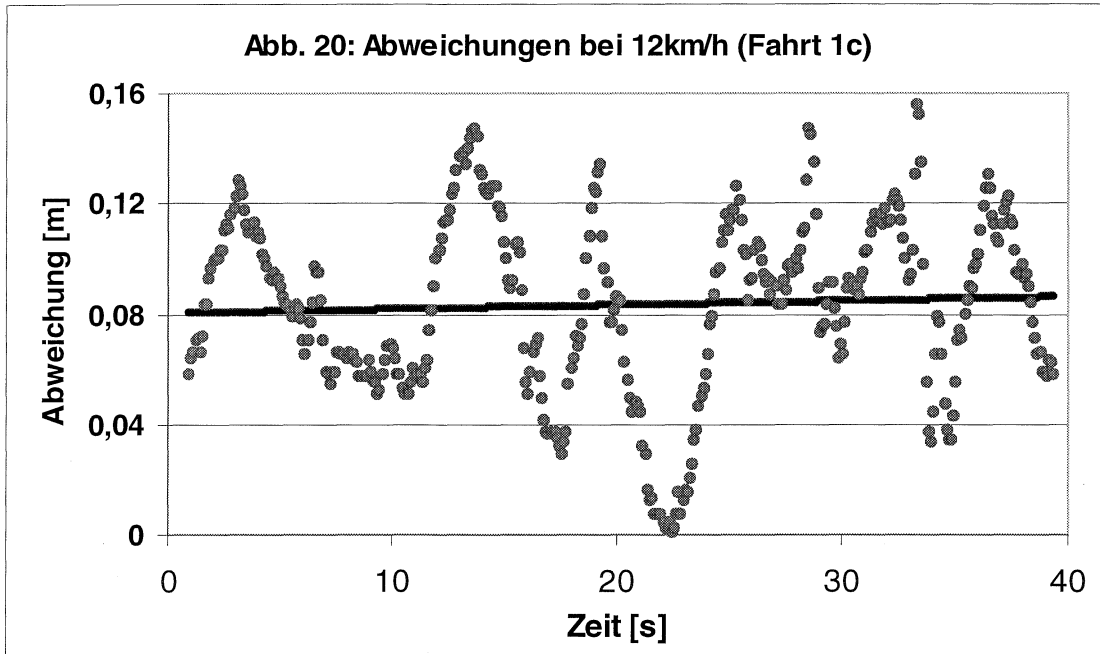


Abb. 18 und 19: Abweichungen bei 6km/h (Fahrt 6)



Die Fahrten von Osten nach Westen weisen eine positive Steigung auf (z.B. Abb. 14), die von Westen nach Osten eine negative (z.B. Abb. 16)(Tab. 5). Der mittlere Abstand zur Sollbahn liegt bei 0,085m. Fahrten O-W weisen ein um ca. 0,02m höheren Abstand auf als die Fahrten W-O. Dies liegt wohl an einer leicht asymmetrischen Anordnung der Antennen.

Bei den Abweichungen ragen die durch die Wankbewegungen hervorgerufenen Unregelmäßigkeiten heraus: so sind bei 2km/h, Fahrt 1 zwischen Sekunde 22 und 27, bei 40s, bei 180s und bei 280s Ausschläge zu erkennen (Abb. 13), die in umgekehrter Reihenfolge bei der Rückfahrt (Abb. 16) auftreten. Diese Wankbewegungen im Dachbereich, 2,65m über der Bodenoberfläche, beeinträchtigen die Fahrgenauigkeit am Boden aber nicht oder kaum, so dass durch die Einbeziehung dieser Werte zu hohe Ungenauigkeit vorgetäuscht wird.

Die mittleren absoluten Abweichungen – die Abweichungen des durch Rover1 und Rover2 errechneten Istpunktes, korrigiert um den Zeit-offset und die den mittleren Effekt der Neigung der Kabine gegenüber dem geplanten Sollpunkt – liegen im Mittel aller Befahrungen (n= 34,710) bei 0,0146. Sie liegen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2km/h bei 0,0132m und nehmen bis zur Geschwindigkeit von 12km/h auf 0,0291m zu (Tab. 5, Abb. 18 und 19): eine Versechsfachung der Geschwindigkeit verdoppelt den Fehler. Die maximalen absoluten Abweichungen bei einer Messfrequenz von 10Hz liegen bei im Mittel 0,066m, der höchste Einzelwert (12km/h, Fahrt 2a) liegt bei 0,122m. In allen anderen Fahrten liegt die höchste absolute Abweichung bei 0,091m oder geringer. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese hohen Werte vor allem durch die o.g. Wankbewegungen hervorgerufen werden.

Hypothese 1 und 2 sind damit deutlich abzulehnen.

4.2 Ergebnisse Scheyern

4.2.1 Ergebnisse beim Weizensäen

Die Abweichungen der Lage der gefahrenen (Istwerte) von den geplanten Punkten (Sollwerte) beträgt im Mittel der Transekte zwischen 4,7cm (Transekt 3) und 21,5cm (Transekt 1) (Tab. 2). Die Abweichungen bewegen sich fast ausschließlich im positiven Bereich, d.h. die Istbahnen sind relativ zu weit vom 0-Punkt bzw. Feldrand entfernt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Planung der Fahrwege im zweidimensionalen Raum erfolgt und der Einfluss der Querneigung auf die Abwicklung an der Oberfläche nicht berücksichtigt wird. Wird der Einfluss der Hangneigung rechnerisch berücksichtigt, wobei für Transekt 2 und 3 konstante Hangneigungswerte von 8,5 bzw. 4% Neigung, bei dem ausgeprägteren Relief in Transekt 1 am Hangfuß eine Neigung von 14% und an der Hangschulter von 7% angesetzt wird, so liegen die Ist-Fahrbahnen zu nahe am 0-Punkt. Der Fehler beträgt im Mittel der Transekte 0,2-9,7cm, bei Einzelwerten über 25cm (Tab. 3). Dieser Fehler ist offensichtlich der Abtrift der Anbaugeräte gegenüber dem Schlepper zuzuweisen. Diese hängt zumindest von der Hangneigung, der Masse des mit der Kreiselegge zu bearbeitenden Bodens (Bearbeitungstiefe, Bodenfeuchte) und der Schlepperausstattung (Ausgestaltung der Fixierung der Unterlenker, Forderachsgewicht) ab. Besonders bei Transekt 1 ist eine stärkere Abtrift trotz abnehmender Hangneigung im Mittelhangbereich festzustellen. Dies könnte auf eine stärkere Abtrift auf den aufgrund eines Hangaustrittes dort nasserem Böden zurückzuführen sein.

Generell sind bei Transekt 1 größere Abweichungen zu erwarten, da dieser in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem Knick in der Fahrspur (Kurve) liegt (Abb. 8).

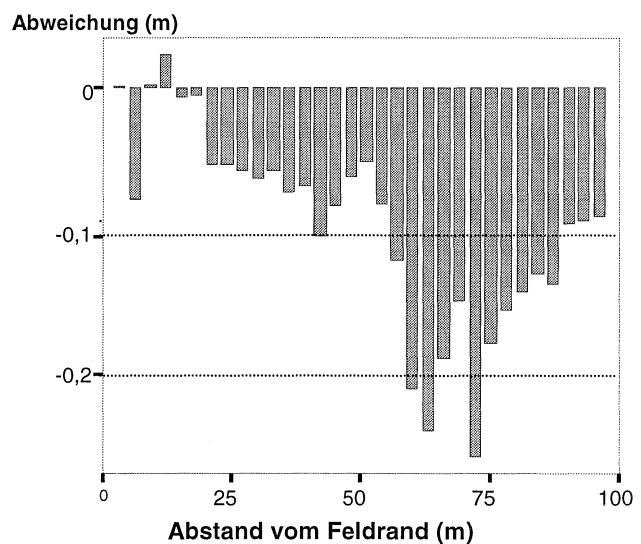


Abb.22: Abweichungen von 32 Fahrwegen in Transekt 1 während der Weizensaat

Tab6: Abweichungen der Istwerte von den Sollwerten der Fahrbahnen (Schlag A20)

	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]
Transekt 1	33	-2	39	21,5	1,8
Transekt 2	33	-1	23	8,5	1,1
Transekt 3	33	-1	15	4,7	0,67

Tab. 7: Abweichungen der Istwerte von den durch die Hangneigungskorrektur entstandenen Erwartungswerten (Schlag A20)

	HN [%]	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]
Transekt 1	14-7	33	-26	2	-9,7	1,3
Transekt 2	8,5	33	-21	2	-7,0	1,3
Transekt 3	4	33	-5	5	-0,20	0,51

Die Abweichungen benachbarter Spuren betragen 0,5 bis 1cm und liegen damit im Bereich des Messfehlers, in 85 bis 100% der Fälle wird ein Band von +- 5cm nicht verlassen (Tab. 4). Die geringen relativen Abweichungen unterstützen die These, dass die Lageabweichungen auf die Hangabtrift zurückzuführen sind.

Tab. 8: Abweichungen von der Nachbarspur (Schlag A20)

	HN [%]	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]	<=5cm [%]
Transekt 1	14-7	32	-10	11	1,1	0,74	85
Transekt 2	8,5	32	-9	8	0,75	0,74	79
Transekt 3	4	32	-3	4	0,47	0,41	100

4.2.2 Ergebnisse Kartoffelacker:

Die Fahrbahn bei der Befahrung auf A18 war im Gegensatz zu A20 eben (unbearbeitetes Stoppfeld) und die Böden waren trocken. Eingesetzt wurde ein leistungsfähiger Schlepper mit angebautem Häufelgrubber, der mit einer Vorfahrtgeschwindigkeit von ca. 7km/h ca. 22cm tief arbeitete. Bei 5-8% Seitenhang und einem Bearbeitungsgerät, das den Boden relativ hoch hebt und damit den Boden beim Zurückfallen relativ weit hangabwärts versetzt, kamen die Dämme relativ weit hangab zu liegen. Die nötige zweite Bearbeitung war damit

auf den geplanten Fahrwegen nicht möglich. Diese Bearbeitung hat die Dämme wiederum hangabwärts gedrückt. Gemessen werden konnte die Summe dieser Effekte. So ist es nicht überraschend, dass die Dammkronen im Mittel von Transekten 9 bis 20cm zu weit hangab liegen (Tab. 6), wobei die geringen Standardfehler auf die Stabilität der Messwerte hinweisen. Dagegen sind die Fehler beim Anschlussfahren ausgesprochen niedrig, nur bei Transekt 4 liegen 6% der Werte bei einer Abweichung von mehr als 10cm (Tab. 7). Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass die Mitte der Dammkrone, an der die Messung ansetzt, nicht exakt zu definieren war und deshalb größere Messfehler auftreten.

Tab9: Abweichungen der Istwerte von den Sollwerten der Fahrbahnen [cm] (Schlag A18)

	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]
Transekt 4	33	-10	11	0,06	1,1
Transekt 5	33	-25	0	-14	1,3
Transekt 6	33	-5	18	6,5	1,1

Tab. 10: Abweichungen der Istwerte von den durch die Hangneigungskorrektur entstandenen Erwartungswerten [cm] (Schlag A18)

	HN [%]	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]
Transekt 4	8	32	-38	8	-16	2,3
Transekt 5	5	32	-32	-3	-20	1,6
Transekt 6	8	32	-25	11	-9,1	1,7

Tab. 11: Abweichungen der Istwerte von den Istwerten der Nachbarspuren [cm] (Schlag A18)

	HN [%]	n	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittelwert [cm]	Stand.fehler [cm]	<=10cm [%]
Transekt 4	8	32	-11	10	-0,6	0,91	94
Transekt 5	5	32	-8	10	-0,2	0,75	100
Transekt 6	8	32	-8	10	0,4	0,79	100

4.2.3 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Fehler bei den Anschlüssen der durch die Bearbeitung entstandenen Getreidebestände bzw. Kartoffeldämme liegen im Bereich von 1cm und damit im Bereich des Messfehlers. Die Einheit autonomer Schlepper-Gerät verhält sich stabil. Dies gilt auch am Hang, wo sich stabile Abtriftwerte einstellen. Diese Genauigkeit reicht für die Feldarbeiten Säen und Anlegen von Kartoffeldämmen gut aus.

Die Lage der gefahrenen Wege weicht z.T. stärker von den geplanten Wegen ab. Dies kann zu Problemen führen, wenn für die Folgefahrten die ursprünglich geplanten Wege genutzt werden und eine exakte Nacharbeit in Fahrspuren oder Reihenkulturen nötig ist.

Weil am Hang die angebauten Arbeitsgeräte gegenüber dem Schlepper hangabwärts abtreiben, ergibt sich theoretisch ein paralleler Versatz aller Fahrbahnen zur Talseite hin. Verändert sich die Hangneigung orthogonal zur Fahrtrichtung oder die Masse des bearbeiteten Bodens, so verändern sich die Abstände zur Anschlussfahrt.

Dem Effekt der Hangabtrift wirkt tendenziell entgegen, dass der Hangeinfluss und die längere Abwicklung an der Bodenoberfläche bei der Planung der Fahrwege nicht berücksichtigt wird, wodurch sich zu große Abstände der parallelen Fahrbahnen ergeben.

Folgende Vorgehensweise wird zur Optimierung der Arbeit einer Kombination aus autonomem Traktor mit Arbeitsgerät am Hang vorgeschlagen:

1. Bei der Planung der Fahrwege wird die Abwicklungslänge an der Oberfläche berücksichtigt. Dies setzt eine dreidimensionale Planung mit DGM voraus. Die z-Koordinaten könnten gewonnen werden, indem der Schlepper zusammen mit einer ersten Arbeitsfahrt die Koordinaten erfasst. Die Datengüte reicht hierfür aus.
2. Eine vorausschauende planerische Berücksichtigung der Abtrift erscheint kaum möglich, da neben der Hangneigung weitere, nicht exakt vorhersagbare Einflüsse wirken. Es verbleibt als einzige funktionelle Möglichkeit, die Verbindung Traktor-Gerät (im Arbeitsmodus) starr und exakt schleppermittig auszubilden und die Steuerung auf die Ebene auszurichten, in der der bleibende Arbeitseffekt erzeugt wird (z.B. Auslauf der Säscharre), wie es Larsen et al. (1994) fordern. Die Antenne könnte dabei auf dem Traktor verbleiben. Es wird anerkannt, dass damit die mechanische Belastung für die Geräte und den Traktor steigen.
3. Für Verfahren, wo nach der Aussaat bzw. dem Pflanzen lediglich Arbeitsgänge mit der Feldspritze und dem Düngerstreuer folgen, könnten die Fahrspuren beim auf die Saat folgenden Arbeitsgang abgefahren und die Fahrwege mit dem System AGRO NAV zurückgeschrieben werden, um bei weiteren Arbeitsgängen verwendet zu werden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das System AGRO NAV ist bei dem gewählten Einbau in einen handelsüblichen Traktor MF4255 offensichtlich in der Lage, den Traktor mit einer Genauigkeit von im Mittel besser als $\pm 2,5\text{cm}$ bei Extremwerten von $\pm 6\text{cm}$ zu führen. Bei den Testfahrten traten einige Unstimmigkeiten (Zeit-offset, häufiger Ausfall der Lenkung, räumlicher paralleler offset, der dem Kippen der Kabine zugeschrieben wurde), die aber leicht abzustellen sein sollten. Das System ist stabil und zeigt keinerlei Drift über die Zeit. Als problematisch wird angesehen, dass die Antenne recht hoch sitzt, wodurch vor allem Wankbewegungen eine für die Ortungsgenauigkeit großen Einfluss bekommen und exakt herausgerechnet werden müssen. Die Problematik des Fahrens an einem Querhang scheint für die Zielfläche Schlepperhinterachse gelöst zu sein. Die Hangabtrift von angebauten oder angehängten Geräten und die dadurch fehlerhafte Lage von z.B. Säreihen gegenüber der geplanten Lage wurde bisher nicht berücksichtigt. Für einen von der Fa. GEO TEC vorgesehenen universellen Einsatz für übliche Feldarbeiten ist dies jedoch unbedingt nötig. Für diesen Einsatz ist der Traktor somit nicht geeignet.

Die Möglichkeiten, die das System AGRO NAV bietet, können im Bereich von Spezialanwendungen sehr interessante Rationalisierungseffekte bringen, insbesondere dort, wo auf relativ langsam fahrenden Arbeitsmaschinen – die sich bekanntermaßen von Menschen nicht über längere Zeit exakt steuern lassen - mehrere Personen tätig sind und damit auch die Überwachung der Maschine übernehmen können. So setzt ein holländischer Gemüsebauer diese Technik zum Pflanzen, Pflegen und Ernten ein, und Versuchsansteller steuern damit ihre selbstfahrende Sämaschine. In diesen Bereichen, in denen es auf sehr hohe Präzision ankommt, die Menschen nicht über längere Zeit halten können, werden Chancen dieser Technologie gesehen. Hierfür sind aber wohl kaum die derzeit üblichen Standardschlepper das Trägerfahrzeug der Wahl, sondern viel eher vierradgesteuerte vollhydraulische Porter ohne oder zumindest ohne aufwändige Kabine.

Ein weitergehendes Konzept, das Blackmore et al. (2002) vorstellt, ist der Einsatz sog. beetles. Diese Kleinmaschinen (ca. 1m) sollen genügend Leistung für die durchzuführende Arbeit haben, aber auch in bearbeitetem Gelände mobil bleiben. Diese beetles sind hoch spezialisiert. Damit könnten Bodenverdichtungen drastisch reduziert werden und kleine Teilflächen spezifisch bewirtschaftet werden.

6. Zusammenfassung:

Das System autonome Führungssystem AGRO NAV wurde in einen Standardschlepper MF4255 eingebaut. Dieser wurde dazu mit RTK dGPS, einer IMU mit FOG und einem Bordrechner ausgestattet, der die zusätzlichen Aktuatoren ansteuert. Mit diesem Traktor wurde in Dürnast bei verschiedenen Geschwindigkeiten eine geteerte Teststrecke abgefahren. Als Referenzsystem wurde ein unabhängiges RTK GPS eingesetzt. Die gemessene Genauigkeit lag im Bereich $\pm 15\text{mm}$ bei max. Abweichungen von 90mm, dürfte aber tatsächlich noch höher sein, da kurzzeitige Wankbewegungen, die sich in der Höhe des Schlepperdaches viel stärker auswirken als auf der Bodenoberfläche, mit dem Referenzsystem nicht herausgerechnet werden konnten. Beim praktischen Einsatz auf dem Acker bestätigte sich die hohe Fahrgenauigkeit des Traktors und die Stabilität des Systems. Allerdings trat am Seitenhang eine Abdrift der Anbaugeräte auf, die vom System nicht berücksichtigt wird, wodurch die Saatzeilen z.T. 20cm Abweichung vom geplanten Standort haben. Autonome Folgearbeiten sind somit erst nach Erfassung der Lage möglich.

Das System kann seine Vorteile wohl am besten dort ausspielen, wo sehr hohe Präzision gefordert ist: in der Versuchstechnik, bei Gemüsebaubetrieben, in Baumschulen etc. Weitergehende Konzepte schlagen die Entwicklung von kleinen, spezialisierten, autonomen „beetles“ vor, die am besten so klein sind, dass sie zwischen den Maisreihen arbeiten können. Dass sich der autonome Standardschlepper sich in der üblichen Landwirtschaft stärker verbreiten wird, muss bezweifelt werden.

6. Literatur:

1. Bell, T. (2000): automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 25, 53-66.
2. Billingsley, J.; Schoenfish, M. (1997): The successful development guidance systems for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 16, 147-163.
3. Bittner, G.; Freimann, R. (2000): AGRO NAV® Autonomous, off-road Vehicle Navigation and Implement Control System, using CDGPS and Inertial Backup. Paper AgEng 0359.
4. Blackmore, S.; Have, H.; Fountas, S. (2002): A specification of behavioural requirements for an autonomous tractor. *Proc. Conf. Chicago, Ill.* 33-42.
5. Demmel, M. 2001: Kommen die Roboter für den Acker? *DLZ-Traktorenheft*, 32-35.
6. Dickson, M.A.; Ni, B.; Han, S. (2001): Tracking improvement for a vision guidance system. U.S. Patent, No. 6,285,930.
7. Freimann, R. (2000): Investigation of Position Accuracy of an Autonomous, Off-road Vehicle Navigation. Paper AgEng 0359-2.
8. Han, S.; Dickson, M.A.; Ni, B.; Reid, J.F. ; Zhang, Q. (2002): A robust procedure to obtain a guidance directrix for vision-based vehicle guidance systems. *Proc. ASAE, Chicago, Ill.*, 317-326.
9. Hilton, D.J.; Chestney, A.W. 1973: Low-cost self-steering devices for out-of-farrow ploughing. *The Agricultural Engineer*, 28(3): 102-106.
10. Julian, A.P. 1971: design and performance of a steering control system for agricultural tractors. *J. Agric. Eng. Res.*, 16(3): 324-336.
11. Kelsey, T.W. 1992: The economic cost of farm tractor rollover deaths in New York. *The J. Of Rural Health*. 8, (2).
12. Larsen, W.E.; Nielsen, G.A.; Tyler D.A. (1994): Precision navigation with GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, 85-95.
13. Marchant, J.A.; Hague, T., Tillet, N.D. (1997): Row-following accuracy of an autonomous vision guided agricultural vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 16, 165-175.
14. Matsuo, Y., Yukumoto, O.; Noguchi, N. (1998): Navigation systems and work performance of tillage robot. Paper ASAE No. 982192.
15. Matsuo, Y.; Yamamoto, S.; Yukumoto, O. (2002): Development of tilling robot and operation software. *Proc. Conf. Chicago, Ill.* 184-189.
16. Mitsushima, A.; Noguchi, N.; Ishii, K.; Terao, H. (2002): Automatic navigation of the agricultural vehicle by the geomagnetic direction sensor and gyroscope. *Proc. Conf. Chicago, Ill.* 204-211.
17. Nagasaka, Y.; Umeda, N.; Kanetani, Y. (2002): Automated rice transplanter with GOS and FOG. *Proc. Conf. Chicago, Ill.* 190-195.
18. Nieminen, T.; Sampo, M.; Mononen, J. (1996): Development of a control system for autonomous agricultural vehicles. *AgEng96*, Paper 96A-094.