

GPS-gestützte Ortung in der Landtechnik

von

C. Seebauer¹, H. Auernhammer², M. Demmel², T. Muhr³, R. Weigel¹

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik

² Technische Universität München, Institut für Landtechnik

³ Geo-Konzept GmbH, Wittenfeld

Zusammenfassung

In der modernen Landtechnik werden zuverlässige Ortungsverfahren mit Genauigkeiten im Meterbereich benötigt. Mehrere im bayerischen Adelschlag bei Eichstätt auf einer von Wald umgebenen Versuchfläche durchgeführte Versuchsreihen zeigen die beim Einsatz des *Differential Global Positioning Systems* (DGPS) in schwierigem Gelände und unter ungünstigen Witterungsbedingungen auftretenden Abschattungsproblemstellungen auf. Es wurden DGPS-Fahrspuren im dynamischen Betrieb bei einer Vehikelgeschwindigkeit von 8 m/s aufgezeichnet. Um die exakten Positionsabweichungen bestimmen zu können, wurde ein Ibeo-Lasertracker der Deutschen Flugsicherung mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich als unabhängiges Referenzsystem eingesetzt. In weiteren Meßkampagnen wurde gezeigt, daß der DGPS-Kurs durch eine bordautonome Koppelortung (Magnetkompaß und Radsensorik) gestützt und damit die Zuverlässigkeit der Ortung wesentlich verbessert werden kann.

Abstract

Precision farming requires reliable and precise position data. Although the *Differential Global Positioning System* (DGPS) has proven its feasibility in non-obstructed areas, the performance of the DGPS system is often degraded in typical agricultural situations such as when operating near forests and on steep hills. Therefore, backup systems are required for when using DGPS. In fall 1994, intensive measurement campaigns were conducted on the accuracy of DGPS. Several dead reckoning systems were examined for their suitability to provide DGPS systems with the necessary backup in situations of poor signal reception conditions. An automatic laser-based tracking system was used as a reference.

1. Einleitung

In der modernen Landtechnik wird zunehmend das Ziel verfolgt, die Flächen aus umwelt- und marktwirtschaftlichen Gründen georeferenziert zu bewirtschaften. Das wesentliche Arbeitsmittel ist dabei der Traktor (auch Zugmaschine, Schlepper oder sehr treffend *Bulldog* genannt) in Verbindung mit Mähwerken, Heuwendern und Erntemaschinen. Die Bodenbeschaffenheit und somit die Ertragsqualität variieren bereits innerhalb kleiner Flächen. Die differenzielle Erfassung wichtiger landtechnischer Parameter eines zu bearbeitenden landwirtschaftlichen Schlages (Ertragsgüte, Schädlingsbefall usw.) und die Steuerung von Arbeitsabläufen wie zum Beispiel eine punktgenaue und bedarfsgerechte Ausbringung des Düngers, Saatguts oder Pflanzenschutzmittels verlangen deshalb ein unabhängiges Ortungssystem mit Ortungsgenauigkeiten im Bereich einiger Meter bis hinab zu 50 cm. Ein weiterer Gesichtspunkt für eine notwendige präzise Kenntnis der vollständigen Fahrbewegungen der Zugmaschine sind die für die landtechnischen Arbeiten aufgewendeten Zeiten, aus denen die für die Abrechnung von Lohnarbeit oder die Inanspruchnahme eines Maschinenrings benötigten Daten erstellt werden können.

Die orbitale Triangulation mit NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System*) bietet entscheidende Vorteile wie weltweite Verfügbarkeit absoluter Raumkoordinaten, Wetterunabhängigkeit, hohe Genauigkeit und kostengünstige Realisierbarkeit. Der Einsatz differenzieller GPS-Systeme (DGPS-Systeme) ermöglicht unter idealen Bedingungen im freien Gelände eine ausreichend hohe Ortungsgenauigkeit und Zuverlässigkeit [1,2].

In realen landtechnischen Anwendungen tragen jedoch verschiedene Faktoren dazu bei, daß die potentielle Genauigkeit des DGPS-Satellitenortungssystems nicht voll ausgenutzt werden kann [3-6]. Zum einen setzen viele Anwendungen einen dynamischen Betrieb mit mobilen Fahrzeugen voraus. Die Genauigkeit des Ortungssystems muß daher auch bei den üblichen Arbeitsgeschwindigkeiten gewährleistet sein. Zum anderen wird die Ortungsgüte in der Landtechnik stark durch insbesondere an Waldrändern und in hügeligem Gelände auftretende Signalabschattungen beeinflusst, da hier die Sichtverbindung zu einzelnen Satelliten gestört sein kann. Eine Untersuchung der erreichbaren Genauigkeiten ist deshalb unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten nur dann aussagekräftig, wenn sie beiden Kriterien Rechnung trägt. Im folgenden soll deshalb die Ortungsgenauigkeit eines DGPS-Systems im dynamischen Betrieb untersucht werden. Von Interesse sind dabei die Positionsabweichungen in einem von Wald umgebenen Testgebiet in der Nähe von Eichstätt in Bayern. Diese Abweichungen sollen den jeweiligen tatsächlichen Koordinaten zugeordnet werden können. Erst dadurch kann die Ortungsgenauigkeit genau beurteilt werden. Für die Versuche wird deshalb ein präzises Referenzsystem benötigt. Es zeigt sich, daß durch die Stützung der DGPS-Ortung mit bordautonomen Navigationssystemen nicht nur ein Genauigkeitsergebnis erzielt werden kann, sondern daß gleichzeitig auch Ortungsausfälle in Abschattungsgebieten überbrückt werden können [7-9].

2. Versuchsgelände

Für die Versuchsreihen wurde eine Stilllegungsfläche ausgewählt, die an drei Seiten von dichtem Mischwald umgeben ist (Bild 1). Lediglich die Nordseite dieser Fläche besitzt einen freien Horizont. Das Versuchsfeld ist charakteristisch für viele landwirtschaftliche

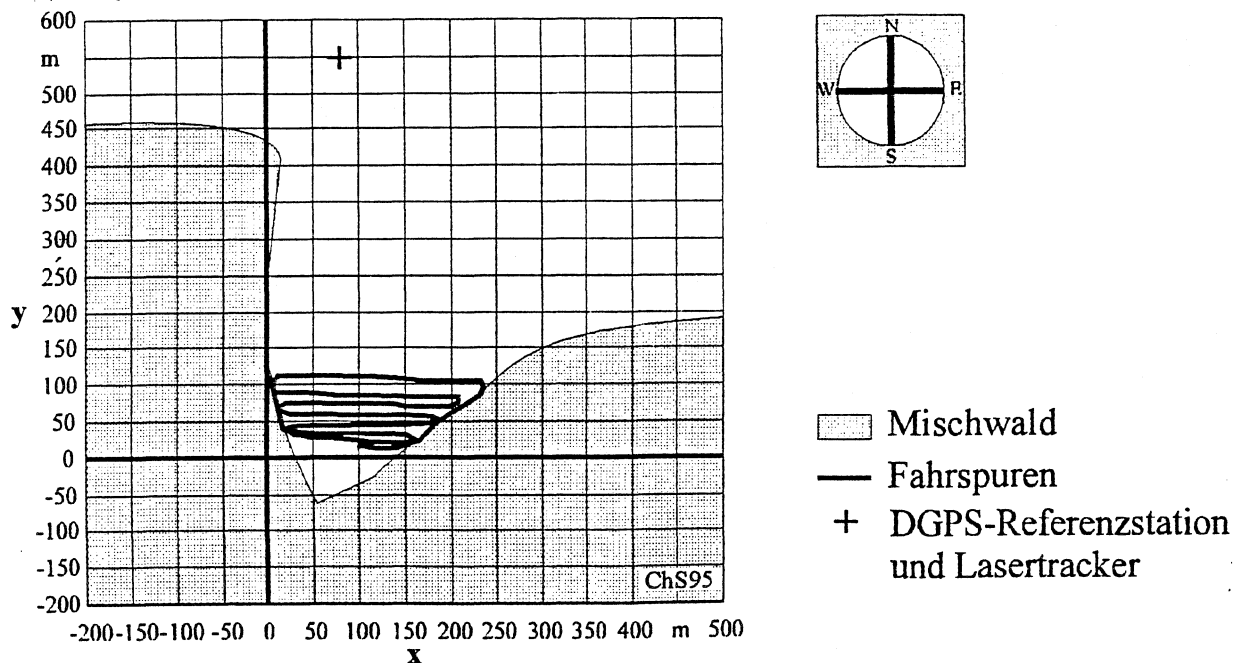


Bild 1 Versuchsgelände

Flächen, bei denen die optimale Ausnutzung der gesamten Satellitengeometrie im allgemeinen nicht möglich ist. Stellvertretend für viele Bearbeitungsformen wurden in die Stilllegungsfläche parallele Fahrspuren mit einem Abstand von etwa 12 m eingefahren. Die

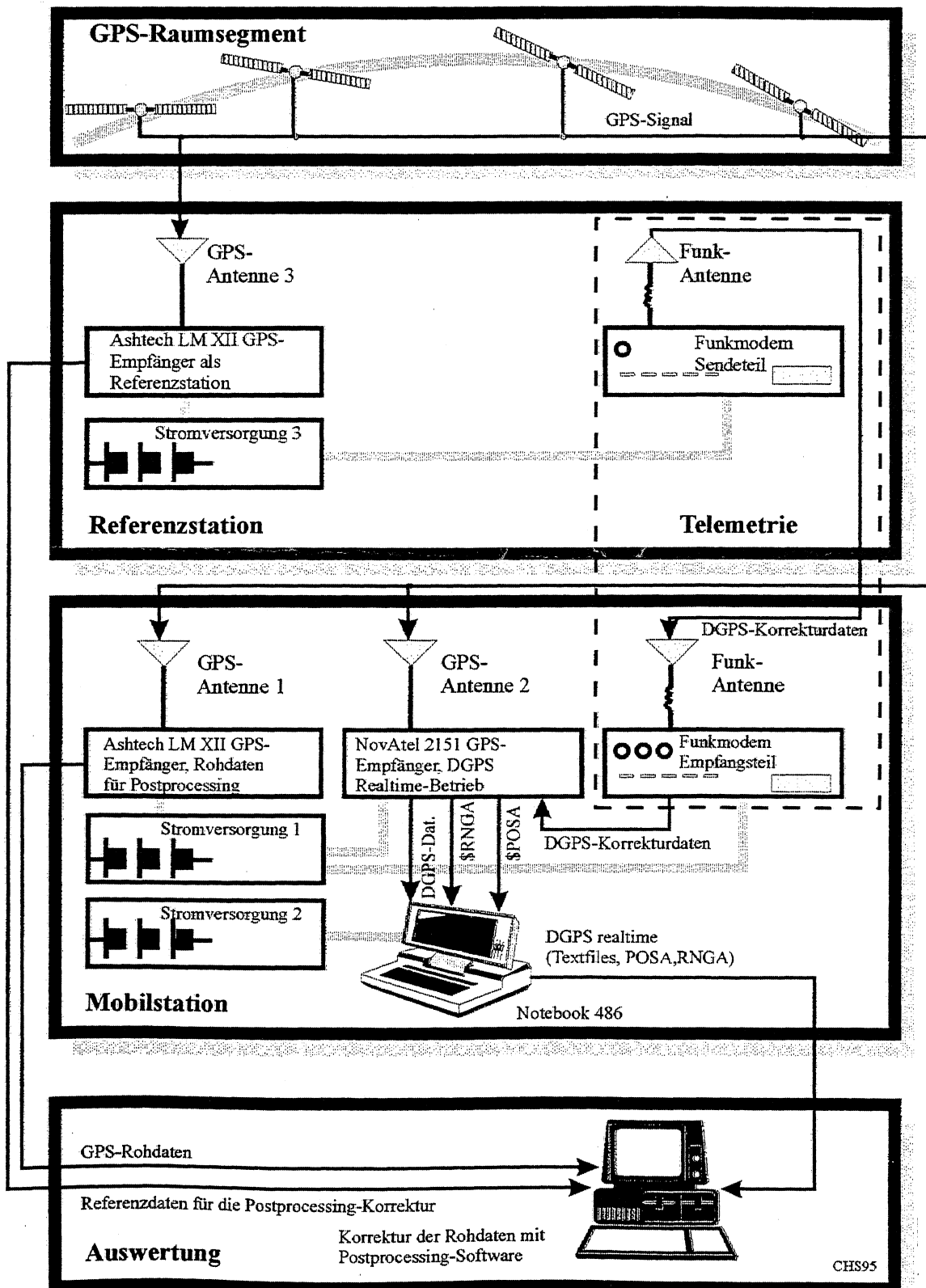


Bild 2 Schema des Versuchsaufbaus

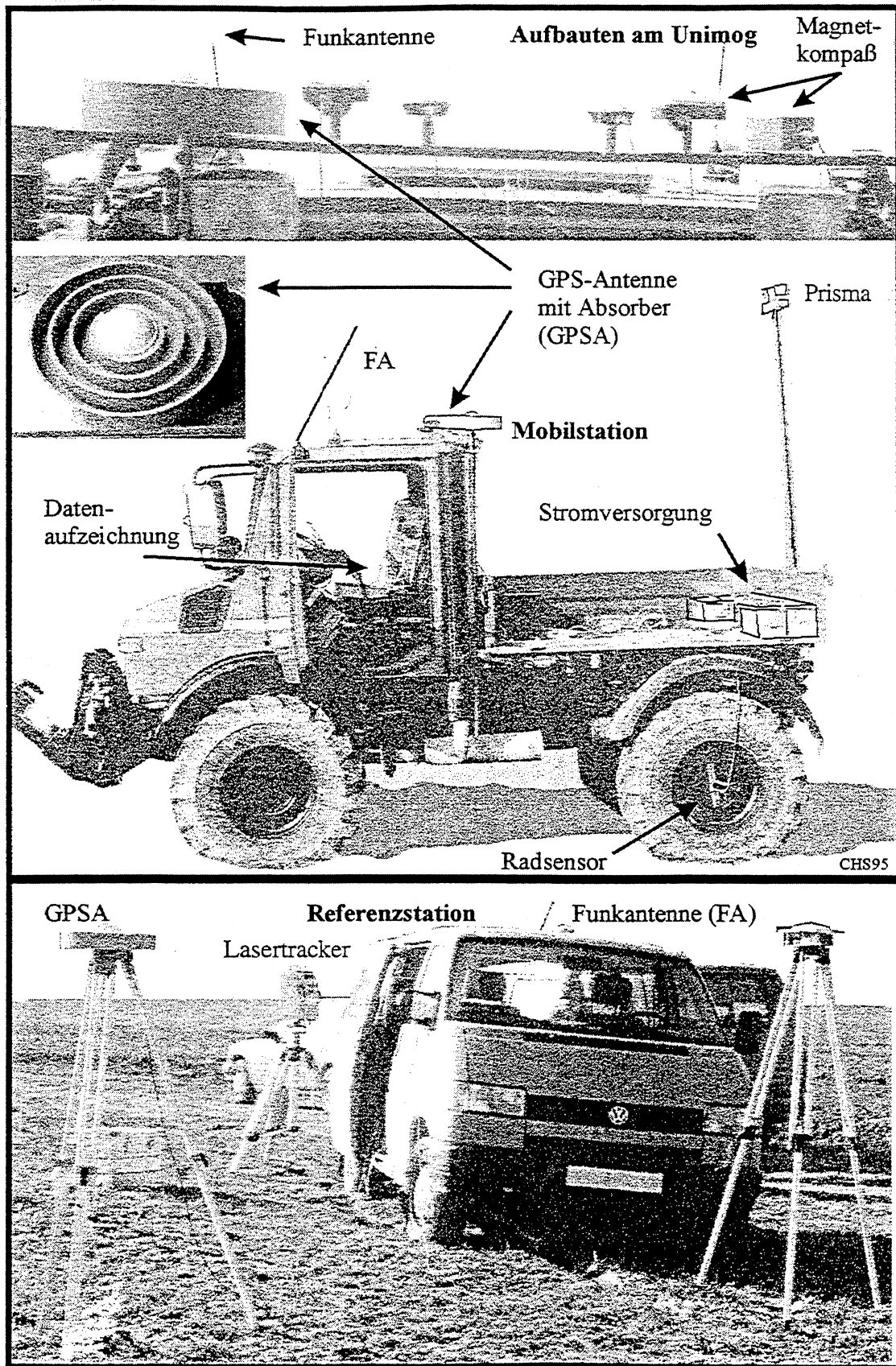


Bild 3 Foto des Versuchsaufbaus

Wendepunkte der Fahrspuren liegen unmittelbar am Waldrand. Dabei befinden sich die äußersten Punkte bereits unter Baumkronen. Bild 1 gibt die geografischen Gegebenheiten maßstabsgetreu wieder. Erkennbar sind die sieben mit einem Lasertracker aufgezeichneten Fahrspuren im Zwickel des Waldrandes. Die Fahrspuren haben eine Länge von etwa 100 m bis 200 m. Lage, Größe und Dichte des grau unterlegten Mischwaldes stellen sicher, daß deutliche Signalabschattungen auftreten und *Multipath*-Effekte keine Rolle spielen. An der Position $x = 76.60$ m, $y = 552.40$ m befinden sich der Lasertracker und die DGPS-Referenzstation. Diese Koordinaten beziehen sich auf die horizontale Drehachse des Lasertrackers.

3. Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau bestand im wesentlichen aus einer auf einem allrad-getriebenen Unimog-Fahrzeug montierten mobilen Empfangsstation und einer stationären DGPS-Referenzstation. Die Bilder 2 und 3 zeigen den Aufbau schematisch beziehungsweise als Foto. Es wurden insgesamt sechs verschiedene DGPS-Empfänger von fünf Herstellern sowohl im *Realtime*-Betrieb als auch im *Postprocessing-Mode* bei Taktraten von etwa 2 Hz eingesetzt. Dabei wurden die DGPS-Korrektursignale (RTCM) von zwei unterschiedlichen Referenzstationen über eine UHF-Telemetrie zur Verfügung gestellt.

Als landtechnische Zugmaschine wurde in den Versuchen ein allrad-getriebener Unimog eingesetzt. Auf der Ladefläche war die externe Stromversorgung und ein Mast mit den Laserprismen untergebracht. Komponenten wie DGPS-Empfänger, PC's und Aufzeichnungsgeräte waren in der Fahrerkabine untergebracht. An den beiden hinteren Rädern befanden sich zwei inkrementale Radsensoren mit einem Auflösungsvermögen von 720 Pulsen pro Umdrehung. Getaktet wurde die Radsensorik im Versuch ebenfalls mit 10 Hz. Eine zusätzliche Richtungsinformation wurde von einem bordautonomen Magnetkompaßsystem mit einer Taktrate von 5 Hz aufgezeichnet.

Als Referenz für die Positionsangaben des DGPS-Systems diente ein zusätzlicher Ibeo-Lasertracker der Deutschen Flugsicherung mit einer Informationstaktrate von 10 Hz, wie er beim Instrumentenanflug von Flugzeugen (ILS) verwendet wird. Die Lasertriangulation basiert auf einem gepulsten Laser, der dem Fahrzeug auf einem servogetriebenen Stativ selbstfolgend nachgeführt wurde. Die relative Position bezogen auf das Vehikel ergab sich aus der Laufzeitmessung des von einem dort befestigten Prisma reflektierten Laserstrahls. Die Position des Referenzsystems sowie dessen Kalibrierung wurde mit Hilfe von stationären DGPS-Positionsbestimmungen durchgeführt. Die Positionsdaten des Lasertrackers wurden mit den UTC-Zeitangaben eines Referenz-GPS-Empfängers gekoppelt und von einem PC aufgezeichnet.

4. Versuchsergebnisse

DGPS ohne zusätzliche Backup-Systeme führt in Abschattungs-bereichen auf typische Positionsfehler. Dieses Verhalten wird bedingt durch die beständig wechselnde und ungünstige Satellitengeometrie. Zum einen sinkt hier die Anzahl der verfügbaren Satelliten. Zum anderen müssen sich die internen Filteralgorithmen häufig auf variierende Satelliten einschwingen. Bild 4 zeigt als Beispiel den mit DGPS gemessenen Kurs einer Versuchsfahrt.

Mit Hilfe des laseroptischen Referenzsystems wurde es möglich, die Positionsfehler von DGPS zu quantifizieren. Das obere Teilbild von Bild 5 zeigt als Beispiel den quadratischen Mittelwert der x, y -Koordinaten (DGPS-Positionierfehler) bei Signalabschattung und einer ungünstigen Satellitenkonstellation als Funktion der Zeit. Im unteren Teilbild ist der zugehörige mit dem Lasertracker gemessene Verlauf $x(t)$ dargestellt. Im Verlauf der Fahrspuren ist eine Zunahme der Abweichungen im unteren Waldrandbereich zu

erkennen. Die durchschnittlichen Abweichungen waren sowohl in x- als auch in y-Richtung gleich groß. Der durchschnittliche Betrag der Positionierfehler während des Versuchs war 3.18 m. Im ausgewerteten Zeitraum wiesen 97.3 % der Werte Abweichungen kleiner 6 m auf. Größere Positionsfehler waren nur vereinzelt zu beobachten. Das Fehlermaximum lag bei $t = 445$ s und 11 m.

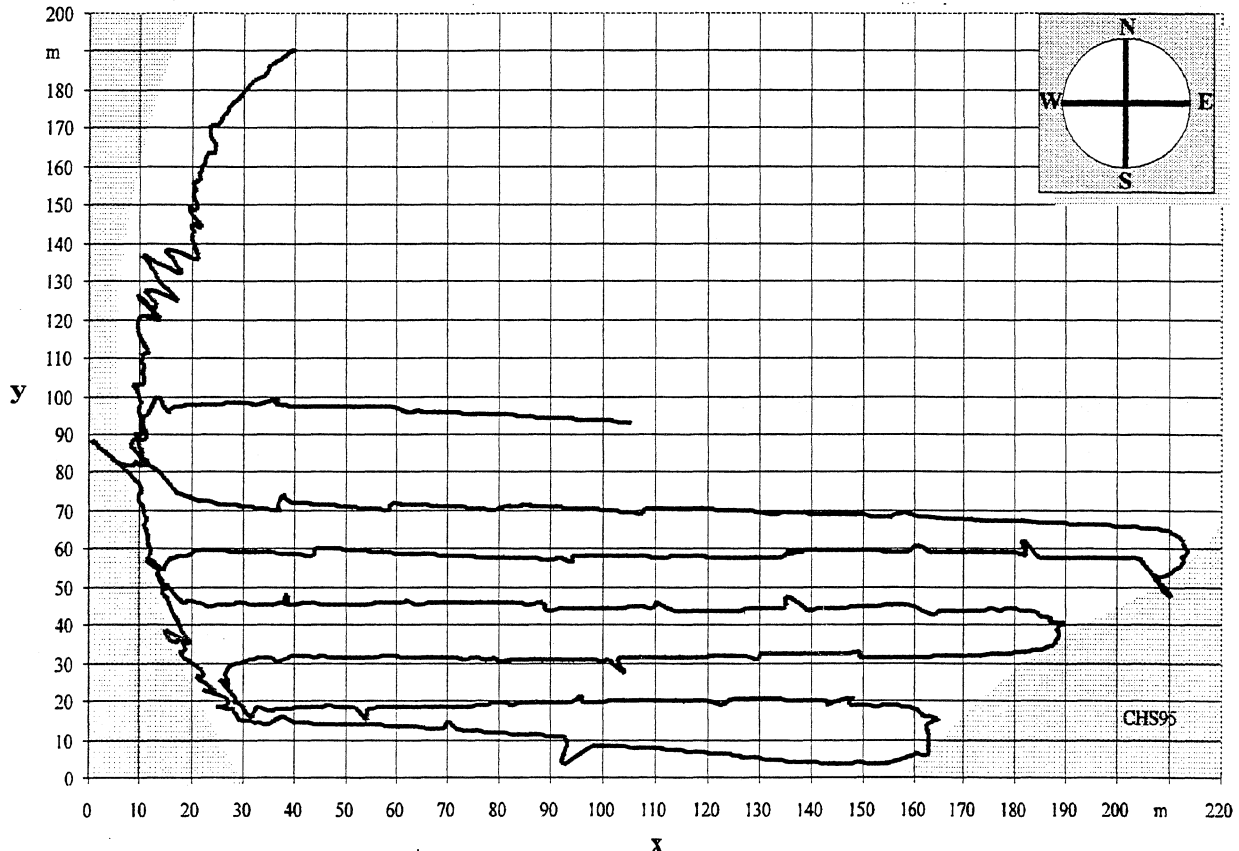


Bild 4 DGPS-Kurs

Um eine Kombination von DGPS, Radsensorik und Magnetkompaß (Koppelortung) zu realisieren, wurden folgende Überlegungen herangezogen:

- Das Backup-System (Radsensorik und Magnetkompaß) zeigt kaum statistische Ausreißer. Es liefert mit hoher Wahrscheinlichkeit einen glatten Kursverlauf. Eine Ortung nach diesem Prinzip ist jedoch nur in kurzen Abschnitten zuverlässig, da dieses Verfahren Drifterscheinungen unterliegt. Des weiteren ist die Ortung nur relativ zu einem festen Bezugspunkt möglich.
- DGPS liefert absolute Positionen, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit hinreichend genau sind. Mit diesen DGPS-Positionen kann deshalb das Backup-System ständig neu initialisiert werden. Daher liegt es nahe, eine Ortung zunächst nach dem Backup-System zu betreiben und dann die Positionen jeweils durch DGPS zu aktualisieren, wenn die DGPS-Positionsbestimmung eine sehr hohe Sicherheit aufweist. Dies kann durch den mit der Koppelortung bestimmten Kurs (Koppelkurs) in Verbindung mit einer Plausibilitätsprüfung bestimmt werden. Als aktueller Kurs gilt in diesem Beispiel der iterativ berechnete Koppelkurs, wenn die zugehörige Position betragsmäßig um weniger als 2 m von den DGPS-Koordinaten abweicht. Ist dies der Fall, können sowohl die Koordinaten des Backup-Systems, als auch die Koordinaten des Koppelkurses neu nach den DGPS-Werten initialisiert werden. Der Koppelkurs ist in diesem Fall identisch mit dem DGPS-Kurs und dem Kurs des Radsensorsystems. Ist das 2 m-Kriterium nicht erfüllt, wird von einem fehlerhaften DGPS-Kurs ausgegangen.

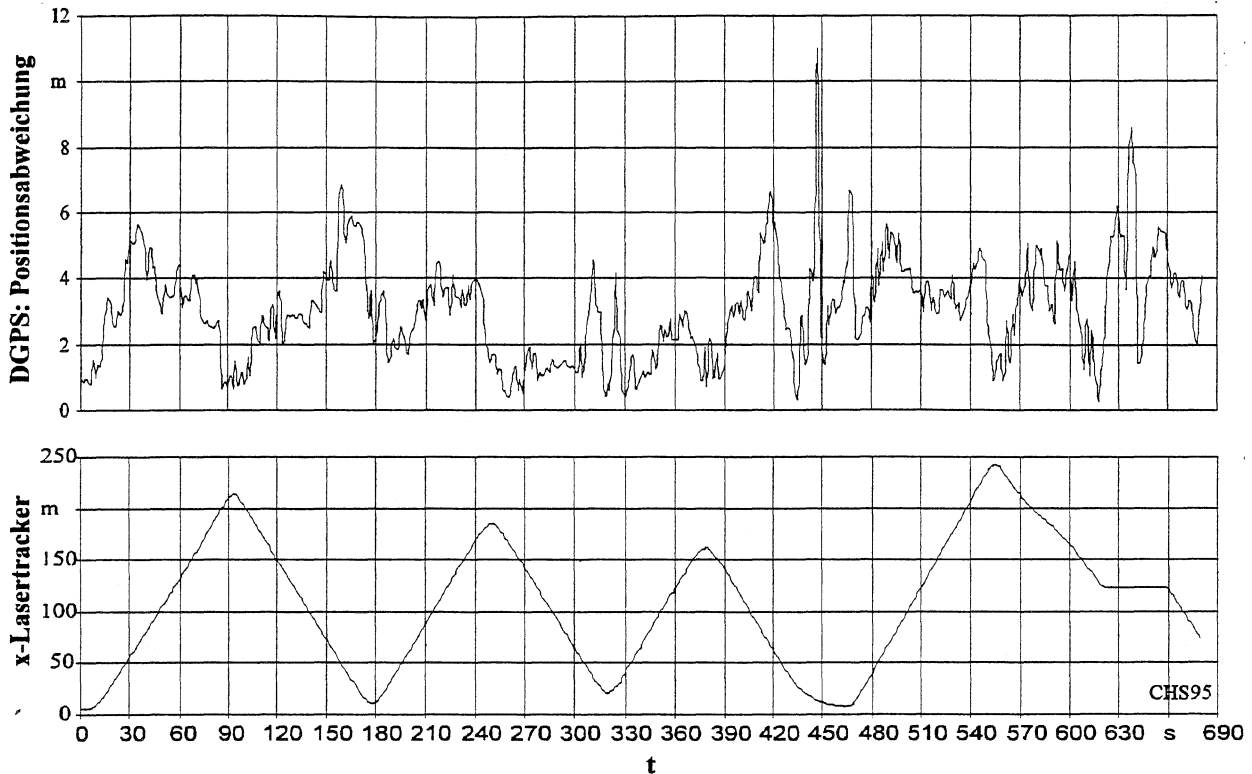


Bild 5 DGPS-Positionierfehler bei Signalabschattung

In dem im folgenden diskutierten Beispiel wurde ausschließlich nach dem Backup-System geortet, wenn in der Zwischenzeit das 2 m-Kriterium nicht erfüllt wurde. Bei der iterativen Berechnung des Koppelkurses wurde dabei folgenden Punkten Rechnung getragen:

- Das Sensorsystem kann langsam von der tatsächlichen Position abdriften. Eine alleinige Ortung nach dem Sensorsystem mußte deshalb zeitlich begrenzt werden.
- Eine automatische Initialisierung nach einer starren Zeitspanne wurde vermieden, da sonst Positionssprünge unvermeidbar sind.
- Beide Systeme entfernen sich voneinander und das 2 m-Kriterium wird ständig schwerer erfüllbar. Um eine Neuinitialisierung durch DGPS-Ausreißer zu verhindern, wurde die Gewichtung des DGPS-Kurses gegenüber dem Backup-System mit zunehmender Zeit verstärkt. Der Koppelkurs berechnete sich dabei über eine gewichtete Mittelwertbildung.

Bild 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem DGPS-Kurs mit einer Dauer von 52 s. Aufgetragen sind die x -Koordinaten der verschiedenen Kurse über der Zeit (Kurven 2–4); Kurve 1 zeigt die zugehörige relative Anzahl der iterativ berechneten Intervalle, anhand derer qualitativ verfolgt werden kann, wann und wie lange eine Iteration durchgeführt wurde. Der Koppelkurs sowie der Kurs des Backup-Systems (Sensorkurs) wurden zu Beginn (hier: $t_0 = 15$ s) auf die DGPS-Koordinaten initialisiert. Ab $t = 19$ s liefert das DGPS-System aufgrund der Signalabschattung eine Serie von schlechten Positionsangaben. Das 2 m-Kriterium ist nicht mehr erfüllt. Der Koppelkurs richtet sich während der ersten fünf Sekunden nach dem Sensorkurs, weil keine DGPS-Positionen das 2 m-Kriterium erfüllen. Ab $t = 21$ s ist zu beobachten, daß der Koppelkurs sich langsam dem DGPS-Kurs annähert. Zu einer stark gewichteten Iteration kommt es in diesem Fall aber nicht, da bei $t = 25$ s der Koppelkurs durch einen benachbarten DGPS-Wert neu initialisiert wird. Bei

$t = 45$ s weichen die DGPS-Werte ebenfalls vom Koppelkurs ab. Eine Ortung erfolgt deshalb hier wieder nach dem Sensorkurs. Etwa 2 s später ($t = 47$ s) trennen sich die beiden Kurse wieder. Plausibel scheint hier der Sensorkurs zu sein, an dem sich die Koppelortung zunächst orientiert. Der Koppelkurs wählt einen Mittelweg und bewegt sich auf die absoluten Positionen der DGPS-Ortung zu.

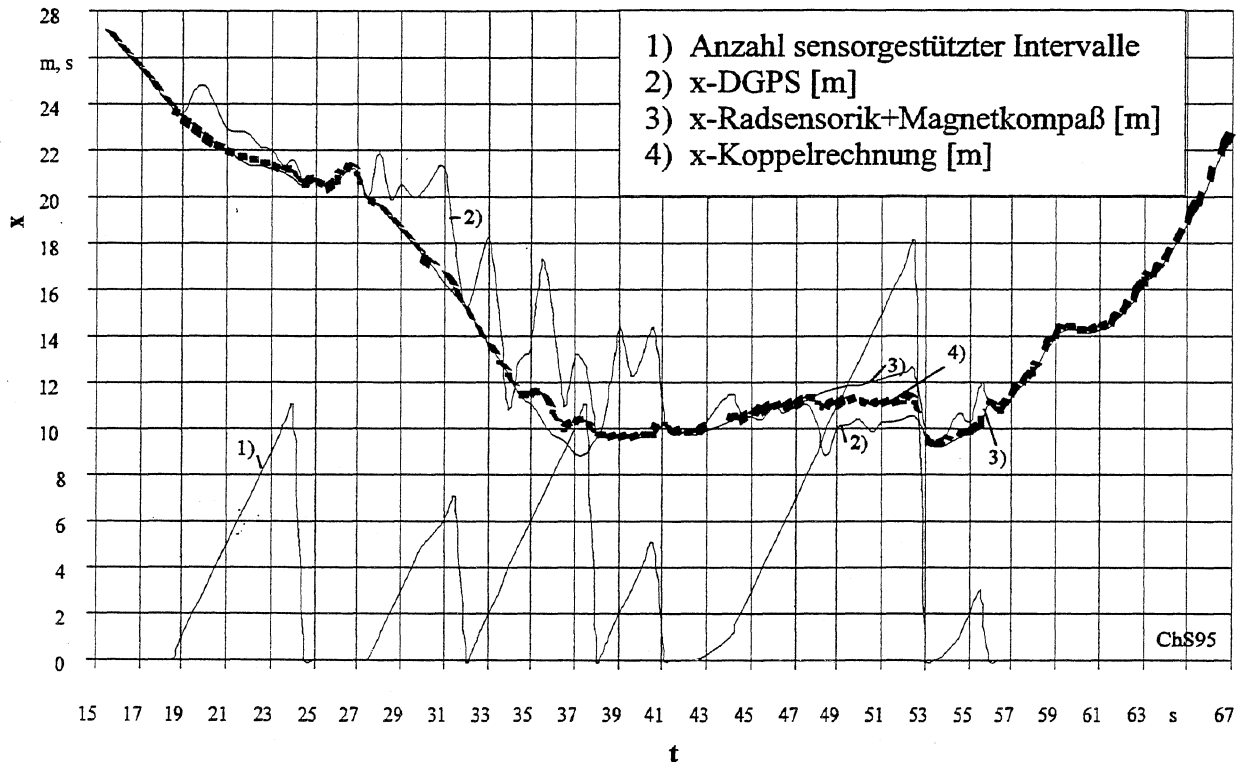


Bild 6 Koppelortung bei DGPS-Ortungssprüngen

Die erzielten Meßergebnisse demonstrieren die verbesserte Leistungsfähigkeit des hybriden Koppelortungsverfahrens, mit dem in einfacher Weise eine erhebliche Verbesserung des DGPS-Ortungsverfahrens in Bereichen einer Signalabschattung erzielt werden kann. Signalabschattung ist in der Landtechnik bei DGPS-Einsatz in schwierigem Gelände ein ernstzunehmender Störfaktor. Die Möglichkeiten, welche Koppelortungsverfahren bieten, zeigen aber hier einen Ausweg, um auch über einige Minuten hinweg in derartigen Gebieten eine hinreichend gute Ortung zu erreichen. Die Ortungsabweichungen liegen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb von 2 m. Kurzzeitige Ausfälle des DGPS-Systems (Ausfallzeiten kleiner 30 s) können sicher kompensiert werden.

5. Ausblick

Neben den in dieser Arbeit bereits angesprochenen Anwendungen von GPS-gestützten Ortungsverfahren in der Landtechnik eröffnet die georeferenzierte punktgenaue Erfassung der Positionsdaten der Zugmaschinen noch ganz andere Perspektiven. In Kombination mit modernen Traktortechniken, etwa dem stufenlosen Getriebe und dem Tempomat mit Grenzlastregelung, wie sie derzeit entwickelt werden, rückt auf großen Schlägen (etwa in den neuen Bundesländern) der satellitengesteuerte fahrerlose Traktor-Einsatz in den Bereich des Möglichen. Eine Vorprogrammierung von Fahrweg und Fahrgeschwindigkeit erlaubt unabhängig von der Motordrehzahl die geschwindigkeitsabhängige Steuerung der Arbeitsgeräte und -vorgänge. Der Bordrechner ist zugleich ein mitlaufendes Diagnosesystem. Im Falle von Betriebsstörungen kommuniziert er über Funk oder ebenfalls über eine Satellitenverbindung mit der nächstgelegenen Servicestation.

6. Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Unterstützung der Vorarbeiten zum Thema *Positioning of agricultural vehicles*. Der Deutschen Flugsicherung (DFS) wird gedankt für die Zurverfügungstellung des Lasertrucker-Systems.

7. Schrifttum

- [1] B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, K. Wild, *GPS - Theory and Practice*. Wien, Österreich, 1994
- [2] F. Schrödter, *GPS Satelliten-Navigation*. Franzis, Poing, 1994
- [3] J.V. Stafford, B. Ambler, "In-field location using GPS for spatially field operations", *Computers and Electronics in Agriculture* 11, Nr. 1, S. 23-36, 1994
- [4] J.K. Schueller, M.-W. Wang, "Spatially-variable fertilizer and pesticide applications with GPS and DGPS", *Computers and Electronics in Agriculture* 11, Nr. 1, S. 69-83, 1994
- [5] H. Delcourt, J. DeBaerdemaeker, "Soil nutrient mapping implications using GPS", *Computers and Electronics in Agriculture* 11, Nr. 1, S. 37-51, 1994
- [6] H. Auernhammer, M. Demmel, T. Muhr, "GPS and DGPS as a challenge for environment friendly agriculture", *Proceedings 3. International Conference on Land Vehicle Navigation (EURNAV'94)*, Dresden, Juni 1994, S. 81-91, 1994
- [7] C. Seebauer, *Untersuchungen zur Signalabschattung bei Einsatz eines differenziellen globalen Positioniersystems in der Landwirtschaft*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität München, 1995
- [8] C. Seebauer, *Untersuchungen zur Genauigkeit eines differenziellen globalen Positioniersystems in der Landwirtschaft*. Studienarbeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität München, 1995
- [9] T. Muhr, H. Auernhammer, M. Demmel, C. Seebauer, R. Weigel, "Dead Reckoning as Backup for DGPS-Systems in Agriculture", *Proceedings 1995 Annual International Meeting, ASAE, Chicago, Illinois, USA, Juni 1995*