

Koppelortung für landwirtschaftliche Fahrzeuge auf Basis von Radarsensoren

Dipl.-Ing. Tiemo Schwenke, Prof. Dr. Hermann Auernhammer
Technische Universität München, Institut für Landtechnik,
Am Staudengarten 2, 85356 Freising

Zusammenfassung

Trotz zunehmender Genauigkeit und Systemsicherheit muss bei GPS auch in der Zukunft mit Signalausfällen und Signalabschattungen gerechnet werden. Für diese Situation werden Koppelortungssysteme eingesetzt. Dazu fanden Untersuchungen an einem System auf Basis von 4 identischen Mikrowellensensoren (Radarsensoren) in 90°-Anordnung bzw. 3 Radarsensoren in Y-Anordnung statt. Die Tests der 90°-Anordnung weisen darauf hin, dass Kurvenfahrten aufgrund der Querempfindlichkeit der seitlich ausgerichteten Sensoren nur unzureichend erfasst werden. Im Gegensatz dazu werden durch die Y-Anordnung Geradeausfahrten und Kreisfahrten bei Feldversuchen zuverlässig gemessen. Aus den Messwerten lässt sich der zurückgelegte Fahrweg bestimmen. Prüfstandsuntersuchungen zeigen zudem, dass auch Neigungswinkelfehler, hervorgerufen durch Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeuges, aus den Messwerten berechnet und damit eliminiert werden können.

1 Einleitung

Mit der Nutzung von DGPS in der Landwirtschaft stellte sich die Frage nach der dauerhaften Verfügbarkeit und Signalqualität dieses Systems. In hügeligen Gebieten bzw. an Waldrändern kann es zur Abschattung des Satellitensignals und damit zur Verschlechterung bzw. dem Ausfall der Positionsbestimmung des Fahrzeuges kommen. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung eines Koppelortungssystems auf Basis von berührungslos arbeitenden Sensoren zur Unterstützung der Satellitenortung.

2 Stand der Technik und Anforderungen

Koppelortungssysteme, auch als Stützungssysteme bezeichnet, enthalten zusätzliche Sensoren, deren Messwerte mittels geeigneter mathematischer Algorithmen mit den Messwerten des Satellitenortungssystems verrechnet werden. Diese Redundanz der Messwertermittlung hat den Vorteil, dass bei Ausfall der Satellitenortung oder stark fehlerbehafteten Positionswerten die Fehler erkannt und durch korrekte Positionsdaten mit Hilfe der Sensoren ersetzt werden. Damit stehen weiterhin Informationen über den aktuellen Fahrweg zur Verfügung. Der letzte gültige Messwert des Satellitenortungssystems wird als Startpunkt für eine vektorielle Berechnung des Fahrweges auf Basis der Stützungssensoren verwendet.

Ein Koppelortungssystem für den mobilen Einsatz an landwirtschaftlichen Fahrzeugen muss folgenden Anforderungen genügen:

- Überbrückung der auftretenden Abschattungszeiten mit mindestens gleicher oder höherer Genauigkeit wie das Satellitenortungssystem
- zuverlässiges Arbeiten unter rauen und wechselnden Bedingungen in der Landwirtschaft (z.B. Schmutz, Nässe, Niederschlag, Temperaturschwankungen etc.)
- hohe Lebensdauer bei günstigem Kosten/Nutzenverhältnis
- Erfassung von Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeuges zur Korrektur von Positionsfehlern bei den üblicherweise sehr hoch angebrachten Satellitenempfangsantennen

Zur schlupffreien Messung muss ein Stützungssensor die berührungslose Messung über Grund beherrschen. Zu den Sensoren, die diesen Kriterien entsprechen und am Markt verfügbar sind, zählen inertielle Sensoren und Systeme, optische Sensoren, Laser-Doppler-Sensoren, Mikrowellen-Doppler-Sensoren (Radarsensoren) und Ultraschall-Doppler-Sensoren. Derzeit existieren Koppelortungssysteme, die neben einem DGPS-Empfänger auch inertielle Sensoren (Beschleunigungssensoren und Vibrationsgyroskope) enthalten, wie z.B. die NAV 846 DGPS-Empfängereinheit der Fa. elektronik-labor CARLS.

Optische Sensoren und Laser-Doppler-Sensoren scheiden wegen ihrer Anfälligkeit gegenüber Nässe und Schmutz aus. Untersuchungen mit einem inertialen System auf Basis von piezoelektronischen Vibrationsgyroskopen als Koppelortungssystem für GPS wurden in [1] beschrieben. Die Versuchsergebnisse beziehen sich auf Fahrten in geraden Fahrspuren, die jedoch nur einen Teil der tatsächlichen Feldarbeit berücksichtigen. Mathematische Filter bieten die Möglichkeit der Kompensation von Ortungsausfällen in geradlinigen Fahrspuren. Bei Wendemanövern sind diese Verfahren aufgrund des sich ständig ändernden Richtungsvektor nicht anwendbar. Detailliertere Untersuchungen mechanischer Beschleunigungsmesser, mechanischer Kreisel und optischer Kreisel sind in [3] beschrieben. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass die Trennung von kinematischer und gravitativer Beschleunigung problematisch ist. Inertielle Systeme, die den gestellten Anforderungen genügen, scheiden wegen ihres hohen Anschaffungspreises aus. Bei Ultraschall-Doppler-Sensoren wirken sich Effekte des Ausbreitungsmediums wie Fahrtwind und Wirbelbildung auf die Ausbreitung der Ultraschallwelle aus. Signifikante Beeinträchtigungen treten dann auf, wenn die Windgeschwindigkeit in der Größenordnung der Fahrgeschwindigkeit liegt [2]. Die Autoren empfehlen stattdessen den Mikrowellen-Doppler-Sensor, dessen Messungen durch das Medium Luft nicht beeinflusst werden. Zudem sind derzeit schon viele landwirtschaftliche Fahrzeuge mit einem Mikrowellen-Doppler-Sensor zur Geschwindigkeitsmessung ausgestattet.

3 Versuchsanordnung

Ausgehend von der bekannten Janus-Anordnung wurden 4 Radarsensoren (Vansco TGSS Modell 338000) in einer gekreuzten Janus-Anordnung, der sogenannten 90°-Sensoranordnung, montiert. Das erste Janus-Paar bilden Sensor *V* in x-Richtung und Sensor *H* in entgegengesetzter Richtung. Orthogonal dazu ist ein weiteres Paar in Janus-Anordnung, bestehend aus Sensor *L* in y-Richtung und Sensor *R* mit gegensätzlicher Ausrichtung, angebracht (Abb. 1). Der paarweise Einsatz der

Sensoren ermöglicht die Kompensation von Neigungswinkelfehlern, die aus Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeuges resultieren [4]. Alle Sensoren messen die Geschwindigkeit über Grund unter einem, vom Hersteller vorgeschriebenen Abstrahlwinkel α zur horizontalen xy-Ebene.

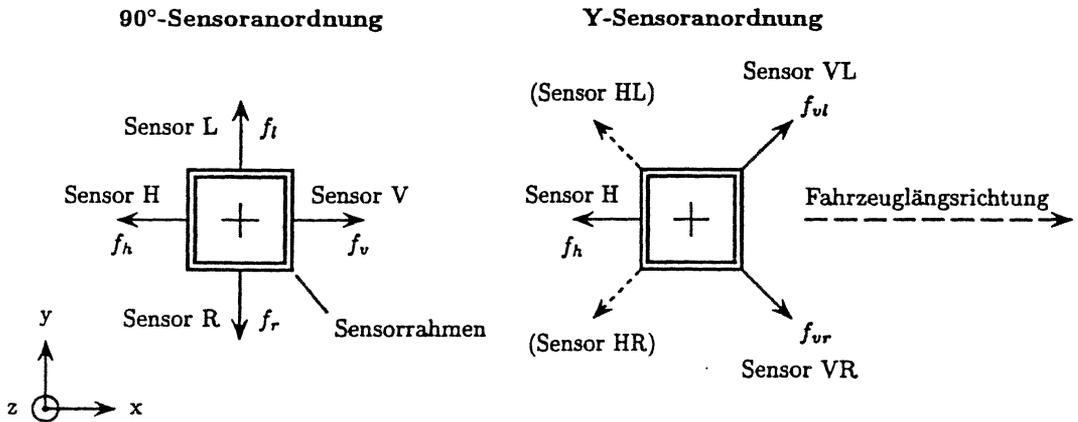


Abbildung 1: Lage der Sensoren

Untersuchungen dieser Konfiguration deckten Unzulänglichkeiten bei der Detektion von Kurvenfahrten auf. Die auftretenden Fehler bei der Messung der Geschwindigkeitskomponente quer zur Fahrzeuginnenachse durch die Sensoren R und L resultieren aus der teilweisen Erfassung der Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung [5]. Alternativ zur 90°-Sensoranordnung wurden die Sensoren in einer Y-Anordnung befestigt. Diese hatte ihren Ursprung in einer 45°-Sensoranordnung, welche statt dem Sensor H die Sensoren HR und HL enthielt. Bei der 45°-Sensoranordnung kann es bei Fahrten im Bestand zu Fehlmessungen kommen. Die Y-Anordnung hingegen gewährleistet durch die Ausrichtung von Sensor H in der Fahrgasse die dauerhafte Verfügbarkeit eines Geschwindigkeitssignals.

Die Tests der einzelnen Konfigurationen fanden in einem xy-Prüfstand sowie in Feldversuchen statt. Vorteile der Prüfstandsuntersuchungen gegenüber den Feldversuchen sind die identischen Rahmenbedingungen für alle Versuche mit Genauigkeiten von 1 cm in x-Richtung und 1 mm in y-Richtung sowie die exakte Definition des Fahrverlaufs mit hoher Reproduzierbarkeit durch eine programmierbare Schnittstelle zur Steuerung des Versuchsablaufs. Bei Prüfstandsversuchen sind ungewollte Fahrzeugbewegungen wie Nicken oder Wanken ausgeschlossen bzw. können gesondert untersucht werden [4, 5].

Die Feldversuche wurden an 3 verschiedenen Standorten durchgeführt, wobei Geradeausfahrten und Kreisfahrten auf Asphalt und auf einer Wiese zum Versuchsprogramm zählten. Abbildung 2 zeigt die Versuchsanordnung mit Traktor inkl. Messkabine, Satellitenortungssystem und Referenzsystem. Der Rahmen mit den Radarsensoren ist an der Unterseite der Messkabine montiert. Mittelpunkt des Sensorrahmens, DGPS-Antenne und Trackerprisma des Referenzsystems (360°-Prisma) liegen auf einer senkrechten Achse.

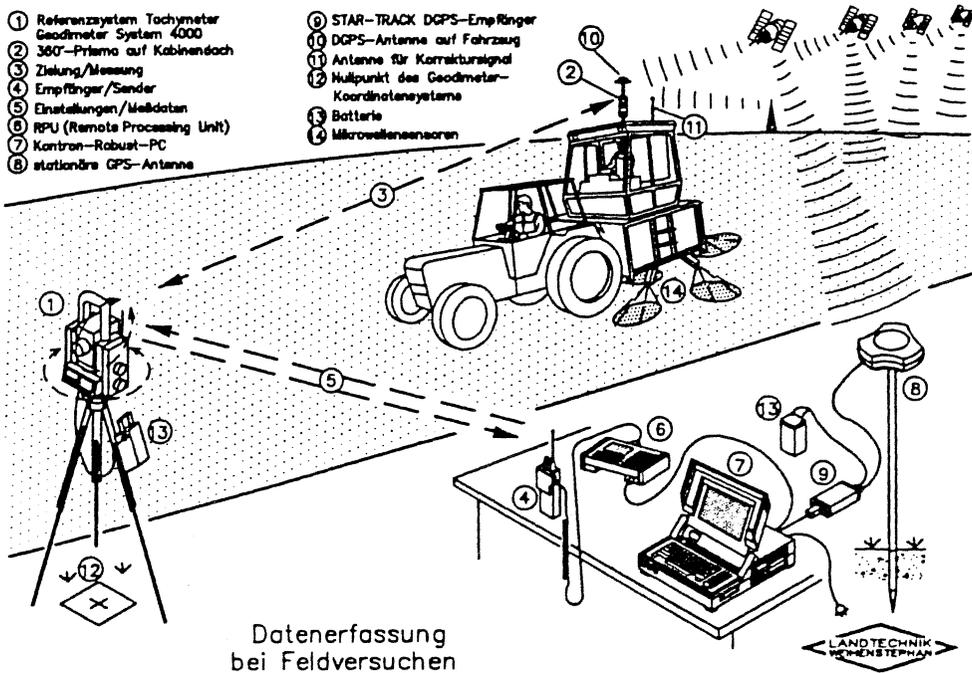


Abbildung 2: Messanordnung bei Feldversuchen

Für Referenzmessungen stand das Tachymeter Geodimeter System 4000 zur Verfügung. Das Referenzsystem verfolgte während der Tests ein am Sensorrahmen im Prüfstand bzw. am Traktor mit Messkabine befestigtes Trackerprisma und ermittelte dazu die Horizontalrichtung, den Vertikalwinkel sowie die Schrägentfernung. Die Genauigkeiten betragen im Fast-Tracking-Modus für die Entfernungsmessung $\pm (10 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$ und für die Winkelmessung $0,6 \text{ mgon}$.

4 Ergebnisse und Diskussion

90°-Sensoranordnung

Bei Geradeausfahrten mit ca. 11 km/h messen die seitlichen Sensoren Frequenzen von $\bar{f}_r = 41 \text{ Hz}$ bzw. $\bar{f}_l = 38 \text{ Hz}$, obwohl in ihrer Messrichtung keine Geschwindigkeitskomponente vorhanden ist. Dabei entsprechen 130 Hz einer Geschwindigkeit von $3,6 \text{ km/h}$. In Fahrzeuginnenrichtung werden $\bar{f}_v = 387 \text{ Hz}$ und $\bar{f}_h = 399 \text{ Hz}$ durch die Sensoren V und H bestimmt. Ursache für die fehlerhaften Messungen in Fahrzeuginnenrichtung ist die Empfindlichkeit der Sensoren auf die Bewegung in Fahrzeuginnenrichtung, die zu einem relativen Messfehler von ca. 10% führt.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten der 4 Radarsensoren mit einem Motorola Oncore DGPS-Empfänger bei 3 aufeinanderfolgenden Kreisfahrten. Der Durchmesser des abgefahrenen Kreises beträgt ca. 22 m . Wiederum ist der aus den Geradeausfahrten bekannte Offset bei Sensor R und L anzutreffen. Obwohl der linke Sensor einen weiteren Weg

gegenüber dem rechten Sensor zurücklegt, ist kein nennenswerter Unterschied in den Messwerten festzustellen. Mit diesen Ergebnissen scheidet die 90°-Sensoranordnung für den Einsatz im Koppelsystem aus. Zu bemerken ist der Einfluss der Kreisfahrten auf das DGPS-Geschwindigkeitssignal des Motorola Oncore DGPS-Empfänger, welches für eine Umrundung einen sinusähnlichen Verlauf um die reale Fahrgeschwindigkeit aufweist.

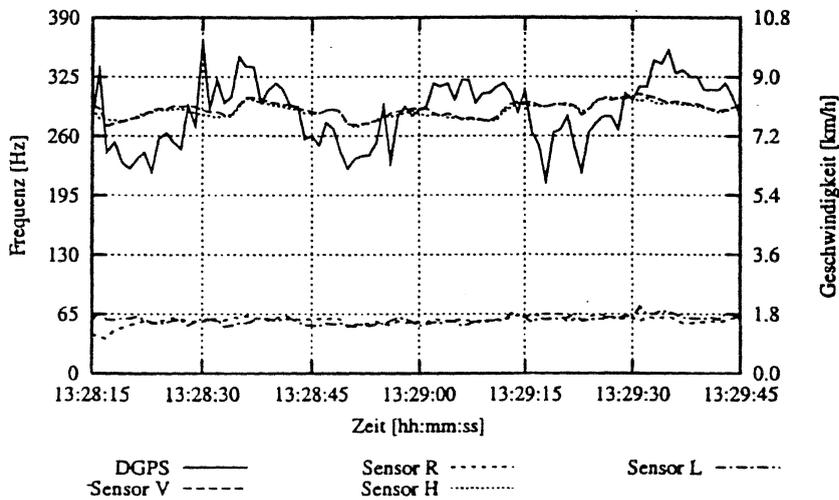


Abbildung 3: Geschwindigkeiten bei Kreisfahrten im Uhrzeigersinn

Y-Sensoranordnung

Zur Simulation von Nick- und Wankbewegungen wurde der Abstrahlwinkel α der Sensoren während der Prüfstandsuntersuchungen variiert. Die Veränderung erfolgte jeweils um ein Vielfaches von 1° . Abbildung 4 zeigt zunächst die Referenzfahrt, bei der alle Sensoren mit dem vom Hersteller vorgegebenen Abstrahlwinkel $\alpha = 35^\circ$ montiert sind. Zum Vergleich wurden weitere Beispiele mit veränderten Abstrahlwinkeln (Abb. 5, 6 und 7) bei gleicher Fahrgeschwindigkeit ausgewählt. Die auftretenden Effekte lassen sich auch bei anderen Geschwindigkeiten nachweisen. Als Streckenverlauf wurde eine Geradeausfahrt zugrundegelegt, so dass Einflüsse auf das Messergebnis, wie durch einen etwaigen Richtungswechsel eliminiert wurden.

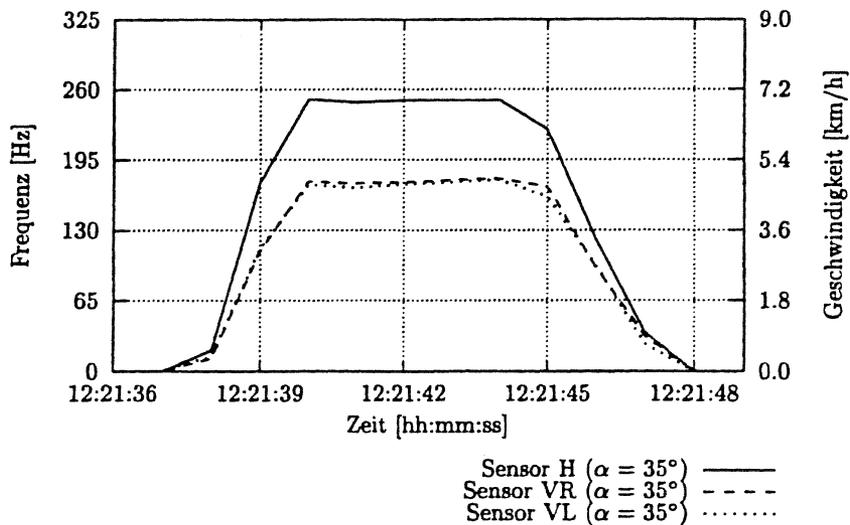


Abbildung 4: Messfahrt 10 bei Y-Sensoranordnung

Den Einfluss einer Nickbewegung, bei der das Heck räumlich höher liegt als die Front, zeigt Abbildung 5. Der eingestellte Nickwinkel beträgt $\beta = 10^\circ$. Aufgrund der um 45° gedrehten Anordnung der beiden vorderen Sensoren liegen deren Neigungswinkel, gerundet auf einen ganzzahligen Wert, bei $\phi \approx 7^\circ$ an Sensor VR und $\phi \approx 7^\circ$ an Sensor VL.

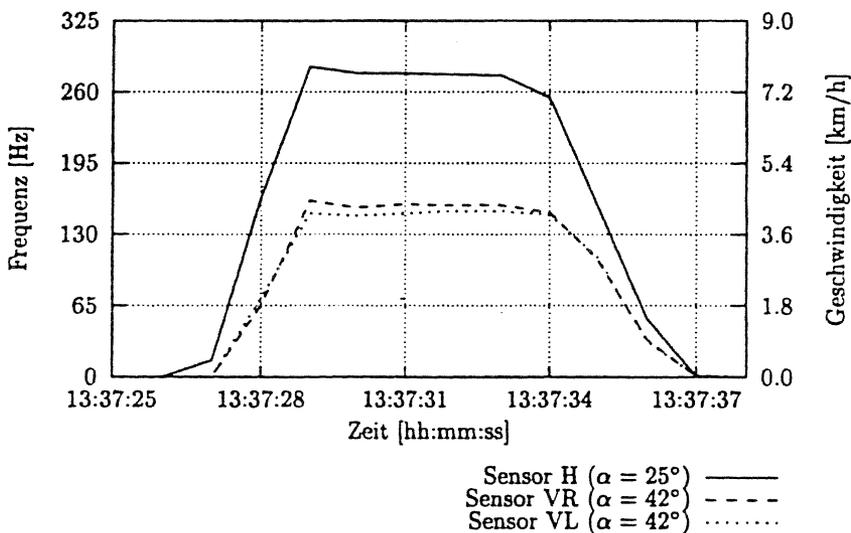


Abbildung 5: Messfahrt 11 bei Y-Sensoranordnung

Gegenüber den Graphen in Abbildung 4 steigt der Geschwindigkeitsverlauf bei Sensor H, bzw. fallen die Geschwindigkeitsverläufe von Sensor VR und Sensor VL proportional zum Nickwinkel β . Eine simulierte Nickbewegung in umgekehrter Richtung (Messfahrt 12) bei der die Front des Fahrzeuges räumlich höher liegt als dessen Heck, führt zu steigenden Geschwindigkeitsverläufen

bei beiden vorderen Sensoren proportional zum Nickwinkel β , während der Geschwindigkeitsverlauf vom hinteren Sensor abfällt.

Zur Simulation einer Wankbewegung bedarf es nur der Veränderung der Abstrahlwinkel des vorderen Sensorpaares. Bei Sensor H wird der Abstrahlwinkel von $\alpha = 35^\circ$ beibehalten. In Abbildung 6 ist eine Wankbewegung dargestellt, bei der die rechte Fahrzeugseite bei Blick auf das Heck räumlich höher liegt, als die linke Fahrzeugseite. Der verringerte Abstrahlwinkel an Sensor VR führt zu einem angestiegenen Geschwindigkeitsverlauf, der vergrößerte Abstrahlwinkel an Sensor VL zu einem abgefallenen Geschwindigkeitsverlauf. Im Gegensatz dazu sind beim Kurvenverlauf von Sensor H keine Veränderungen zu verzeichnen.

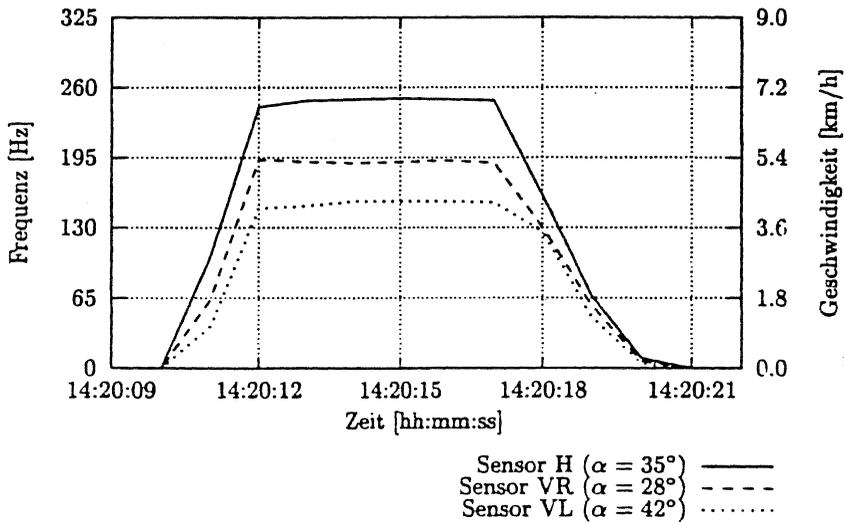


Abbildung 6: Messfahrt 13 bei Y-Sensoranordnung

Ein entgegengesetztes Verhalten in Bezug auf die Geschwindigkeitsverläufe der beiden vorderen Sensoren zeigt sich, wenn bei Blick auf das Heck des Fahrzeugs die linke Seite räumlich höher liegt, als die rechte Seite (Messfahrt 14). Zur Simulation eines Wankwinkels von $\gamma = 10^\circ$ beträgt die Änderung der Neigungswinkel an den beiden vorderen Sensoren nach Rundung auf einen ganzzahligen Wert $\phi = \rho \approx 7^\circ$.

Nach der getrennten Betrachtung von Nick- und Wankwinkel zeigt Abbildung 7 den Einfluss bei Auftreten von Nick- und Wankbewegung. Das Fahrzeug liegt dabei mit dem Heck räumlich höher als mit der Front. Zugleich befindet sich die rechte Fahrzeugseite bei Blick auf das Heck räumlich höher als die linke Fahrzeugseite.

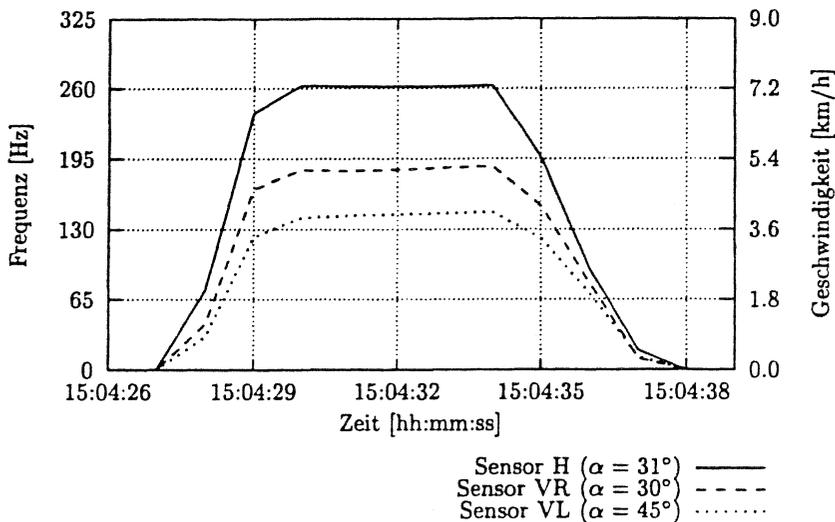


Abbildung 7: Messfahrt 15 bei Y-Sensoranordnung

In Tabelle 1 sind die aus den Messwerten der Sensoren berechneten Nick- und Wankwinkel sowie die zugehörigen Standardabweichungen aufgelistet. Dabei wurde auf die mittleren Frequenzen der Sensoren ohne Beschleunigungs- und Abbremsvorgang zurückgegriffen, welche je Messfahrt aus 10 Wiederholungen bestimmt wurden. Die unterschiedlichen Vorzeichen kennzeichnen die Richtung der Winkeländerung. Geringfügige Abweichungen bei der Justierung der Sensoren führen zu Unterschieden zwischen eingestelltem, manuell gemessenem Winkel und den aus den Messwerten berechneten Winkeln β , ϕ und ρ .

Tabelle 1: Neigungswinkel bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung bei variierten Abstrahlwinkel α

Messfahrt Nr.	\bar{f}_h [Hz]	\bar{f}_{vr} [Hz]	\bar{f}_{vl} [Hz]	β [°]	σ_β [°]	γ [°]	σ_γ [°]
10	250	175	174	-0,5	0,4	0,3	0,5
11	276	157	150	-9,7	0,5	1,8	0,9
12	215	192	192	9,4	0,3	-0,1	0,8
13	249	192	153	-0,9	0,4	9,2	0,8
14	248	159	193	0,1	0,3	-7,7	0,6
15	262	185	144	-4,8	0,4	10,2	0,7

Ausgewählte Ergebnisse von Geradeausfahrten bei Feldversuchen auf geteertem Untergrund sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Werte beziehen sich auf den Abschnitt mit konstanter Geschwindigkeit ohne Beschleunigungs- und Abbremsvorgang. Zwischen den Messwerten der beiden vorderen Sensoren ist eine weitgehende Übereinstimmung zu verzeichnen. Die maximalen Abweichungen bei 45° gedrehter Anordnung zum theoretischen Wert $\bar{f}_h/\sqrt{2}$ betragen bei Sensor VR $\Delta\bar{f}_{vr} = 2,4\%$ und bei Sensor VL $\Delta\bar{f}_{vl} = 0,8\%$.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen bei Geradeausfahrten

\bar{v}_{DGPS} [km/h]	σ_{vDGPS} [km/h]	\bar{f}_h [Hz]	σ_{f_h} [Hz]	\bar{f}_{vr} [Hz]	$\sigma_{f_{vr}}$ [Hz]	\bar{f}_{vl} [Hz]	$\sigma_{f_{vl}}$ [Hz]
4,9	0,1	177	1,8	122	1,3	124	1,4
9,8	0,2	359	3,2	248	2,6	252	2,8
14,7	0,2	537	6,6	372	4,9	378	5,1

Zwei aufeinanderfolgende Kreisfahrten zeigt Abbildung 8. Erkennbar ist der quantitative Unterschied zwischen den Messwerten von Sensor *VR* und *VL*, der für eine Kreisbewegung typisch ist. Sensor *H* ermittelt die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung. Auch der DGPS-Empfänger Trimble AgGPS 132 zeigt ähnliche Schwankungen um die reale Fahrgeschwindigkeit wie der Motorola Oncore bei vorangegangenen Versuchen. Bei Fahrten entgegen dem Uhrzeigersinn kehren sich die Verhältnisse zwischen Sensor *VR* und *VL* um.

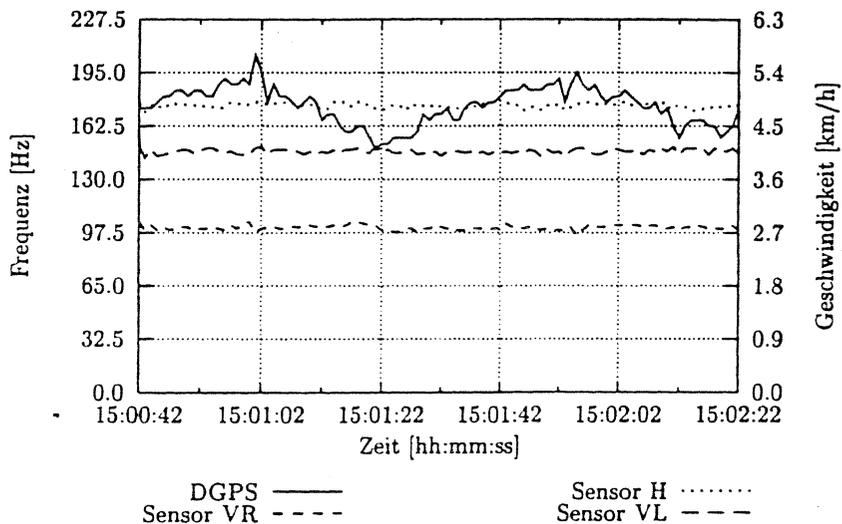


Abbildung 8: Geschwindigkeiten bei Kreisfahrten im Uhrzeigersinn

Ausgehend vom Startpunkt und der Startrichtung aus den Daten des Referenzsystems führt die Integration der Messwerte der Radarsensoren *VR*, *VL* und *H* zu dem in Abbildung 9 gezeigten Wegverlauf für eine Kreisfahrt. Abhängig vom Durchmesser des abgefahrenen Kreises und der Montageparameter der Radarsensoren muss ein passender Integrationsfaktor ermittelt werden, so dass sich der aus Radardaten berechnete Fahrweg dem des Referenzsystem angleicht. Die erzielte Genauigkeit liegt im Vergleich zum Referenzsystem unterhalb von 5 m und entspricht damit der Genauigkeit verfügbarer GPS-Empfänger. Bei Bedarf besteht die Möglichkeit, Nick- und Wankwinkel zu bestimmen. Die dafür notwendigen Gleichungen wurden über trigonometrische Beziehungen zwischen den Sensoren hergeleitet und bei den Prüfstandsversuchen verifiziert (Tab. 1).

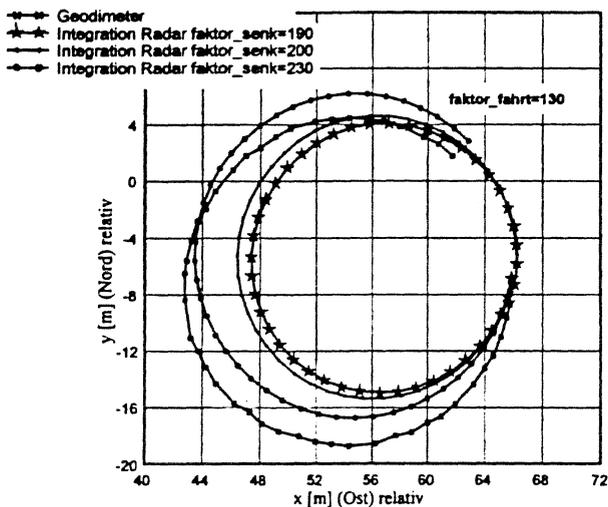


Abbildung 9: Vergleich der Fahrwege aus Radar- und Geodimeterdaten

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der Y-Anordnung neben geradlinigen Fahrten auch Kreisfahrten zuverlässig erfasst werden. Zusätzlich lassen sich Nick- und Wankwinkel des Fahrzeuges bestimmen, welche Einfluss auf die Ortungsgenauigkeit bei sehr hoch montierten GPS-Antennen haben, und damit Positionsfehler korrigieren. Eine Verfeinerung der Auswertelgorithmen führt zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung. Ebenso kommen Optimierungen an den Radarsensoren in Betracht, die u. a. zu einer geringeren Querempfindlichkeit führen. Vorteilhaft wäre die Integration der Radarsensoren in eine kompakte Einheit, um höchstmögliche Genauigkeiten bei der Ausrichtung der Sensoren dauerhaft zu gewährleisten.

Literatur

- [1] **Beuche, H.; Hellebrand, H.J.:** DGPS-Ortung mit öffentlichen Referenzdiensten - Bewertung für den landwirtschaftlichen Einsatz. Zeitschrift für Agrarinformatik, 2 1997, S. 31-38
- [2] **Heide, P.; Schubert, R.; Joppich M.:** Berührungslose Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip mit Ultraschall und Mikrowelle. VDI-Berichte 939, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1992, S. 159-164.
- [3] **Schröder, D.:** Genauigkeitsanalyse inertialer Vermessungssysteme mit fahrzeugfesten Sensoren. Dissertation, Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1992.
- [4] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** Examinations on a microwave sensor based dead reckoning system for improved positioning of agricultural vehicles with GPS. International Radar Symposium 1998, Volume II, DGON, Bonn, 1998, S. 839-844.
- [5] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** Untersuchung eines Koppelsystems zur Unterstützung der autonomen Positionierung landmobiler Anwendungen mit GPS. DGON-Seminar Satnav 98, DGON, Bonn, 1998, S. 141-146.