

T e c h n i s c h e U n i v e r s i t ä t M ü n c h e n

Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau

Institut für Landtechnik

Freising - Weihenstephan

Ortungsverfahren für landwirtschaftliche Fahrzeuge

Diplomarbeit

eingereicht von

Ludwig P. W. Friedrich

1. Prüfer: PD Dr. habil. H. Auernhammer

2. Prüfer: Prof. Dr. habil. M. Estler

Ausgabetag: 12. Juni 1991

Abgabetag: 12. März 1992

Danksagung

Ich danke allen Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. habil. M. Estler für die Überlassung des reizvollen Themas.

Herrn PD Dr. habil. H. Auernhammer für die Übernahme und Betreuung der Arbeit.

Herrn Dr. H. Stanzel für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche sowie für die hilfreichen Auskünfte in allen meßtechnischen Fragen.

Herrn Dr. W. Weber für die wertvolle Hilfe bei der Literaturrecherche.

Herrn Dipl. Ing. agr. T. Muhr für die Hilfe bei der Organisation und Durchführung der Feldversuche sowie für die fachliche Betreuung in allen übrigen Fragen zum vorliegenden Thema.

Herrn Dipl. Ing. agr. M. Demmel sowie allen übrigen Mitarbeitern des Institutes für die wertvolle Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und beim Verfassen der Arbeit.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der im Literaturverzeichnis angeführten Quellen verfaßt habe.

Freising, den 12. März 1992, A. Friedrich

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Ortungsverfahren für die Landwirtschaft	2
2.1 Nicht fahrzeugautonome Ortungsverfahren	2
2.1.1 Erdgestützte Trilateration	3
2.1.2 Raumgestützte Trilateration	5
2.2 Fahrzeugautonome Ortungsverfahren	8
2.2.1 Linearisierter Schlag	8
2.2.2 Koppelnavigation	10
3. Grundlagen der Koppelnavigation	12
3.1 Planimetrisches Verfahren	12
3.2 Näherungsverfahren für die Koppelrechnung	14
3.2.1 Näherung durch Geradenabschnitte	15
3.2.2 Näherung durch Kreisbogen (Polygonzug)	16
3.2.3 Näherung durch Parabeln	17
3.3 Externe Einflußfaktoren	18
3.3.1 Dynamische Änderungen der Fahrzeugparameter	18
3.3.2 Fahrbahnuntergrund	23
3.3.3 Sensorik	24
3.3.4 Phasenversatz	31

4.	Versuchsmethodik zur Fahrzeugortung mittels Koppelnavigation	33
5.	Fahrversuche	34
5.1	Versuchsaufbau	34
5.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	40
5.2.1	Ortungsfehler bei Geradeausfahrt	40
5.2.2	Ortungsfehler bei Kurvenfahrt (8-Kurs)	52
5.3	Einfluß einer Änderung von Spurweite, mittlerer Impulsrate und Impulsratenverhältnis auf die Ortungsgüte bei Kurvenfahrt	60
5.4	Versuch zur Optimierung des Ortungsergebnisses anhand eines korrigierten Impulsratenverhältnisses	64
6.	Untersuchungen zur Gewinnung der Richtungsinformation durch Messung des Lenkwinkels	70
6.1	Grundlagen	70
6.2	Methodik und Versuchsaufbau	71
6.3	Versuchsdurchführung	75
6.4	Versuchsergebnisse	75
7.	Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	79
8.	Zusammenfassung	83
9.	Literaturverzeichnis	85

Anhang

1. Einleitung

Sicherung von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit sowie Verringerung der Arbeitsschwere und Steigerung des Arbeitskomforts sind wichtige Ziele der Landtechnik.

In diesem Zusammenhang stehen dem Landwirt elektronische Systemlösungen in der Verteil- und Schleppertechnik (Bordmonitor, Bordcomputer, Traktormonitor) zur Verfügung, die neuerdings durch die Möglichkeit einer sehr exakten Verwiegung der Güterströme und Ertragsermittlung im Mähdrescher ergänzt werden (Claas, Massey-Ferguson).

Darüber hinaus wird durch den Einsatz von Elektronik die Nutzung von Technik im Sinne eines Abbaus sensumotorischer und psychomentaler Belastungen für den Menschen möglich [14].

Die Strategie, pflanzenbauliche Maßnahmen teilschlagbezogen durchzuführen, will heute sowohl ökonomischen als auch ökologischen Interessen gerecht werden. Dazu ist es jedoch unbedingt erforderlich, die für das betriebliche Management notwendigen Daten noch genauer als bisher zu erfassen. Solch eine Datenbasis ist Voraussetzung für eine optimale Prozeßsteuerung.

Als verknüpfendes Schlüsselement zwischen Datenerfassung und Prozeßsteuerung ist eine genaue Positionsbestimmung auf dem Schlag anzusehen [26, 31].

Standortspezifische Daten können z.B. in digitalisierter Form, jederzeit verfügbar so dem Betriebsmanagement zufließen, daß einzelne Arbeiten, wie z.B. die Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, den jeweiligen Standortansprüchen (Ertragspotential, Befallsdruck usw.) gerecht werden.

Teilschlagbezogener Pflanzenbau setzt eine genaue Kenntnis der aktuellen Position d.h. Ortung voraus. Verschiedene, sich evtl. ergänzende Verfahren zur Positionsfindung bieten sich auch für den landwirtschaftlichen Bereich an.

In der vorliegenden Arbeit werden im Anschluß an die Darstellung dieser möglichen Verfahren Versuche vorgestellt, die 1991 am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan durchgeführt wurden, um die Eignung verschiedener Wegsensoren und eines Lenkwinkelaufnehmers für die Koppelnavigation im landwirtschaftlichen Bereich zu prüfen.

2. Ortungsverfahren für die Landwirtschaft

Nach MANSFELD 1983 [16] wird zwischen Ortung und Navigation so unterschieden, daß unter Ortung die Bestimmung der aktuellen Position eines Objektes, unter Navigation hingegen die Führung eines Objektes von einem Ausgangs- zu einem Bestimmungsort auf bestimmten Wegen unter Einhaltung bestimmter Zeiten zu verstehen ist. Ortung wird somit immer als Voraussetzung für den Navigationsvorgang angesehen.

Generell existieren zwei Ortungssysteme für Landfahrzeuge: zum einen Systeme, die auf eine bereits existierende Infrastruktur zurückgreifen und zum anderen fahrzeugautonome Ortungssysteme.

2.1 Nicht fahrzeugautonome Ortungsverfahren

Die hier beschriebenen Systeme basieren beide auf dem Trilaterationsverfahren. Dabei wird die aktuelle Fahrzeugposition durch Messung von Signallaufzeiten zwischen Fahrzeug und bekannten Triangulationspunkten bestimmt. Je nach Lage der Triangulationspunkte wird zwischen erdgestützter und raumgestützter Trilateration unterschieden.

2.1.1 Erdgestützte Trilateration

Im Falle des erdgestützten Trilaterationsverfahrens kommen als Triangulationspunkte im Gelände aufgestellte Sender bzw. Reflektoren zur Anwendung, wobei zur eindeutigen zweidimensionalen Positionsbestimmung mindestens drei Triangulationspunkte erforderlich sind (Abb. 1) [9]. Als Signale eignen sich v.a. elektromagnetische Wellen wegen ihrer im Unterschied zu Schallwellen temperaturunabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit.

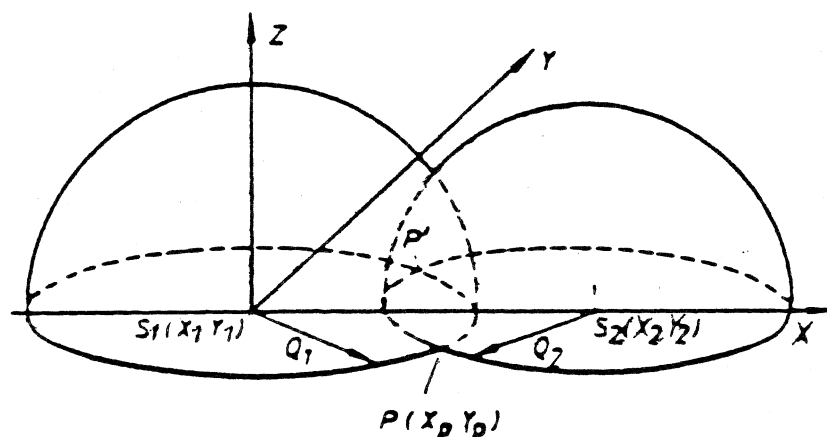


Abbildung 1: Zweidimensionales Orten eines Objektes durch Messen der Entfernung Q_1 und Q_2 zu den Bezugspunkten S_1 und S_2 . Der Punkt P' ist unreal [17].

Je nach Laufrichtung der ausgesandten Signale unterscheidet man zwischen Zwei- und Einwegmessung:

Zweiwegmessung

Dieses Meßverfahren entspricht dem herkömmlichen Radar. Ein vom Radar abgestrahlter Impuls wird unter Energieverlust nach seiner Reflexion am zu ortenden Objekt wiederum vom Radar empfangen. Dabei wird die Zeitspanne zwischen Abstrahlung und Empfang, die sogenannte Signallaufzeit ΔT , mit einem Zeitintervallzähler gemessen.

Sie ist gegeben durch:

$$\Delta T = 2R / c \quad (2.1)$$

(R = einfache Distanz, c = Lichtgeschwindigkeit)

Einwegmessung

Bei diesem Verfahren verfügen sowohl Sender als auch Empfänger über hochgenaue Uhren. Es wird zudem ein genauer Sendezeitpunkt vereinbart (z.B. zu jeder vollen Minute) und die Empfängeruhr mißt nun, wann der ausgesandte Impuls eintrifft.

Die Distanz R zwischen Sender und Empfänger wird aus der gemessenen Zeitdifferenz δT von Sendezeit und Empfangszeit mit der Beziehung:

$$R = \Delta T / c \quad (2.2)$$

ermittelt.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, daß sich Gangunterschiede zwischen den Uhren unmittelbar als Entfernungsfehler auswirken, wohingegen sich bei Einwegmessung nur der Gangunterschied einer Uhr während der sehr kurzen Meßzeit negativ auswirken kann [12]. Der maximale relative Ortungsfehler betrug aber selbst im Falle von Zweiwegmessung bei in den USA von SCHUELLER 1987 [25] durchgeführten Versuchen nur 1,25 %.

Die wesentlichen Nachteile der erdgestützten Trilateration bestehen zum einen in dem hohen technischen und finanziellen Aufwand bei der Errichtung der Triangulationspunkte, zum anderen nimmt der Ortungsfehler mit Annäherung des Fahrzeugs an eine gedachte Verbindungslinie zweier Baken ständig zu (Abb.1). Wählt man zeitsynchronisierte Rundfunksender als Triangulationspunkte, wird zwar der technische Aufwand aber damit auch gleichzeitig die erreichbare Ortungsgenauigkeit um den Faktor 20 bis 30 reduziert [25].

Weitere Probleme können sich durch Sendeschatten in hügeligem Gelände, durch Bewuchs oder Bebauung aber auch bei der fernmeldetechnischen Zulassung eines neuen Systems ergeben, falls nicht im Mikrowellenbereich und damit begrenzter Reichweite gearbeitet wird (derzeit ist die fernmeldetechnische Zulassung nur im Frequenzbereich zwischen 15 - 20 GHz unproblematisch) [8, 9, 25].

2.1.2 Raumgestützte Trilateration

Im Gegensatz zur erdgebundenen Trilateration werden bei diesem Verfahren die notwendigen Trilaterationspunkte in Form von Erdsatelliten in den Raum verlegt, so daß stets eine ausreichend große Entfernung des zu ortenden Objektes zur Verbindungslinie der Trilaterationspunkte besteht und damit eine hohe Ortungsgenauigkeit gewährleistet wird. Gemessen wird die Signallaufzeit aufgrund der aktuellen Uhrzeiten bei Ausstrahlung des Signals vom Satelliten und beim Empfang durch den Nutzer (Einwegmessung).

Zwei Satelliten-Navigationssysteme befinden sich derzeit im Aufbau bzw. Einsatz; so das NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System, 1974) des US-Verteidigungsministeriums (DoD), dessen Vollausbau bis 1992 erwartet wird und GLONASS (Global Navigation Satellite System, 1976) der GUS [24]. Beide Systeme bestehen im wesentlichen aus drei Teilen:

1. Weltraumsegment: 24 Satelliten in sechs verschiedenen Umlaufbahnen in ca. 20 000 km Höhe (12-Stunden Orbit),
2. Bodenkontrollsegment: Überwachung der Funktionsfähigkeit und Bahn der Satelliten
3. Nutzersegment: Antenne, Mikrowellenempfänger, genaue Uhr sowie Navigationsrechner und Positionsanzeige. Die Hauptanwendungsbereiche des Nutzersegments sind hochgenauer Zeitempfang, Navigation und Geodäsie [24].

Die Verfügbarkeit der raumgestützten Trilateration ist abhängig von der aktuellen Anordnung der Satelliten in den einzelnen Orbits. Durch besondere Bahnmanöver (Rephasing) ermöglichen zur Zeit etwa 16 Satelliten des GPS für den süddeutschen Raum einen ständigen Systembetrieb, wozu mindestens vier Satelliten mit bekannten Koordinaten (3 Satelliten mit Navigationsaufgabe und 1 Satellit zur Zeitkorrektur) zu empfangen sein müssen.

Der größte Vorteil der Satellitenortung liegt neben der sofortigen, globalen und dreidimensionalen Positionsbestimmung in der je nach Meßmodus erreichbaren Genauigkeit. Sie liegt z.B. für das GPS bei differentieller bzw. interferometrischer Messung im dm- bzw. cm-Bereich .

Bei "Differentiellem GPS" (DGPS) werden Fehler in der Entfernungsmessung, die sich z.B. durch die Differenz zwischen der aktuellen Satellitenuhrzeit und GPS Referenzzeit (sog. Uhrenfehler) oder durch fehlerbehaftete Satellitensignale ergeben, über Korrekturfaktoren reduziert [18]. DGPS eignet sich wegen des geringen Ortungsfehlers nicht nur als Instrument zur Ermittlung von Arbeits- und Maschinenzeiten sondern ist darüberhinaus auch als Schlüsselement für eine genaue Ernteertragsermittlung und Maschinensteuerung bei Verteilarbeiten anzusehen. Derzeitig verfügbare Empfänger arbeiten mit einer Ortungsrate von einer Sekunde bis 0,3 Sekunden [5].

Bei interferometrischer Messung wird mit erhöhter Signalstärke, die eine erheblich einfachere Empfängerausführung gestattet, gearbeitet. Allerdings bleibt dieser Meßmodus wegen zu großer Meßzeiten voraussichtlich auf geodätische Anwendungen beschränkt [12].

Die Angaben in der Literatur über erzielbare Positionsgenauigkeiten sind sehr unterschiedlich. Für dynamische Anwendungen in Echtzeit schwanken sie zwischen 1 m und 10 m [18]. Versuche mit DGPS am Institut für Landtechnik-Weihenstephan führten zu Fehlern von $\pm 1,5$ m beim Längengrad, $\pm 0,8$ m beim Breitengrad und $\pm 80,0$ m bei der Höhe über NN [3]. Bei Erntearbeiten wurde 1991 bereits über einen Zeitraum von einem Tag eine Genauigkeit von $\pm 0,15$ m erreicht [5].

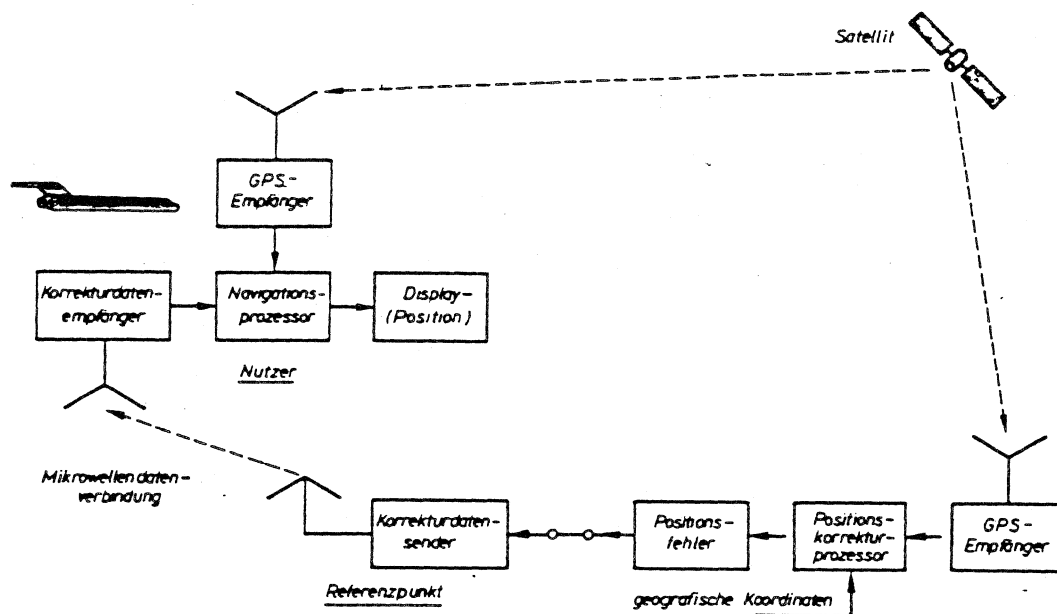


Abbildung 2: Vereinfachtes Blockschaftbild für das "Differentielle Global Positioning System DGPS" [17]

Nachteilig ist, daß das System jederzeit vom Betreiber umgestellt bzw. seine Genauigkeit durch künstlich erzeugte Schwankungen des Uhrensymbols und Manipulation der Ephemeridendaten (d.h. Angaben über Bahnparameter der Satelliten) in gewissem Umfang reduziert werden kann (selective availability). Der daraus resultierende Fehler beträgt etwa zwischen 30 m und 100 m. Zudem ist bei Abschattung oder Mehrwegausbreitung der kurzwelligigen Trägerstrahlung (Frequenz ca. 1GHZ) durch Waldränder oder hügeliges Gelände bzw. bei sich ändernder Satellitenkonfiguration, bei der ein sprungförmiger Fehler durch das Umschalten von einem Satelliten auf einen anderen zu beobachten ist, die Bereitstellung von Überbrückungsdaten durch ein ergänzendes Navigationssystem notwendig [8, 24].

Die geschilderten Probleme können evtl. durch die zur Zeit von der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) angeregte Kombination von GPS und GLONASS beseitigt werden. Vorteile werden v.a. in einer höheren Ortungsgenauigkeit durch Nutzung einer größeren Anzahl von Satelliten (bessere Konfiguration, mehr Beobachtungen) gesehen. Die Nutzung von GLONASS würde zudem, gleiche System-

eigenschaften vorausgesetzt, mit GPS konkurrieren, so daß unkontrollierbare Manipulationen und Genauigkeitsverschlechterungen durch seinen Betreiber vermutlich unterbleiben würden [28].

Die sich in der Einführungsphase des Systems ergebenden hohen Kosten werden bei zu erwartender Massenproduktion der Empfänger, etwa für LKW-Flotten und den PKW-Sektor, für Massenabnehmer auf ca. 1 200 DM geschätzt. Zur Zeit kostet der Empfänger etwa 6 000 DM mit sinkender Tendenz [5]. Zudem rechnet man mit einer Reduzierung der Empfängergröße bis 1995 auf das Format einer Zigarettenschachtel [12, 24].

2.2 Fahrzeugautonome Ortungsverfahren

2.2.1 Linearisierter Schlag

Das Verfahren "linearisierter Schlag" zur zweidimensionalen Positionsbestimmung basiert im wesentlichen auf einer Wegmessung (unter Berücksichtigung der Arbeitsbreite) mittels Wegsensoren, die die erste Koordinate liefert und manueller oder teilautomatischer Fahrgassenzählung über Schlaglänge, Lenkwinkelaufnehmer o.ä. zur Ermittlung der zweiten Koordinate (Abb. 3). Die teilschlagspezifische Prozeßsteuerung erfolgt entsprechend einer Feldkartierung.

Dieses Verfahren mit vergleichsweise geringen Ansprüchen an die einzusetzende Technik setzt eine möglichst schlupffreie Wegmessung voraus. Eventuell auftretende Meßfehler, bei Radarsensoren ca. 2-3 %, lassen sich bei bekannter Fahrgassenlänge über Ausgleichsrechnungen bei Wendevorgängen soweit korrigieren, daß der Gesamtfehler sehr gering bleibt. Probleme können sich in diesem Zusammenhang bei verschieden langen Fahrgassen aufgrund einer unregelmäßigen Kontur des jeweiligen Feldes ergeben [2, 31].

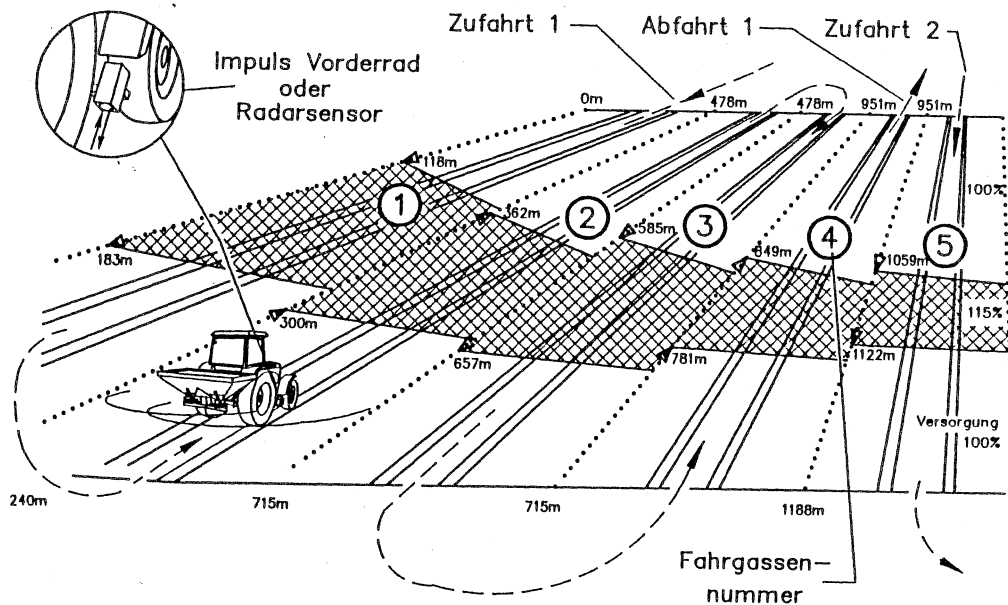


Abbildung 3: Positionsbestimmung im Feld über Fahrgassennummer und Wegmessung (linearisierter Schlag) [30]

Von wesentlichem Nachteil ist der hohe organisatorische Aufwand, den dieses Verfahren erfordert. Definierte An- und Abfahrtswege sowie die Durchfahrungsrichtung der Fahrgassen sind langfristig genau einzuhalten, um stets eine exakte Zuordnung teilschlagspezifischer Daten zur aktuellen Position zu gewährleisten. Nicht exakte Fahrgassengestaltung führt zu einer Fehlerfortpflanzung bei allen Folgearbeiten.

Zudem ist die Positionsauflösung quer zur Fahrgasse durch die Arbeitsbreite bzw. den Fahrgassenabstand vorgegeben, was bei geringer Arbeitsbreite, z.B. der eines Mähdeschers, im Zusammenhang mit Ertragsdatenerfassung zu Schwierigkeiten führen kann [11]. Trotz der beschriebenen Probleme wird dieses System bereits in einigen Betrieben als ein wichtiger Schritt hin zur teilschlagbezogenen Bewirtschaftungsstrategie praktiziert [1].

2.2.2 Koppelnavigation

Wie oben dargestellt wurde, ist keines der Navigationssysteme wegen der noch bestehenden Schwächen derzeit in der Lage, die hohen Anforderungen v.a. hinsichtlich Kontinuität und Ortungsgenauigkeit zu erfüllen. Gerade das Auftreten von Systemstörungen bei Ortung auf Satellitenbasis, sei es aufgrund von Abschattung durch das Gelände oder eine plötzliche Änderung der Satellitenbesetzung, machen den ergänzenden Einsatz eines Sekundärverfahrens erforderlich [3, 5].

Eine Fehlerreduzierung ist entweder bei Kombination gleichartiger Verfahren durch Mittelung über viele unabhängige Meßwerte zur Verringerung der Standardabweichung des Mittelwertes möglich oder durch Kombination verschiedener Verfahren, indem unterschiedliches Fehlerverhalten teilweise kompensiert wird [8].

Nach PÖHLS 1986 [21] basieren fast alle realisierten oder sich in der Entwicklung befindlichen Navigationssysteme für Kraftfahrzeuge daher auf mindestens zwei Verfahren.

Eine zentrale Bedeutung fällt dabei dem unten genauer beschriebenen Planimetrischen Verfahren zu, da es autonom, d.h. von Infrastruktur unabhängig arbeitet. Im Falle der Koppelnavigation (engl. "dead reckoning" oder "deduced reckoning") wird von einer bekannten Fahrzeugposition ausgehend dessen Bewegung sensiert und in Form von Vektoren, d.h. nach Betrag und Richtung aufgezeichnet. Die neue Position ergibt sich dabei aus der vektoriellen Addition bzw. "Kopplung" der Weginkremente [15].

Da es sich bei den so berechneten Koordinaten um relative Koordinaten handelt, muß die Ausgangsposition mit anderen Hilfsmitteln (z.B. DGPS) bestimmt werden. Desweiteren müssen die sich summierenden Ortungsfehler durch eine absolute Ortsbestimmung in angemessenen Zeitabständen begrenzt werden [4, 9].

Zusammenfassend lassen sich für die genannten Ortungsverfahren die in Übersicht 1 dargestellten Vor- und Nachteile aufführen.

ORTUNGSVERFAHREN

2. nicht fahrzeugautonom

1. fahrzeugautonom

	linearisierter Schlag	Koppelnavigation	erdgestützte Trilateration	raumgestützte Trilateration
Vorteile	<p>notwendige Sensorenausstattung z.T. bereits vorhanden,</p> <p>Ortungsfehler kann durch Ausgleichsrechnungen minimiert werden,</p> <p>keine Beeinträchtigung durch Überbauung und Geländeform</p>	<p>keine Beeinträchtigung durch Überbauung und Geländeform</p>	<p>relativ hohe Ortungsgenauigkeit,</p> <p>überall einsetzbar,</p> <p>hohe erreichbare Präzision,</p> <p>erlaubt dreidimensionale Ortung,</p> <p>gut überbetrieblich einsetzbar</p>	<p>universelles Meßsystem,</p> <p>überall einsetzbar,</p> <p>hohe erreichbare Präzision,</p> <p>erlaubt dreidimensionale Ortung,</p> <p>gut überbetrieblich einsetzbar</p>
Nachteile	<p>möglichst gleichlange Fahrgassen notwendig, schlupffreie Wegmessung erforderlich,</p> <p>hoher organisatorischer Aufwand,</p> <p>Positionsauflösung durch Fahrgassen vorgegeben</p>	<p>herkömmliche Verfahren u.U. sehr aufwendig bzw. teuer,</p> <p>wegen Zunahme des Ortungsfehlers etwa proportional zur zurückgelegten Wegstrecke und Lieferung relativer Daten Korrektur durch ergänzendes Ortungssystem notwendig</p>	<p>hoher technischer und finanzieller Aufwand, zunehmender Ortungsfehler mit Annäherung an die Reflektorenbasis,</p> <p>Beeinträchtigung durch Überbauung und Geländeform möglich</p>	<p>während der Einführungsphase teuer, Gefahr von Manipulation durch Betreiber,</p> <p>Beeinträchtigung durch Geländeform und Überbauung möglich,</p> <p>die geringen Empfangsfeldstärken machen eine hochgenaue Zeitsynchronisation erforderlich</p>

Übersicht 1: Vor- und Nachteile verschiedener Ortungsverfahren

3. Grundlagen der Koppelnavigation

Grundlegend für die Koppelnavigation ist die Zerlegung (Diskretisierung) des kontinuierlichen Bewegungsvorgangs durch den Einsatz von Sensoren in die Beobachtungen

- zurückgelegter Weg und
- Bewegungsrichtung

und deren nachfolgende Verarbeitung im Navigationsrechner nach einem Navigationsalgorithmus [15].

Entsprechend der späteren Untersuchungsmethodik soll im folgenden die Bestimmung der Fahrzeugposition mit Hilfe des sog. Planimetrischen Verfahrens beschrieben werden.

3.1 Planimetrisches Verfahren

Als Bezugssystem dient hier ein karthesisches, dreidimensionales Koordinatensystem, das auch als Inertialsystem oder System der Gauß'schen konformen Abbildung bezeichnet wird [15]. Die von der Erdkrümmung, den topographischen Gegebenheiten und dem Abstand Fahrzeugbezugspunkt-Fahrbahnoberfläche abhängige Höhenkoordinate Z wird zur Vereinfachung für begrenzte räumliche Bereiche auch mit Null angenommen. Demnach sind dann nur zweidimensionale Bahnkurven zu betrachten [21].

Zur Initialisierung des Ortungsvorganges während einer Initialisierungsphase wird dem Navigationsrechner automatisch, z.B. über eine Startplatzerkennung oder manuell über ein Bedienteil ein Startkoordinatenpaar und ein Startwinkel bezüglich einer Himmelsrichtung mitgeteilt [10].

Änderung des Kurswinkels

Bei Kreisfahrten legt das kurvenäußere Rad einen größeren Weg zurück als das kurveninnere. Die Weg- bzw. Geschwindigkeitsunterschiede lassen bei bekannter Spurweite b (= Abstand der Reifenaufstandspunkte nach DIN 70000) direkt auf das Ausmaß der Richtungsänderung schließen, wobei die Wegdifferenz unabhängig vom Kurvenradius und somit von der Geometrie des Kurses ist (Abb. 4).

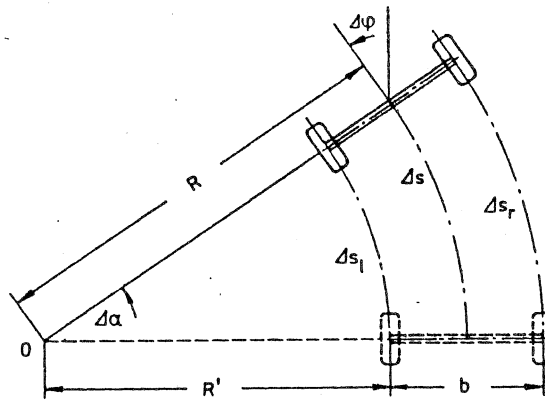


Abbildung 4: Planimetrische Bestimmung der Richtungsänderung aus der Bewegung einer Achse [21]

Es gelten folgende Beziehungen:

Weg des kurvenäußeren Rades :

$$\Delta s_r = (R' + b) * (\pi * \Delta\alpha / 180^\circ) \quad (3.1)$$

Weg des kurveninneren Rades :

$$\Delta s_l = R' * (\pi * \Delta\alpha / 180^\circ) \quad (3.2)$$

Differenz der beiden Wege :

$$\Delta s_{rl} = b * (\pi * \Delta\alpha / 180^\circ) \quad (3.3)$$

Richtungsänderung:

$$\Delta\alpha = (\Delta s_{rl} / b) * (180^\circ / \pi) \quad (3.4)$$

Mit den Startwerten X_0 , Y_0 , und α_0 ergeben sich die aktuellen Positionswerte aus:

$$X = X_0 + \Sigma \Delta X_n \quad (3.5)$$

$$Y = Y_0 + \Sigma \Delta Y_n \quad (3.6)$$

und der aktuelle Fahrtwinkel:

$$\alpha = \alpha_0 + \Sigma \Delta\alpha_n \quad (3.7)$$

Aus den so gewonnenen Koordinaten lassen sich Stützwerte für die zu bestimmende Fahrkurve bilden. Zu beachten ist, daß ihre Rekonstruktion demnach immer nur als Näherung möglich ist.

3.2 Näherungsverfahren für die Koppelrechnung

Abweichungen zwischen tatsächlicher und berechneter Fahrtroute bzw. der Ortungsfehler ΔF als Streckendifferenz zwischen wahrer Position und Koppelort resultieren nach PÖHLS 1986 [21] grundsätzlich aus zwei Fehlerarten. Zum einen treten Meßfehler und zum anderen Rechenfehler in Abhängigkeit von der Wahl der Länge der Weginkremente und den geometrischen Eigenschaften des gefahrenen Kurses auf.

Im folgenden sollen die Vor- und Nachteile dreier Näherungsverfahren für die Koppelnavigation unter besonderer Berücksichtigung des Ortungsfehlers ΔF zusammenfassend dargestellt werden.

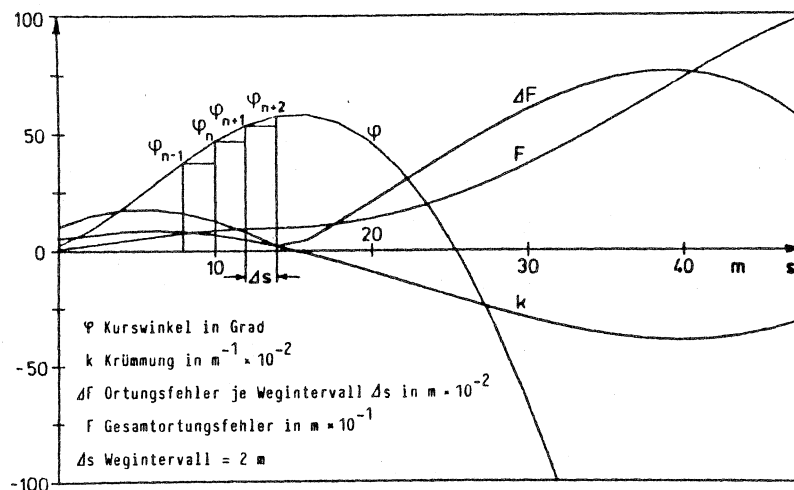


Abbildung 6: Simulierter Verlauf des Kurswinkels und abgeleitete Größen bei Kopplung mit Geraden [21]

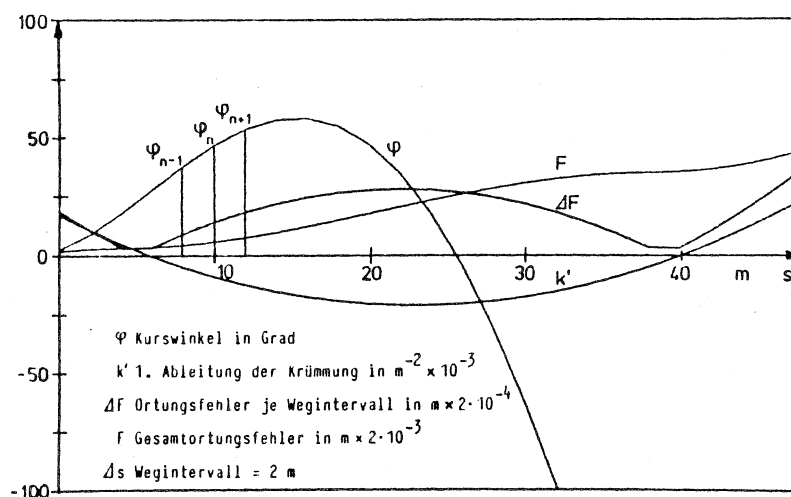


Abbildung 7: Simulierter Verlauf des Kurswinkels und abgeleitete Größen bei Kopplung mit Kreisbogen [21]

Der Ortungsfehler ΔF verringert sich auch hier mit abnehmender Weglänge Δs . Da darüberhinaus ΔF proportional zur ersten Ableitung der Kurvenkrümmung ist, steigt der Ortungsfehler fahrtechnisch betrachtet mit zunehmender Lenkbewegung innerhalb eines Wegintervalls (Abb. 7).

3.2.3 Näherung durch Parabeln

Die Näherung der Fahrkurve durch Parabeln stellt eine weitere Reduzierung des Ortungsfehlers ΔF dar. Fahrtechnisch gesehen geht hier lediglich noch die Änderung der Geschwindigkeit einer Lenkbewegung als Fehler ein (da ΔF proportional zur zweiten Ableitung der Kurvenkrümmung) [21]. Allerdings ist das Verfahren mit einem erheblichen Rechen- und Zeitaufwand verbunden. Eine vergleichende Betrachtung der verschiedenen Näherungsverfahren erbrachte die in den Abbildungen 8 und 9 dargestellten Ergebnisse.

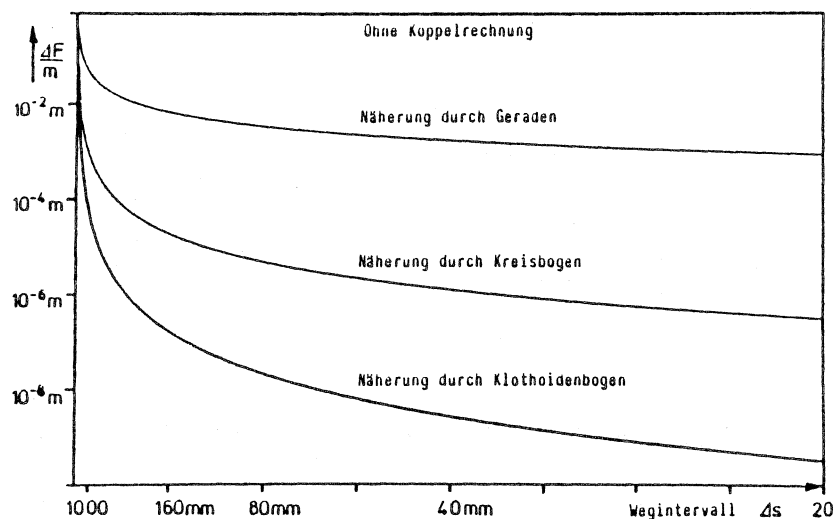


Abbildung 8: Mittlerer Ortungsfehler bei verschiedenen Rechenverfahren auf 1 Meter bezogen [21]

Da Lenkbewegungen des Fahrers, wie oben abgeleitet, für jedes Näherungsverfahren fehlerbestimmend sind, ist in jedem Fall auf eine möglichst ruhige Fahrweise zu achten. Die Näherungsverfahren führen rein rechnerisch entsprechend der obigen Reihenfolge zu einer deutlichen Verbesserung des Ortungsergebnisses. Wird aber das Wegstück Δs möglichst klein gewählt, spielt die Wahl eines bestimmten Näherungsverfahrens im Verhältnis zu Einflüssen, wie sie von dynamischen Fahrzeugparameteränderungen, topographischen Gegebenheiten oder Sensoreigenschaften ausgehen, für das Ortungsergebnis nur eine geringe Rolle. Daher sollen im folgenden Abschnitt die für die Güte des Koppelergbnisses wesentlichen externen Faktoren beschrieben werden.

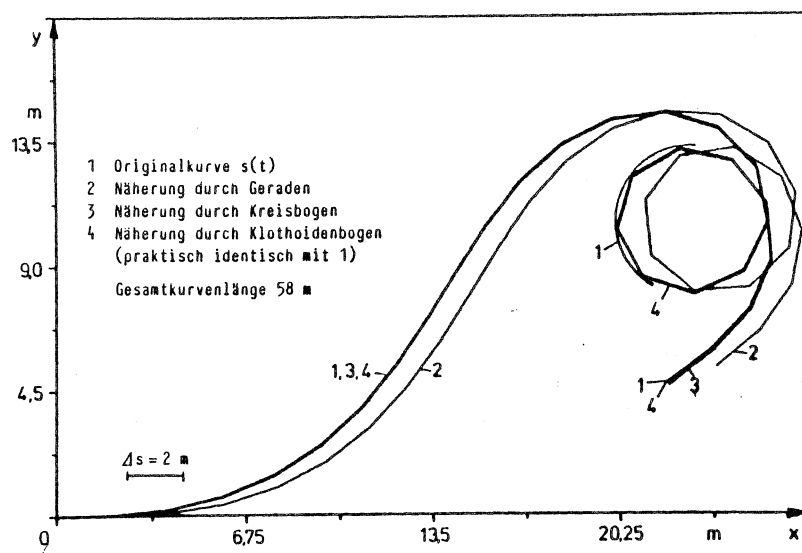


Abbildung 9: Simulierte Fahrkurve mit verschiedenen Rechenverfahren rekonstruiert [21]

3.3 Externe Einflußfaktoren

3.3.1 Dynamische Änderungen der Fahrzeugparameter

Radabrollumfang

Änderungen des absoluten Abrollumfangs (nach DIN 70020) der abgegriffenen Räder, die v.a. durch deren ungleichmäßige Belastung hervorgerufen werden, können bei der Wegmessung über die Raddrehzahl sowohl einen proportionalen, sich prinzipiell summierenden Gesamtwegfehler S_F als auch einen Kurswinkelfehler α_F , der sich allerdings teilweise aufheben kann, nach sich ziehen [21].

Es gilt:

$$S_F = u * U \quad (3.8)$$

(U = Radumfang, u = prozentuale Abweichung des Radumfangs)

und
$$\alpha_F = K * S_F \quad (3.9)$$

(K = Krümmung = $\Delta\alpha/\Delta s$)

Sind die Umfänge der abgegriffenen Räder größer als für die Koppelrechnung angenommen, so erfaßt die Ortung Wegstrecken verkürzt und Kurvenwinkel verkleinert [20] (Abb. 10).

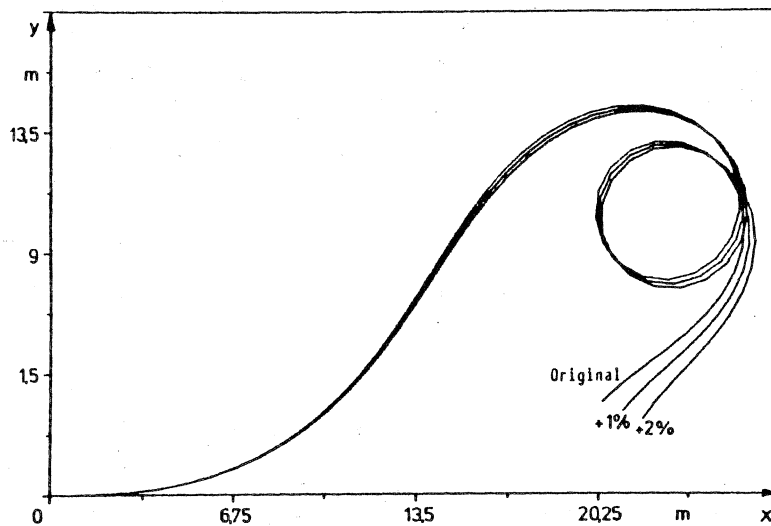


Abbildung 10: Koppelrechnung mit fehlerbehaftetem absolutem Radumfang [21]

Ist das Verhältnis der Abrollumfänge von linkem und rechtem Rad ungleich 1, wird eine Geradeausfahrt in der Koppelrechnung durch einen konstanten, wegproportionalen Winkeloffset d.h. eine Krümmung überlagert, da der rechnerische Wegzuwachs eines Rades bezogen auf Geradeausfahrt und gleiche Zeitintervalle größer als der des anderen ist. Geraden werden zu Kreisen verfälscht dargestellt. Ein resultierender Kurswinkelfehler kompensiert sich hier nicht (Abb. 11).

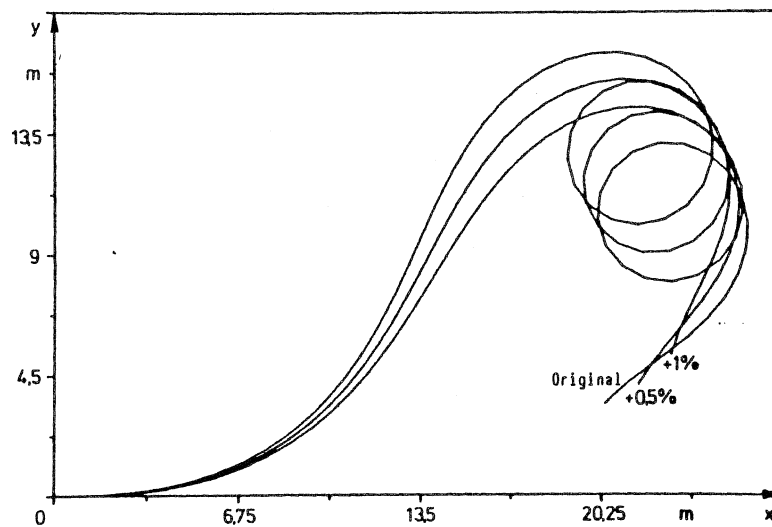


Abbildung 11: Koppelrechnung mit fehlerbehaftetem Radumfangsverhältnis [21]

Es besteht die Möglichkeit, über Korrekturfaktoren ein von 1 abweichendes Radumfangsverhältnis in der Koppelrechnung zu berücksichtigen. Ihre Ermittlung ist allerdings mit einem sehr hohen Zeit- und Rechenaufwand verbunden, da zu einer statistischen Absicherung der Korrekturwerte relativ weite Kalibrierfahrten auf einem den Einsatzverhältnissen möglichst entsprechenden Untergrund erforderlich sind [21].

Die Bestimmung des Radumfangs orientiert sich an Fixpunkten wie Kilometersteinen, Sendern u.ä. mit Teilung der zurückgelegten Strecke durch die Anzahl der Radumdrehungen. Doch selbst bei sehr präziser Bestimmung des Radumfangs ist mit weiteren, spontan auftretenden Fehlereinflüssen (wechselnder Rollwiderstand, Einfederung, Walkbeanspruchung, Ermüdung von Gewebe und Gummi, Abplattung des Reifens usw.) zu rechnen, die sich einer direkten meßtechnischen Erfassung weitestgehend entziehen. Vergleichbare Probleme dürften sich beim Arbeiten mit Reifendruckregelanlagen ergeben.

Spurweite

Änderungen der Spurweite ergeben sich infolge von Elastizitäten und der Kinematik der Radaufhängung. Im landwirtschaftlichen Bereich trifft dies v.a. für LKW und schnell fahrende Ackerschlepper zu, da sonst im wesentlichen Starrachsen verwandt werden. Fahrzeugschwingungen beeinflussen die Spurweite nach (3.3) und (3.4) und damit das Koppelergebnis u.U. erheblich. Sie werden hervorgerufen durch Fahrbahnunebenheiten, Änderungen des Belastungszustandes (z.B. durch Füllstandsänderung von Feldspritze oder Düngerstreuer), oder Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsvorgänge sowie bei Kurvenfahrten auftretende Querkräfte und damit verbundene Verschiebung des Latsches.

Spurvergrößerungen ziehen zwar keinen Wegfehler aber eine Verkleinerung aller Krümmungen nach sich. Kurswinkelfehler kompensieren sich nur, wenn in einem betrachteten Wegintervall gleichviele Rechts- wie Linkskurven auftreten (Abb. 12).

Für Kurvenfahrten gilt, daß Kurvenwinkel mit zunehmender Geschwindigkeit übertrieben dargestellt werden [20]. Fahren am Hang bedeutet eine Querneigung des Fahrzeugs und damit für die vereinfachte Koppelrechnung ohne Berücksichtigung der Höhenkomponente Z , daß die zurückgelegte Wegstrecke mit einem zu großen Wert für die Spur verknüpft wird.

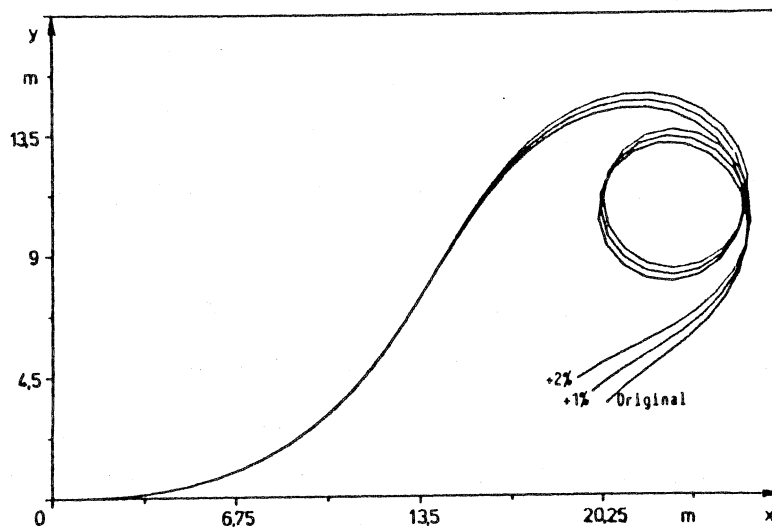


Abbildung 12: Koppelrechnung mit fehlerbehafteter Spurweite [21]

Durch Nickbewegungen des Fahrzeugaufbaus ändert sich die Radlastverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse und damit u.U. Radsturz und Spurweite. Auch bei längerer Belastung der Achsen, z.B. während Zug- oder Transportarbeiten, ist mit einer Beeinflussung der Ortungsergebnisse zu rechnen.

Wankschwingungen, die zu einer einseitigen Belastung der Räder einer Fahrzeugseite führen, verursachen je nach Fahrzeugtyp bzw. Einfederweg Spuränderungen zwischen 10 mm und 30 mm [22].

Um für die Koppelrechnung einen Anhaltswert b für die Spurweite zu erhalten, wird der Mittelwert der Spur unter statischen Verhältnissen manuell bestimmt. Es ist darüberhinaus möglich, die Messung des Abstandes der Reifenaufstandspunkte zu verbessern, indem in Gleichung 3.4 $\Delta\alpha$ zu 180° gewählt wird. In der Praxis entspricht dies einer Kalibrierfahrt auf zwei genau parallelen Geraden.

Damit ergibt sich für die Spurweite:

$$b = \Delta s_{rl} / \pi \quad (3.10)$$

Δs_{rl} wird zu verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2 gemessen und entsprechend die Differenz gebildet.

Damit berechnet sich für einen festen Radumfang U die Spurweite zu:

$$b = ((s_l(t_2) - s_l(t_1)) - (s_r(t_2) - s_r(t_1))) / \pi \quad (3.11)$$

3.3.2 Fahrbahnuntergrund

Die Bedeutung des Fahrbahnuntergrundes für die Güte des Koppelergebnisses wird v.a. durch das Ausmaß des auftretenden Schlupfes bestimmt. Da die reibschlüssige Verbindung zwischen Reifen und Fahrbahn von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter abhängt, stellt der Schlupf eine schwer handhabbare Größe insbesondere bei Verwendung von Radsensoren für die Koppelrechnung dar. Es kann sich gerade im landwirtschaftlichen Bereich ein sehr unterschiedliches Schlupfverhalten ergeben, betrachtet man dieses z.B. beim Befahren eines trockenen Stoppelfeldes im Vergleich zu frischer Pflugfurche oder nassem, gepflügtem Land mit gezogener Saatbettkombination.

Tritt Schlupf auf, besteht zwischen der Anzahl der Radumdrehungen und dem zurückgelegten Weg kein fester Zusammenhang mehr. Darüberhinaus unterliegt das Fahrzeug eventuell einer Querschleunigung und Eigendrehung um seine Hochachse. Besonders Schlupfunterchiede zwischen linkem und rechtem abgegriffenen Rad führen nach der Koppelrechnung zu Kurswinkelfehlern.

Mit schlupfunabhängig arbeitender Sensorik, wie sie z.B. im Zusammenhang mit dem Einsatz mobiler Agrarcomputer oder der Antischlupfregelung leistungsstärkerer Ackerschlepper z.T. schon besteht, kann die oben beschriebene Problematik, zumindest was die Ermittlung des tatsächlich zurückgelegten Weges betrifft, umgangen werden.

Der Einfluß einer wechselnden Tragfähigkeit und Unebenheit des Untergrundes auf die Qualität des Koppelergebnisses leitet sich von der oben beschriebenen Änderung des Abrollumfanges der Räder sowie der Spurbreite ab.

3.3.3 Sensorik

Der Einfluß der Sensorik auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung ergibt sich v.a. aus deren Funktionsweise.

Radsensoren

Für Kraftfahrzeuge werden bereits seit den siebziger Jahren im Zusammenhang mit Antiblockiersystemen, Drehmomentbegrenzung bei Beschleunigung und Aquaplaningwarnsystemen, basierend auf Raddrehzahlmessungen, Ortungssysteme für den Individualverkehr auf Autobahnen und in Stadtstraßennetzen entwickelt und erprobt [20, 21].

Standardsensoren moderner Navigationsanlagen sind Wegsensoren, die den zurückgelegten Weg, i.d.R. als Mittelwert Δs aus dem vom linken und rechten Rad zurückgelegten Weg, durch Zählen von Rad- oder Getriebeumdrehungen ermitteln.

Es gilt für den gemittelten zurückgelegten Weg (Abb. 4):

$$\Delta s = (\Delta s_r + \Delta s_l) / 2 \quad (3.12)$$

Prinzipiell bestehen für Radsensoren u.a. folgende technische Lösungen [23]:

- Wegsensoren mit Reedkontakt (Magnetfeldsensoren)
- Wegsensoren mit Hallsensor (galvanomagnetische Sensoren)
- optoelektronische Wegsensoren (Näherungsschalter)
- induktive und kapazitive Wegsensoren (Näherungsschalter)

Magnetfeld-Weggeber sind robust und verschleißfrei. Ihr Hauptnachteil ist die erhebliche Störanfälligkeit gegenüber magnetischen Medien. Optoelektrische Weggeber zeichnen sich durch sehr kleine Meßkräfte aus und eignen sich, da nur geringe störende

Trägheitskräfte auftreten, für dynamische Messungen an leichten Meßobjekten. Die Alterung der Lichtquelle bedeutet jedoch häufige Nacheichung bzw. entsprechende Meßfehler. Kapazitive Abstandsgeber lassen sich für extrem kleine Meßbereiche ($< 10^{-7}$ mm) herstellen. Allerdings ist ihre Kennlinie nichtlinear und ihre Empfindlichkeit daher vom (oft unbekanntem) Plattenabstand abhängig. Bestehen hohe Anforderungen bezüglich Vibrations- und Temperaturfestigkeit, so werden ausschließlich induktive Wegsensoren verwendet. Sie sind sehr robust und völlig verschleißfrei; außerdem arbeiten sie im Gegensatz zu kapazitiven Gebern völlig unbeeinflusst von allen nicht leitenden und nicht magnetischen Medien, so daß sie sich z.B. für Messungen in Wasser oder Öl (Abgreifen von Zahnrädern) sehr gut eignen.

Die Umsetzung der Rotorumdrehungen in Signale ist in der Regel fehlerfrei möglich. Allerdings ist die Umrechnung von Radumdrehungen in den zurückgelegten Weg vielen systematischen Fehlern unterworfen [15]. Wie oben erläutert, sind dies v.a. auftretender Schlupf sowie alle Faktoren, die den wirksamen Reifenumfang verändern.

Für eine befriedigende Weg- bzw. Geschwindigkeitsmessung werden daher v.a. gefordert [19]:

- konstante Radlasten
- geringe Seiten- und Umfangskräfte
- großvolumige Bereifung
- feste Fahrbahnen

In der Literatur wird die maximale erreichbare Genauigkeit mit einem Maßstabsfehler von 1 % bis 0,1 % angegeben [15].

Systeme, die den zurückgelegten Weg von Raddrehzahlmessungen ableiten (v.a. Systemkomponenten von Verkehrsleitsystemen wie VDO-Citypilot, OKE, Gyro-Cator-System, EVA-System, APF u.a.), werden anhand der richtungserkennenden Sensoren wie Magnetkompaß, Kreiselkompaß, optische Rotationssensoren oder differentielle Wegsensoren unterschieden [8].

Magnetfeldsensoren bestimmen kontinuierlich den Winkel zwischen der Horizontal-
komponente des Erdmagnetfeldes und einer fahrzeugfesten Bezugsachse. Sie sind
allerdings hochempfindlich gegenüber verschiedenartiger Fahrzeugbeladung und
magnetischen Störungen, wie sie z.B. von Stahlkonstruktionen oder Gleichstromleitungen
ausgehen.

Alle konventionellen mechanischen und optischen Kreisel waren zumindest bis zur
Entwicklung faseroptischer Rotationssensoren sehr aufwendig und teuer [8, 21]. Ihre
Verwendung beschränkt sich daher auf Koppelnavigationssysteme im militärischen
Bereich, die höchsten Genauigkeitsanforderungen genügen müssen. In der Regel wird
ein sog. "Zweikreiselsystem" angewendet, das mittels Meridiankreisel die absolute
Orientierung (Feststellung der astronomischen Nordrichtung) zu Fahrtbeginn und mittels
Kurskreisel die Ermittlung der Orientierungsänderung während der Fahrt übernimmt
(Abb. 14). Die heute in Fahrzeugnavigationsanlagen verwendeten Meridiankreisel
erreichen Genauigkeiten von ca. $0,1^\circ$.

Abbildung 13 zeigt einen Meridiankreisel, der nach einer automatischen Vororientierung
durch einen Drehmomentgeber in Nordrichtung festgehalten wird (sog. "nordtreibendes
Moment = Fesseldrehmoment = Richtmoment). Der optische Abgriff überprüft die Lage
des Kreisels und über einen Regler wird der Drehmomentgeber mit dem erforderlichen
Strom versorgt, der gleichzeitig das Maß für die Abweichung der Laufachse von der
Nordrichtung darstellt.

Eventuell werden zusätzlich Sensoren zur Messung des Lenkeinschlagwinkels, Azimut-
sensoren (Kreisel, Magnetfeldsonden) und Neigungssensoren (Elektrolytlibellen, Lage-
kreisel) angebracht. Abbildung 15 zeigt eine Elektrolytlibelle, die zur Gruppe der
elektronischen Neigungsmesser gehört. Ihr Funktionsprinzip entspricht dem der
klassischen Flüssigkeitslibelle. Das Elektrolyt (1) wirkt durch die Größe der benetzten
Abgriffsflächen (2) als regelbarer Widerstand, der auf beiden Seiten durch die Abgriffe
(3 und 4) ermittelt wird. Der Strom wird durch einen leitenden Mittelteil (5) zugeführt.
Bei nicht horizontaler Stellung läßt sich aus dem Verhältnis der Widerstände Z_1 und Z_2
die jeweilige Fahrzeugneigung berechnen [6, 15].

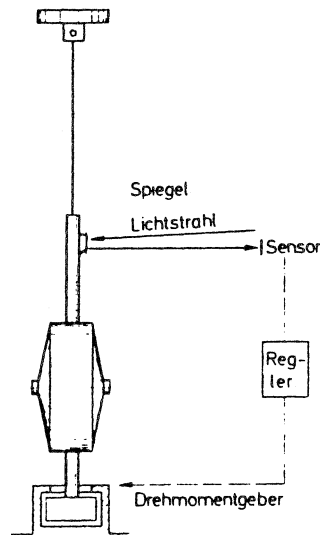


Abbildung 13: Ermittlung der Nordrichtung mittels Meridiankreisels mit Hilfe des Fesseldrehmoments [15]

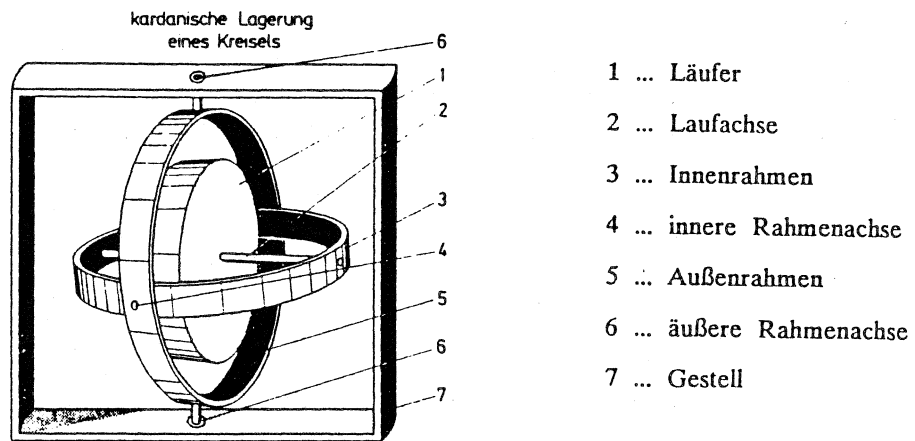


Abbildung 14: Kardanische Aufhängung eines Lagekreisels [15]

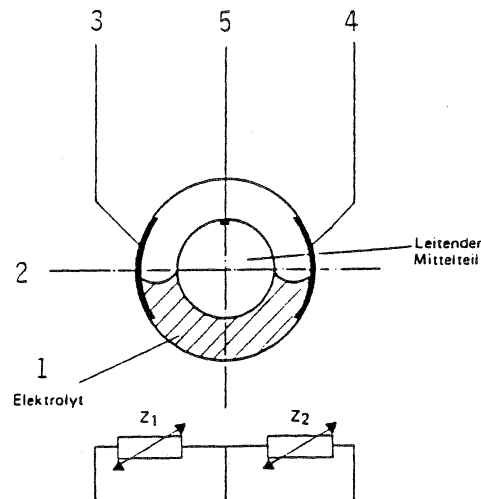


Abbildung 15: Schematische Darstellung und Schaltskizze einer Elektrolytlibelle [15]

Korrelationsverfahren

Das Prinzip der Wegmessung beruht bei Korrelationsverfahren auf der optischen Abtastung der Bodenoberfläche mit Hilfe von am Fahrzeug angebrachten Sensoren. Die Fahrbahnoberfläche wird über ein Meßgitter auf ein Fotoempfängersystem abgebildet, das die zur Verarbeitung notwendigen Signale liefert (Abb. 16).

Über einen Korrelationsrechner wird die Relativgeschwindigkeit v_i bestimmt mit:

$$v_i = b / T_i \quad (3.13)$$

(b = Sensorabstand, T_i = Fahrzeit von P_i nach P_{i+1})

Zwei Systeme mit berührungslos arbeitenden Sensoren basierend auf dem gleichen Grundprinzip wurden in autarken Ortungssystemen verwandt und geprüft. Sowohl die Kombination der optischen Korrelationssensoren "Correxit-L" mit "Correxit-Q" (DATRON) als auch der von BOSCH entwickelte "Weg-Winkel-Sensor" erfaßt Längs- und Querbewegungen des Fahrzeugs, so daß Richtungsänderungen abgeleitet werden können [10, 23].

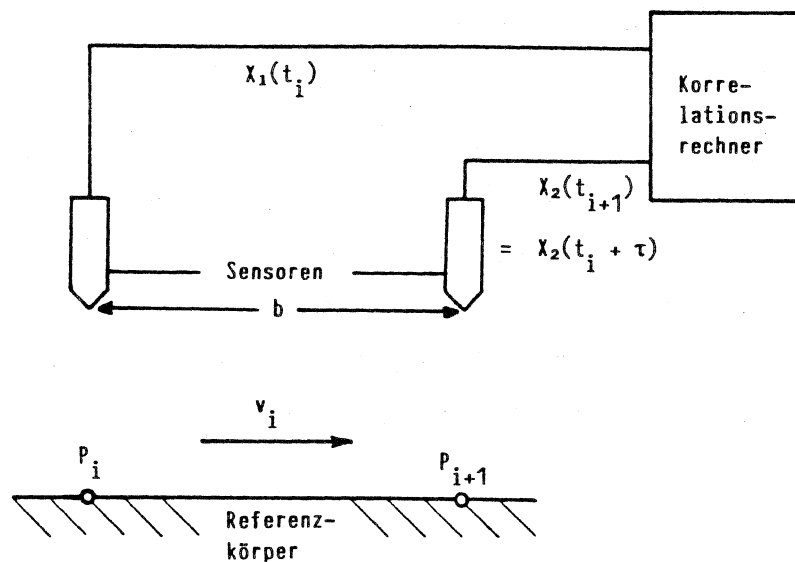


Abbildung 16: Prinzipielle Meßanordnung bei der Korrelationsgeschwindigkeitsmessung [15]

Von Vorteil ist die hohe erreichbare Genauigkeit in der Größenordnung von 0,1 % für die eindimensionale Messung und 1 % für die zweidimensionale Messung sowie ein weiter Meßbereich von 0,3 bis 400 km/h bei uneingeschränkter Manövrierfähigkeit. Fahrleistungsmessungen sind frei von systematischen Fehlern, wie sie durch Schlupf, Reifendruck und Reifendurchmesser verursacht werden.

Nachteilig für den Geländeeinsatz ist v.a. die hohe Verschmutzungsanfälligkeit des optischen Systems und das Auftreten von Fehlern durch Reflexionen (z.B. beim Vorhandensein eines Wasserfilms auf der Fahrbahn).

Doppler - Verfahren

Ein weiteres berührungsloses Verfahren zur Bestimmung der Relativbewegung zwischen Sensor und Referenzfläche basiert auf der Ausnutzung der geschwindigkeitsproportionalen Dopplerverschiebung, die die Frequenz eines Sendesignals durch die Reflexion an der Referenzfläche erfährt (Abb. 17).

$$f_1 = f_0 \cdot \frac{c + v \cdot \cos \alpha}{c - v \cdot \cos \alpha}$$

f_1 = Empfangsfrequenz
 f_0 = Sendefrequenz
 c = Schallgeschwindigkeit der Luft
 v = Geschwindigkeit des Fahrzeugs
 α = Anstellwinkel

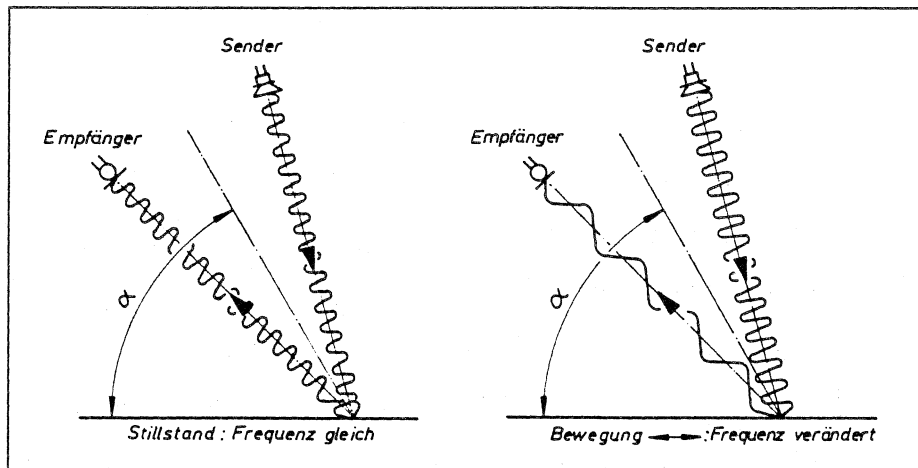


Abbildung 17: Dopplergleichung / Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip [29]

Die einzelnen Sensoren werden nach der verwendeten Strahlungsart unterschieden in Mikrowellen- bzw. Radarsensoren (Fernmeldetechnische Zulassung 24,125 GHz), die elektromagnetische Wellen abstrahlen und Ultraschallsensoren (Fernmeldetechnische Zulassung 62,5 kHz), die mechanische Wellen aussenden. Letztere sind allerdings bei gleicher Genauigkeit wesentlich teurer als Mikrowellensensoren, da sie wegen der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit mit einer Temperaturkompensation ausgestattet sein müssen. Beide Funktionstypen werden bereits für die Weg- bzw. Geschwindigkeitsermittlung landwirtschaftlicher Fahrzeuge eingesetzt.

Für Dopplerfrequenz-Meßsysteme gilt allgemein, daß eine starke Rauigkeit der Oberfläche zu hoher Rückstreuung und Signalamplitude führen kann. Desweiteren können Objekte, die relativ zur Fahrbahn eine Eigenbewegung haben, wie etwa bewegtes Wasser in Fahrspuren, Pflanzenteile oder aufgeschleuderter Dreck, Fehlmessungen verursachen.

Da der Anstellwinkel des Sensors direkt in die Wegmessung über die Dopplergleichung mit eingeht, ziehen Nickbewegungen und Gewichtsveränderungen des Fahrzeugaufbaues, zumindest bei nicht in sog. Januskonfiguration ausgelegten Sensoren, Fehlmessungen nach sich. Der mittlere Fehler wird in der Literatur mit 1,1 % bis maximal 5 % angegeben [19].

Am Institut für Landtechnik-Weihenstephan zeigten umfangreiche Fahrversuche eine Beeinflussung der mittleren Impulsrate (= Anzahl der Impulse / m) in Abhängigkeit von Meßstreckenlänge, Fahrbahnbeschaffenheit und Fahrgeschwindigkeit, wobei allerdings für letztere Einflußgröße keine bestimmte Beziehung abgeleitet werden konnte. Eine merkliche Verschlechterung trat je nach Fabrikat v.a. bei Geschwindigkeiten unterhalb von 2 bis 3 km/h auf.

Als günstig für die zweidimensionale Wegmessung wurde die standardmäßige Erkennung von Vorwärts- bzw. Rückwärtsfahrt bei möglichst geringer Variation der Impulsrate in Abhängigkeit des sogenannten Schräglaufwinkels (= Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Sensorlängsachse) festgestellt [19].

Um mögliche Fehlereinflüsse zu minimieren, sind neben einer exakten Kalibrierung der Sensoren folgende Forderungen zu beachten [2]:

- Anbringung der Sensoren im vorgeschriebenen Winkel,
- Anbringung der Sensoren mit Wellenabstrahlung in Richtung Hinterachse,
- Montage in der Fahrspur auf vorgeschriebener Mindesthöhe

3.3.4 Phasenversatz

Besonders großen Einfluß hat ein Phasenversatz der von den Sensoren ausgehenden Impulse zu Beginn einer Koppelfahrt auf den Kurswinkelfehler. Bei seinem Auftreten überlagert dieser als Konstante den gesamten Kursverlauf; eine rekonstruierte Fahrkurve zeigt sich dann gegenüber der Originalkurve um einen festen Winkel gedreht.

Nur ohne Phasenversatz, d.h. zeitversetztes Auftreten von Impulsen an den beiderseitig angebrachten Sensoren, ist die Differenz der beiden von linkem und rechtem Rad zurückgelegten Wege und damit $\Delta\alpha$ nach 3.4 eindeutig zu berechnen. Dies setzt theoretisch allerdings ein unendlich hohes Auflösungsvermögen der Sensoren voraus. Abbildung 18 zeigt die Kurven 1 und 2 mit einem anfänglichen Phasenversatz entsprechend einer halben Teilung (1m). Kurve 1 weist dabei eine geringe, Kurve 2 eine durch ein Nährungsverfahren verbesserte Winkelauflösung auf. Fahrkurve 3 wurde ohne Phasenversatz berechnet und zeigt bei einer Teilung von $\Delta s = 2\text{m}$ bereits eine hohe Übereinstimmung mit der Originalkurve.

Mit einer Verringerung der Teilung bzw. verbesserten Auflösung der Sensoren läßt sich demnach der Kurswinkelfehler erheblich vermindern.

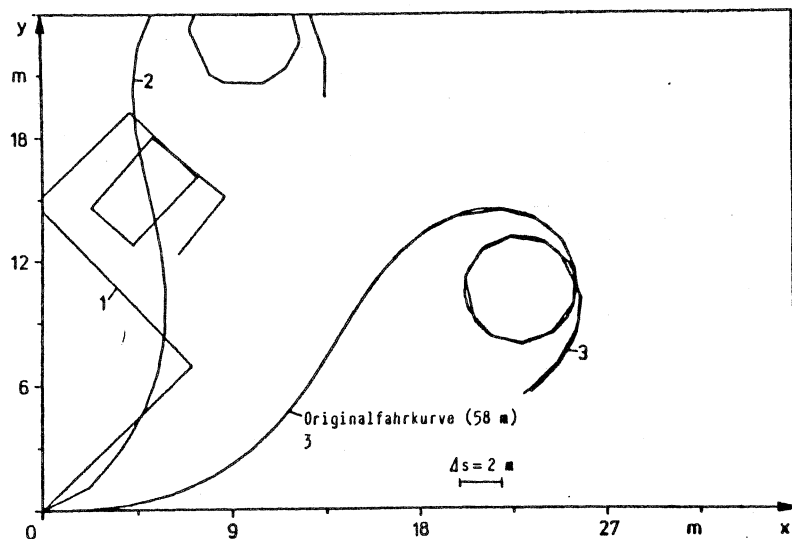


Abbildung 18: Durch einen Anfangsphasenversatz verursachter Ortungsfehler [21]

4. Versuchsmethodik zur Fahrzeugortung mittels Koppelnavigation

Experimentiersysteme, Prototypen aber auch operationelle Verfahren zur ungestützten Koppelnavigation enthalten in aller Regel als zentrales Element eine Aufzeichnungseinheit bestehend aus:

- beiderseitig, symetrisch am Versuchsfahrzeug angeordneten Sensoren. Dies sind, wie oben bereits erwähnt, im Kraftfahrzeugbau zum überwiegenden Teil Radsensoren. Eventuell werden die Wegsensoren durch zusätzliche Kreiselkompassse, Magnetkompassse oder Winkelsensoren ergänzt.
- einer Aufzeichnungselektronik zur On-Line-Erfassung der Sensorsignale als Impulssummen- und Impulsdifferenzwerte.
- einer Auswerteeinrichtung zur On- oder Offline-Ortung und zur Ausgabe des Ergebnisses über einen Bildschirm oder einen Plotter [8].

Zur Analyse möglicher Störeinflüsse bezüglich des Ortungsergebnisses können im weiteren durch Computersimulation Fahrzeug- bzw. Sensorparameter wie Spurweite, Radumfang, mittlere Impulsrate usw. so variiert werden, daß u.U. eine Ableitung von Bestimmungsgleichungen bzw. Korrekturfaktoren für die rechnerischen Abweichungen zwischen tatsächlich gefahrenem und berechnetem Kurs möglich wird. Ziel dabei ist die Minimierung auftretender Abweichungen bzw. eine verbesserte Ortung.

In vielen für PKW entwickelten Systemen werden zusätzlich weitere Korrekturverfahren angewandt. So wird z.B. auf Kartenstützung oder logische Zielverfolgung zur Plausibilitätskontrolle zurückgegriffen [8]. Hierbei stützt sich der Navigationsrechner auf Informationen über das jeweilige Straßennetz und schließt ausgehend von der Annahme, daß sich das Fahrzeug nur in diesem Netz bewegt, aus dem Vergleich der errechneten Positionswerte und der gespeicherten Daten über das Straßennetz auf die tatsächliche Position [20].

5. Fahrversuche

5.1 Versuchsaufbau

Kursgestaltung

Entsprechend der in der gesichteten Literatur beschriebenen Vorgehensweise bezüglich der Konzipierung und Entwicklung fahrzeugautonomer Ortungs- und Navigationssysteme für den Landverkehr wurde in den Fahrversuchen ein Soll-Routen / Ist-Routenvergleich angestrebt.

Unter Berücksichtigung typischer Situationen, in denen mit einem gehäuftem Auftreten von Systemausfällen des primären Ortungsverfahrens z.B. durch Funkschatten zu rechnen ist, wurde bei der Wahl der Kurslänge davon ausgegangen, daß die mit Hilfe der Koppelnavigation zu überbrückende Wegstrecke im Gegensatz zu Leitsystemen im Straßenverkehr allgemein kürzer ausfallen dürfte. (Tritt z.B. im Falle einer sehr niedrigen Elevation des "Ortungssatelliten" von ca. 20° und einer maximalen Baumhöhe von 30 m ein Funkschatten in der Nähe von Waldrändern auf, so ergibt sich unter Berücksichtigung eines Wendevorganges eine Wegstrecke von etwa 200 m bis 300 m, entlang der das Übernehmen der Ortung mittels Koppelnavigation zufriedenstellend möglich sein sollte).

Sowohl das "Erkennen" einer Geradeausfahrt als wesentliches Element der Koppelnavigation als auch die Güte der Koppelrechnung bei Kurvenfahrten waren zu prüfen und somit beide Elemente bei der Kursgestaltung zu berücksichtigen.

Die Fahrversuche wurden auf einem ebenen Wiesengelände (Untergrund: kurz gemähtes Klee gras, trocken) durchgeführt. Mittels Theodolit wurde ein ca. 660 m langer und in etwa die Zahl 8 beschreibender Kurs (im weiteren Text daher kurz als 8-Kurs bezeichnet, Abb. 19) geodätisch vermessen und markiert. Die Geradeausfahrten (Kalibrierfahrten) erfolgten auf asphaltierter Straße mit maximal ca. 10 km/h .

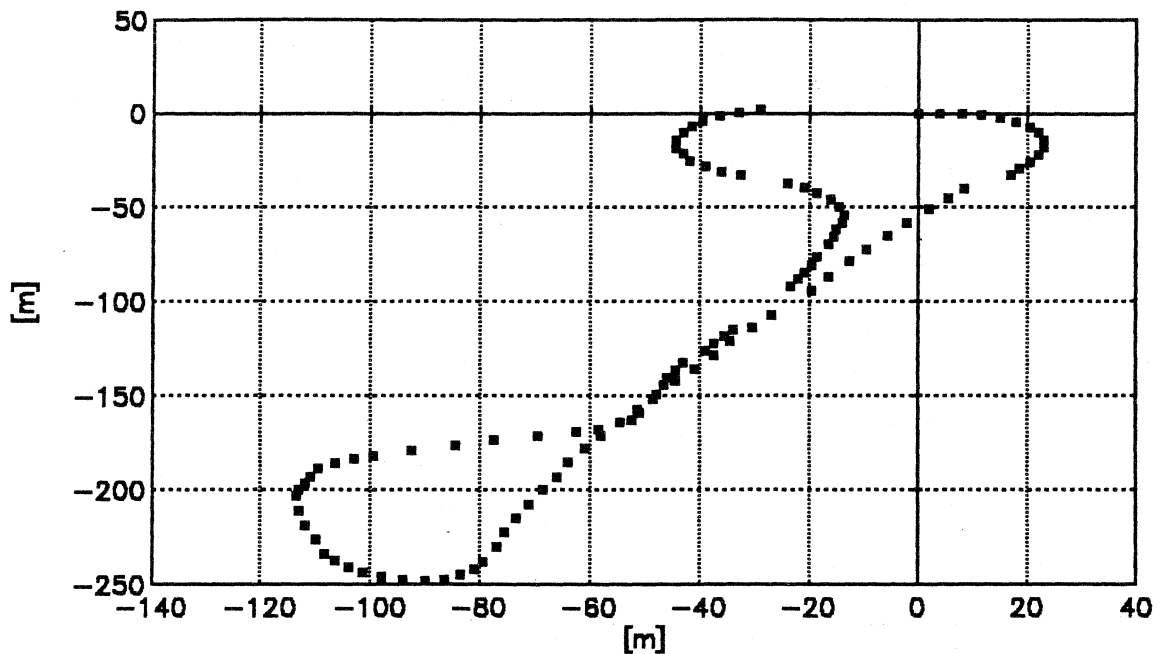


Abbildung 19: Original "8-Kurs" mit einzelnen Vermessungspunkten

Versuchsfahrzeug

Die Feldversuche wurden mit einem Mercedes-Benz Unimog 1400 der schweren Unimog-Baureihe und der Bereifung 425/75 R20 XM 27 (Reifendurchmesser 1 140 mm, Profil neuwertig) bei einem Luftdruck von 3,5 bar durchgeführt. Die Spurweite (Normalspur) wird vom Fahrzeughersteller für diese Bereifung mit 1 799 mm angegeben. Unter statischen Bedingungen wurde die tatsächliche Spurweite mit 1 835 mm vermessen und so für die Koppelrechnung übernommen.

Meßaufnehmer

Im Rahmen der Versuchsanstellung wurden (jeweils paarweise) Radsensoren und Ultraschallsensoren, als Meßaufnehmer verwandt. Bei ersteren handelt es sich um heute von der Industrie als "Standardlösung" zur Wegmessung angebotene Sensoren.

Die Abbildung 20 (bzw. 21) zeigen den an der Vorder- als auch Hinterachse des Versuchsfahrzeuges montierten induktiven Näherungsschalter Bi2-G08-AP6X, der als wesentliches Bauelement einen ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugenden LC-Oszillator aufweist. Sobald ein Metallteil, im Versuchsfall ein Zahn des Abtriebrades im Radvorgelege, in den Bereich der sog. aktiven Schaltzone des Oszillators gelangt, reißen seine Schwingungen ab. Die Zustandsänderung wird elektronisch ausgewertet und ein wegproportionales Ausgangssignal (Ja / Nein-Aussage) abgegeben.

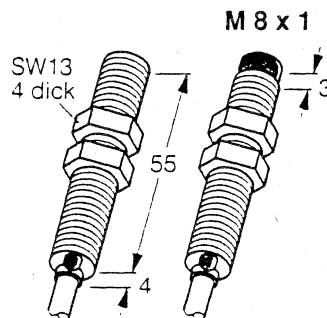


Abbildung 20: Induktiver Näherungsschalter Bi2-G08-AN6X

Die verwendeten Näherungssensoren zeichnen sich durch ihre Robustheit (bis 70°C temperaturunempfindlich) und hohe Lebensdauer (5 bis 10 Jahre) aus. Einem eventuellen Angriff des Epoxidharzes durch Achsöl kann durch eine das HF-Feld nicht störende Messingummantelung vorgebeugt werden [27].

Abbildung 22 zeigt den nach dem Ultraschall-Dopplerverfahren arbeitenden Wegsensor (Xact, Fa. KRONE). Erkenntnissen aus Vorversuchen zufolge wurde er in seitlicher Auslage über der Radspur in 40 cm Höhe in einem Montagewinkel von 30,0° am Versuchsfahrzeug angebracht. Der Strahlbereich zeigte dabei nach hinten unten, um Fehlmessungen infolge von Nickbewegungen um die Hinterachse zu minimieren.

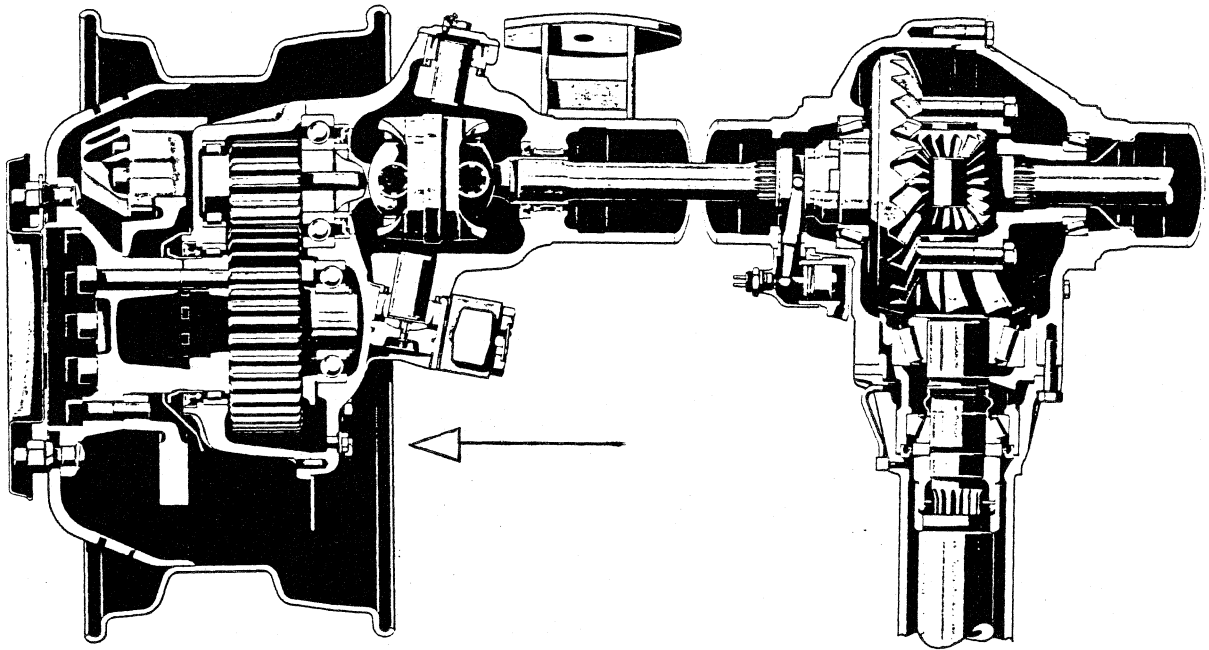


Abbildung 21: Vorderachse AU 3/1 S-5,3 des Versuchsfahrzeugs [30] mit Montageort für den Näherungsschalter am Radvorgelege (s. Pfeil)

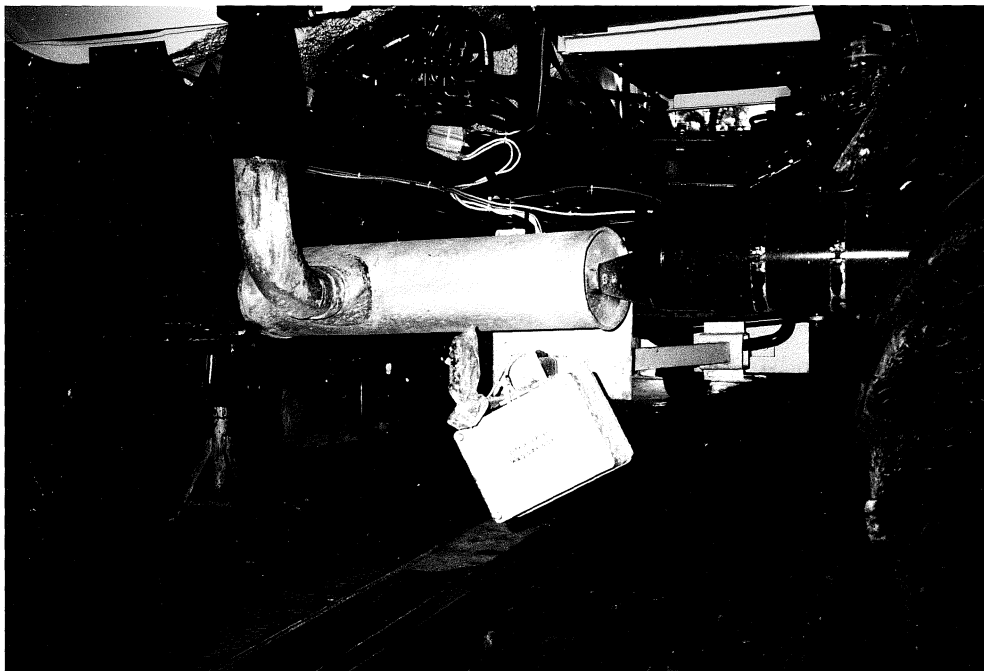


Abbildung 22: Ultraschallsensor Xact (Krone)

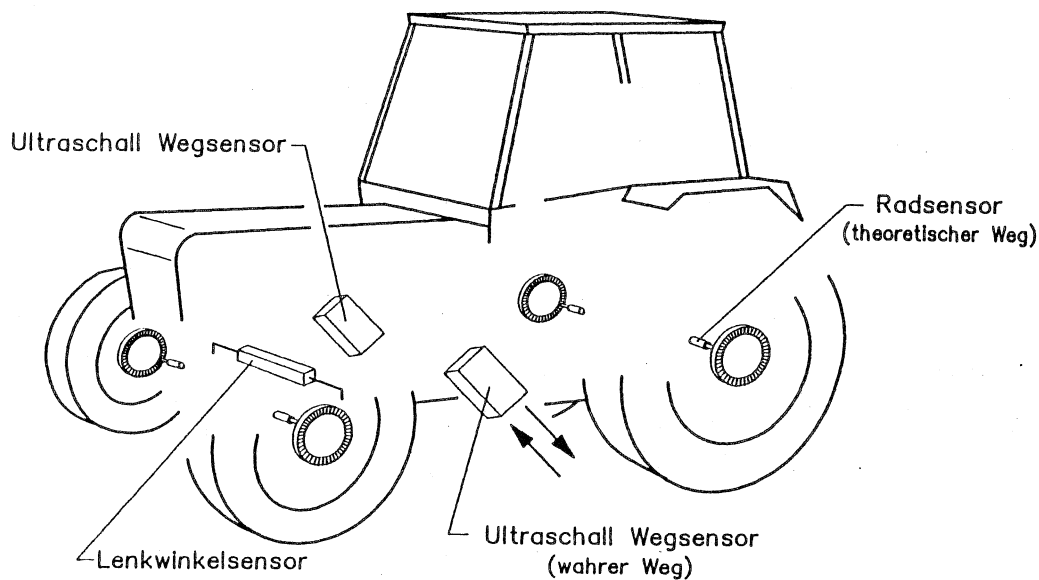


Abbildung 23: Schema der Sensorenanordnung zur Koppelnavigation

Meßwerterfassung und Meßübertragung

Die Übertragung der anfallenden Daten erfolgte mit Hilfe eines seriell arbeitenden Datenübertragungsnetzwerkes (S-net Datalogger Schlumberger, Fa. SOLARTRON; maximale Datenübertragungsgeschwindigkeit 163 Kbit/s).

Als Meßwerterfassungssystem wurden isolierte Meßbausteingruppen (IMPs = Isolated Measurement Pods) verwendet. Im Versuchsfall handelte es sich um IMP 2A mit 20 Kanälen, einer erfäßbaren Signalfrequenz von 10 mHz bis 10 Khz und einer minimalen Periodendauer der abgegebenen Signale von 10 μ s. Damit ist ein paralleler Vergleich mehrerer Sensorsysteme möglich. Günstig ist die extrem niedrige Leistungsaufnahme von weniger als 1 Watt pro IMP. Die Stromversorgung erfolgte über die Netzteile des Hauptcomputers. Die IMP-Gehäuse sind hermetisch dicht und epoxidharzbeschichtet. Alle Leitungen werden über Gummitüllen-Durchführungen angeschlossen, was einen Einsatz auch unter erschwerten Umgebungsbedingungen wie hoher Luftfeuchte oder hohem Staubanfall erlaubt.

Als Hauptcomputer diente ein AT-kompatibler, tragbarer DOS-Rechner ('IAPR 386', Fa. Telefunken), da er sich durch die Möglichkeit einer Kfz-Stromversorgung und besondere Robustheit auszeichnet.

Koppelrechenverfahren

Als Koppelrechenverfahren wurde nach Erkenntnissen aus Vorversuchen die Näherung mit Geraden gewählt. Von einer Näherung mit Kreisbogen und Parabeln wurde abgesehen, da unter den gegebenen Umgebungsbedingungen ein relativ großer Einfluß der Fahrzeugparameter auf das Koppelergebnis zu erwarten war und somit der damit verbundene Mehraufwand in keinem Verhältnis zum Genauigkeitsgewinn in der Positionsbestimmung gestanden hätte.

Die als Impulssummen gespeicherten Sensorsignale wurden dem planimetrischen Verfahren entsprechend mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms weiterverarbeitet. Die Berechnungen beruhen auf den in 3.1 aufgeführten Gleichungen sowie Gleichung 3.12. Gleichzeitig war es möglich, unter sonst konstanten Bedingungen einzelne Fahrzeug- bzw. Sensorparameter am Computer zu variieren und verschiedene Fahrzustände zu simulieren. Auf die Möglichkeit einer kartengestützten Positionskorrektur sollte nicht zurückgegriffen werden, da der Einsatzbereich für landwirtschaftliche Fahrzeuge nicht auf ein Verkehrswegenetz beschränkt ist bzw. nicht immer entsprechendes Kartenmaterial zur Verfügung steht.

5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

5.2.1 Ortungsfehler bei Geradeausfahrt

Die Ortungsgenauigkeit bei Geradeausfahrt wurde für die einzelnen Sensoren über eine Fahrstrecke von 300 m untersucht. Für die Koppelrechnung wurde für alle Fahrversuche als mittlere Impulsrate (Anzahl der Impulse / m) ihr bei Geradeausfahrt gemittelter Wert verwandt. Als Kriterium für die Genauigkeit der Positionsbestimmung diente die durchschnittliche Abweichung (= absolute Abweichung nach 300 Fahrstrecke / Anzahl der Ortungsvorgänge) zwischen wahrer und berechneter Position. Dies entspricht, Geradeausfahrt vorausgesetzt, dem Wegfehler (= Abweichung in Richtung der X-Koordinate) bzw. dem mittleren Ortungsfehler (= Abweichung in Richtung der Y-Koordinate).

Ortungsgenauigkeit der vorderen Radsensoren

Bei Analyse der Rohdaten zeigt sich für die Impulssummendifferenz pro Wegintervall zwischen rechtem und linkem Radsensor, daß einem Unterschied von einem Impuls in der Koppelrechnung eine Fahrtrichtungswinkeländerung von $\pm 0,07^\circ$ als kleinster erfaßbarer Differenzwinkel (Ortungsauflösung) entspricht (Übersicht 3, Anhang). Daraus resultiert aufgrund der vektoriellen Betrachtung des Fahrtverlaufs eine Verschiebung der rekonstruierten Bahnkurve gegenüber dem Originalkurs (Abb. 24).

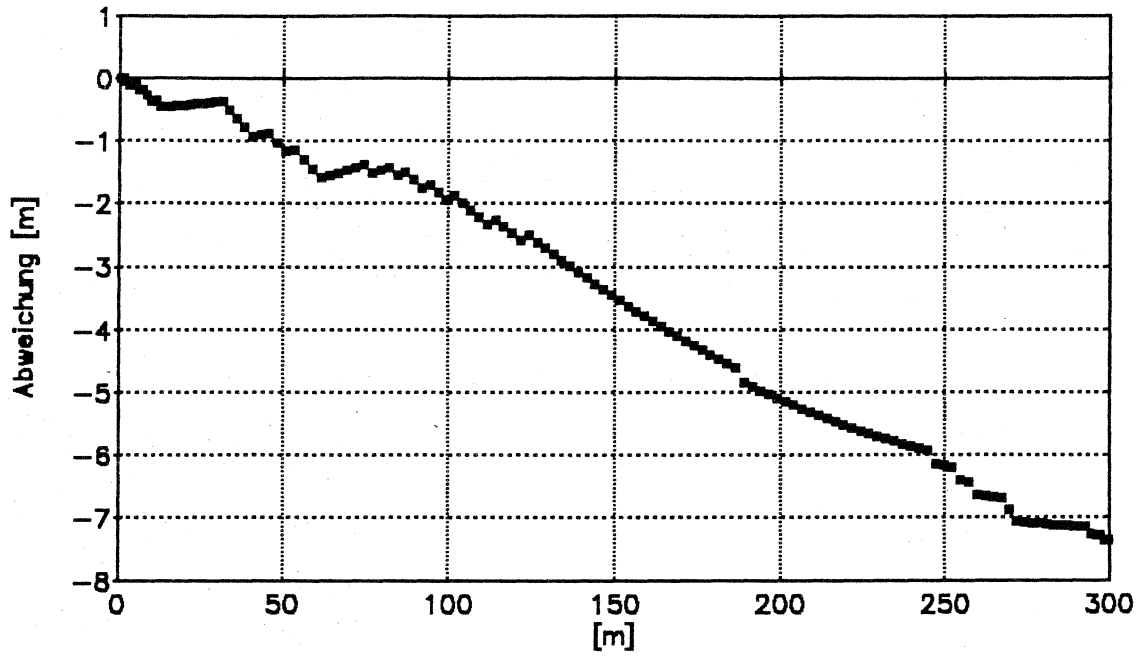


Abbildung 24: Geradeausfahrt (300 m), Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

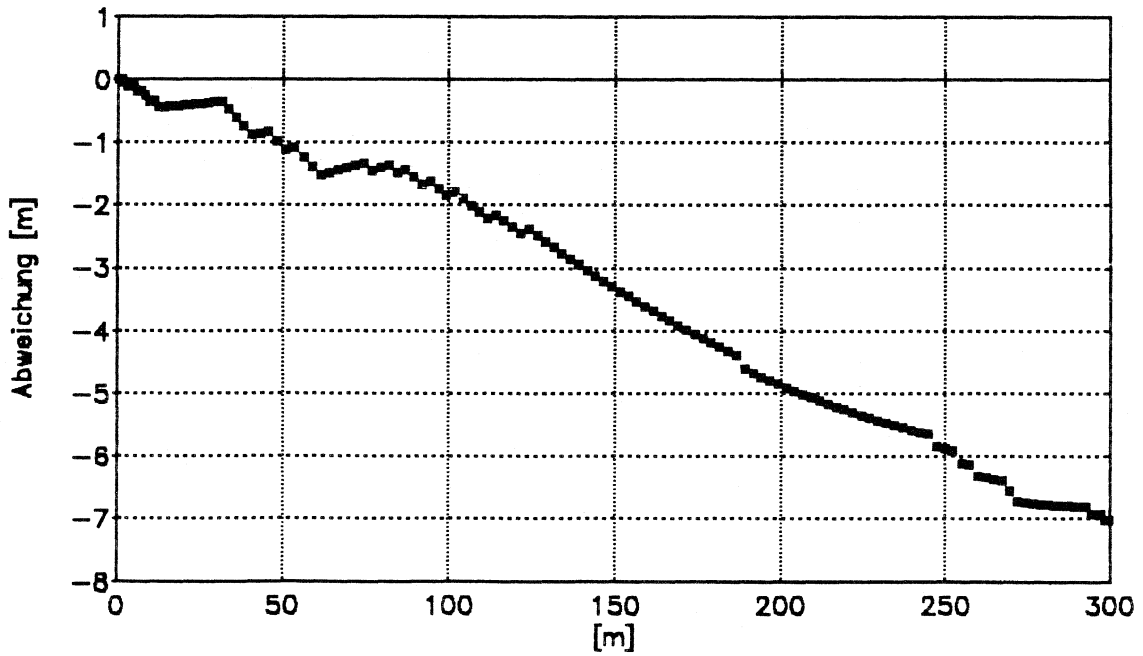


Abbildung 25: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

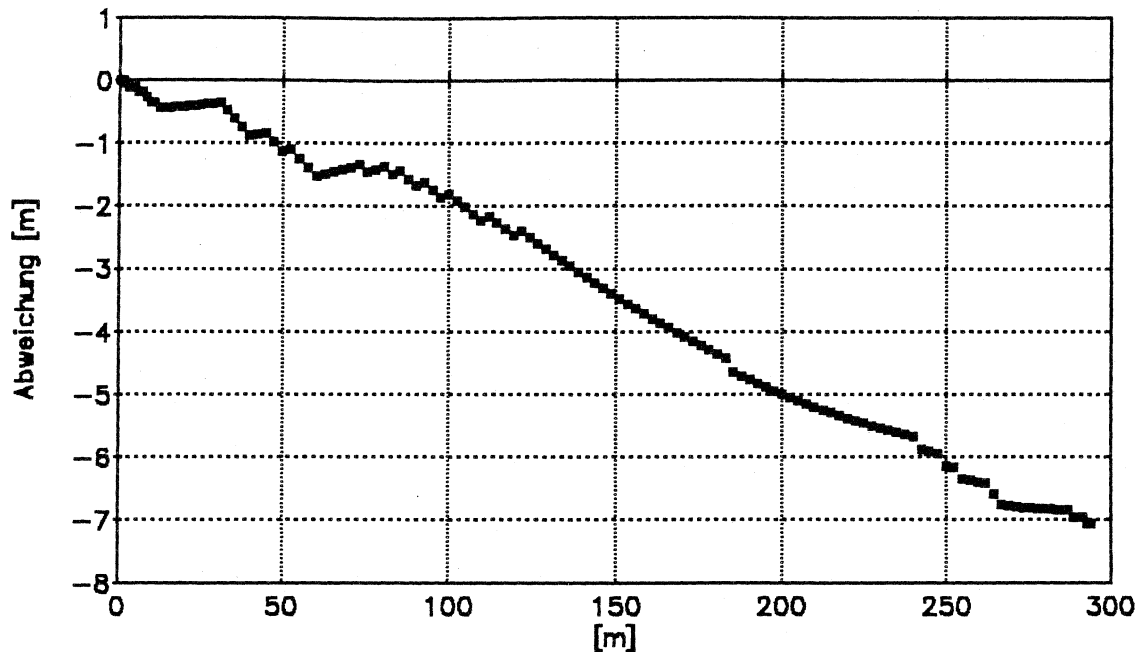


Abbildung 26: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

Für die vorderen Radsensoren ergibt sich ein mittlerer Ortungsfehler von $\pm 3,45 \text{ m} / 300 \text{ m}$ (s. 5.2.1) in Richtung der Y-Komponente bei etwa linearem Verlauf der Bahnkurve. Die Impulsrate wurde für den rechten vorderen Radsensor mit 7,863 I/m und für den linken mit 7,866 I/m gemittelt.

Für die Geradeausfahrt ergibt die Variation der Spurweite um + 5 % durch Simulation am PC unter sonst konstanten Verhältnissen nur eine geringfügige Änderung des Ortungsergebnisses. Der mittlere Ortungsfehler beträgt $\pm 3,28 \text{ m}$ (entsprechend einer Abnahme des Ortungsfehlers um 5 %), ein Wegfehler tritt nicht auf (Abb. 25).

Aus einer Erhöhung der Impulsraten um 2% entsprechend einem für die Koppelrechnung als zu klein angenommenen absoluten Radabrollumfang resultiert ein dazu proportionaler Wegfehler (- 6,07 m) und eine Verringerung des mittleren Ortungsfehlers um 0,15 m (- 4,4 %) (Abb. 26).

Die Simulation einer Änderung des Impulsratenverhältnisses entsprechend einem von 1 abweichenden Radumfangverhältnis (IR rechts / IR links) zeigt, daß bereits eine geringfügige Änderung dieses Parameters va. die Abweichung in Richtung der Y-Komponente erheblich beeinflusst. So ergibt eine Änderung um + 0,1 % nur einen Wegfehler von ca. - 1,1 % aber eine Erhöhung der durchschnittlichen Abweichung um 8,02 m auf 11,35 m (+ 329 %) (Abb. 27).

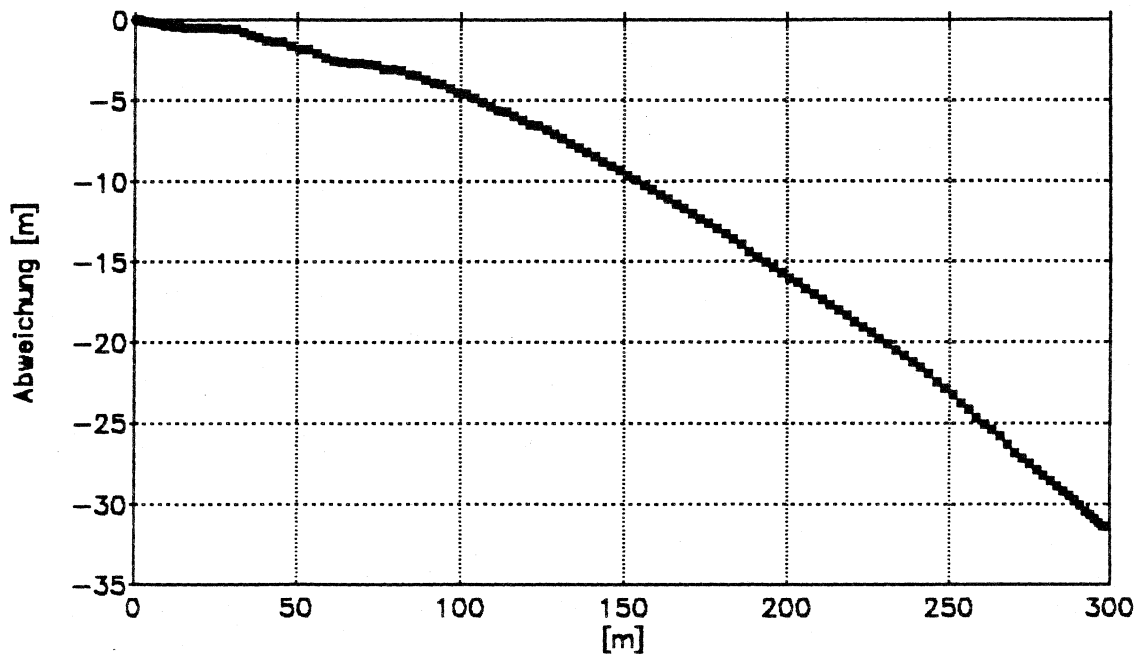


Abbildung 27: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei einem um + 0,1% veränderten Impulsratenverhältnis

Ortungsgenauigkeit der hinteren Radsensoren

Für die die hinteren Räder abgreifenden Radsensoren beträgt der mittlere Ortungsfehler $\pm 1,13$ m in Richtung der Y-Komponente bei allerdings nicht linearem Verlauf der Bahnkurve, d.h. erheblichen Schwankungen der Ortungsgüte (Abweichung min. $\pm 0,40$ m bis max. $\pm 1,60$ m pro 100-m-Wegintervall). Absolut betrachtet ist jedoch ein sehr gutes Ortungsverhalten festzustellen (Abb. 28). Die Impulsrate wurde für den rechten hinteren Radsensor zu 7,826 I/m und den linken zu 7,896 I/m berechnet.

Wie bereits für die vorderen Radsensoren kann auch hier bei Veränderung der Spurweite um + 5 % nur eine minimale Beeinträchtigung des Ortungsergebnisses beobachtet werden (kein Wegfehler, Verringerung der mittleren Abweichung um 0,05 m bzw. - 4,4 %) (Abb. 29).

Die Erhöhung der Impulsraten um 2 % führt zu einem dazu proportionalen Wegfehler (- 6,02 m) aber keiner signifikanten Verringerung der durchschnittlich auftretenden Abweichung (- 0,04 m bzw. - 4,5 %) (Abb. 30).

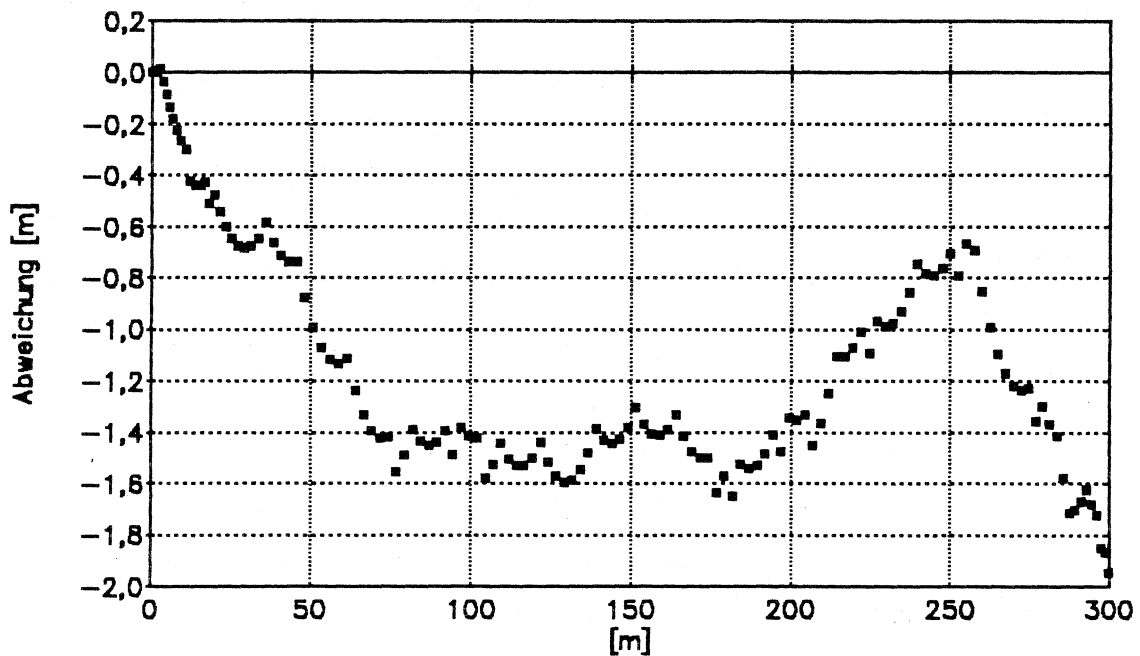


Abbildung 28: Geradeausfahrt (300m), Ortungsfehler der hinteren Radsensoren

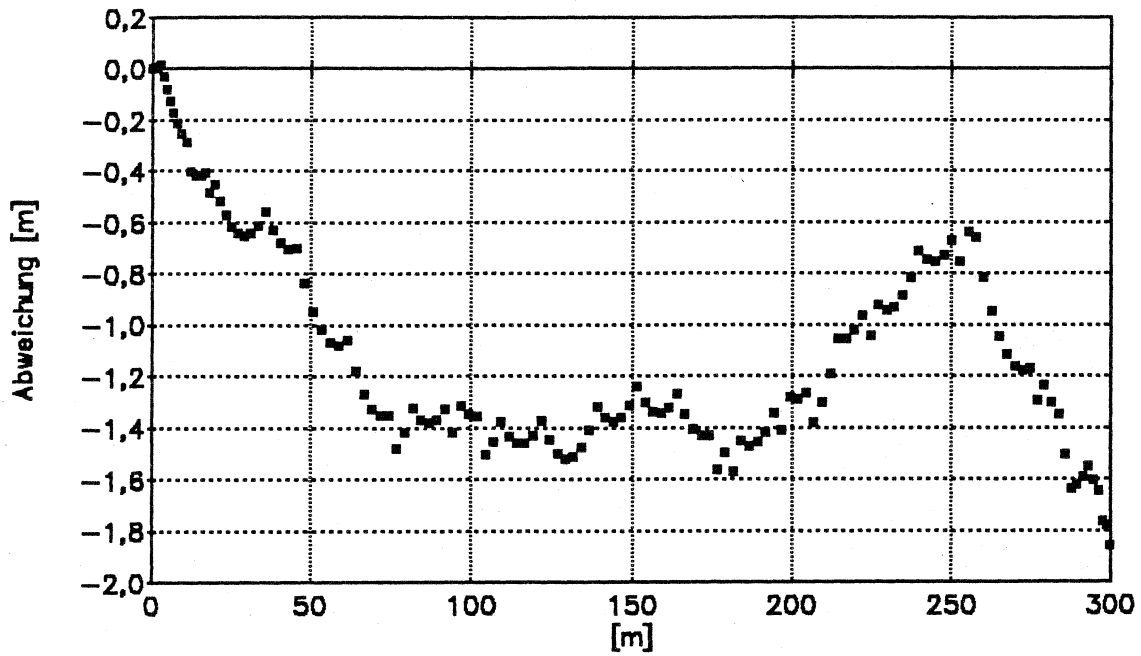


Abbildung 29: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

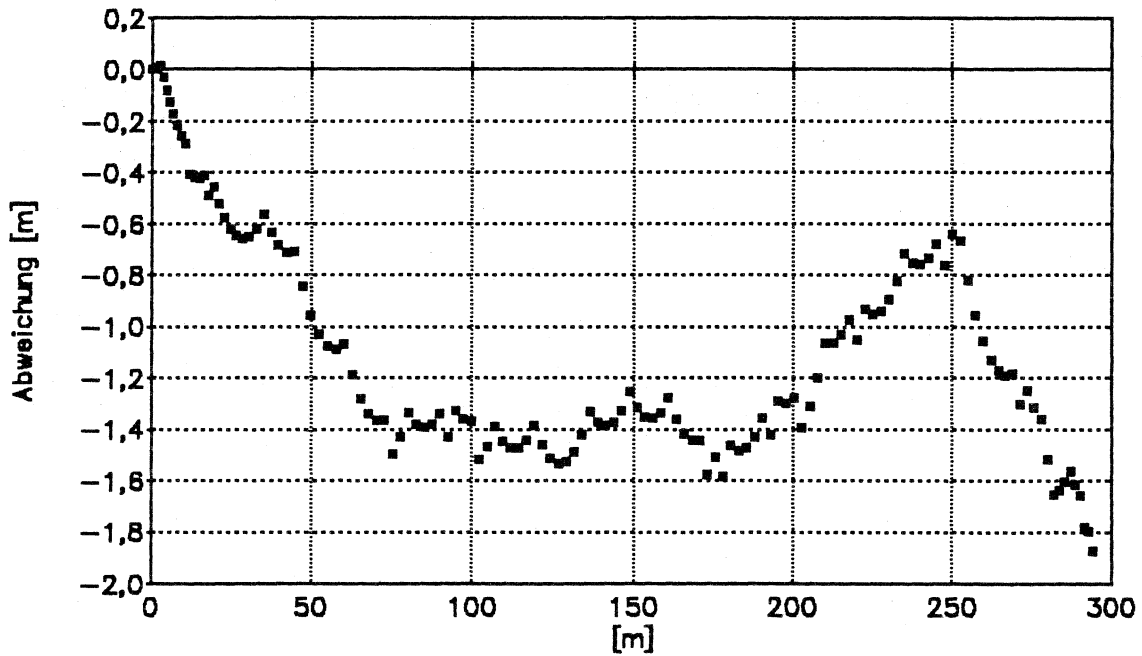


Abbildung 30: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

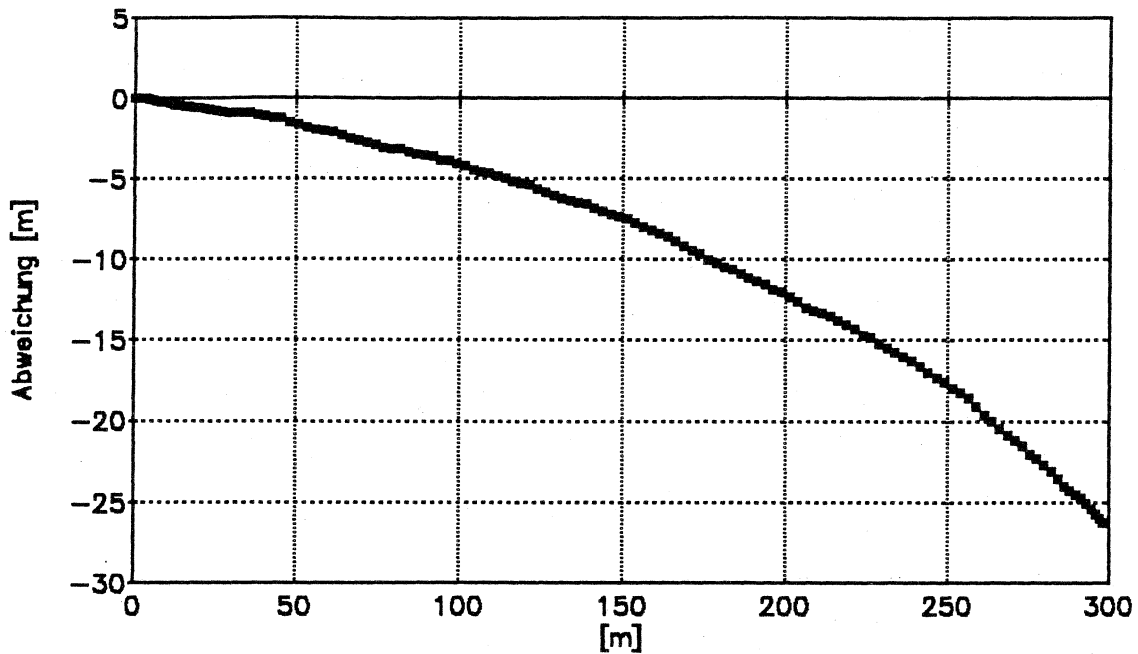


Abbildung 31: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei einem um + 0,1% veränderten Impulsratenverhältnis

Den größten Einfluß auf das Koppelergebnis zeigt auch hier wieder eine Veränderung des Impulsratenverhältnisses um + 0,1 %. Diese führt zu einem Wegfehler von - 0,5 % bei einer Erhöhung des mittleren Ortungsfehlers um 7,98 m (+ 806,2 %) auf $\pm 9,11$ m (Abb. 31).

Ortungsgenauigkeit der Ultraschallsensoren

Die Ortungsgenauigkeit der Ultraschallsensoren bei Geradeausfahrt wird durch den vergleichsweise größten Ortungsfehler aller Sensorenpaare gekennzeichnet. In Richtung der Y-Komponente tritt ein mittlerer Ortungsfehler von $\pm 15,85$ m mit einer ebenfalls nicht systematisch eizuordnenden Abweichung auf. (Bei Betrachtung von jeweils 100 m langen Wegstrecken bewegen sich die absoluten Abweichungen zwischen ca. 7 m bis 17 m) (Abb. 32).

Die mittlere Impulsrate wurde für den rechten Ultraschallsensor zu 191,853 I/m und den linken zu 171,613 I/m berechnet.

Ebenso wie bei der Betrachtung der oben beschriebenen Radsensoren kann auch hier eine Variation der Spurweite um + 5 % das Ortungsergebnis nur unwesentlich ändern. Ein Wegfehler ergibt sich nicht; die Änderung der mittleren Abweichung beträgt absolut - 0,63 m bzw. - 4,7 % (Abb. 33).

Die Erhöhung der Impulsraten um 2 % (entsprechend dem mittleren relativen Fehler der verwendeten Sensoren auf Klee gras, [19]) führt auch für die Ultraschallsensoren zu einem proportionalen Wegfehler (- 6,02 m) und einer geringfügig verbesserten durchschnittlichen Abweichung um 0,60 m bzw. 3,8 % (Abb. 34).

Am stärksten wirkt sich auf das Koppelergebnis eine Veränderung des Impulsratenverhältnisses aus. Dies bedeutet bei + 0,1 % einen Wegfehler von - 0,5 % und eine durchschnittliche Abweichung von $\pm 17,84$ m (+ 12,6 %) (Abb. 35).

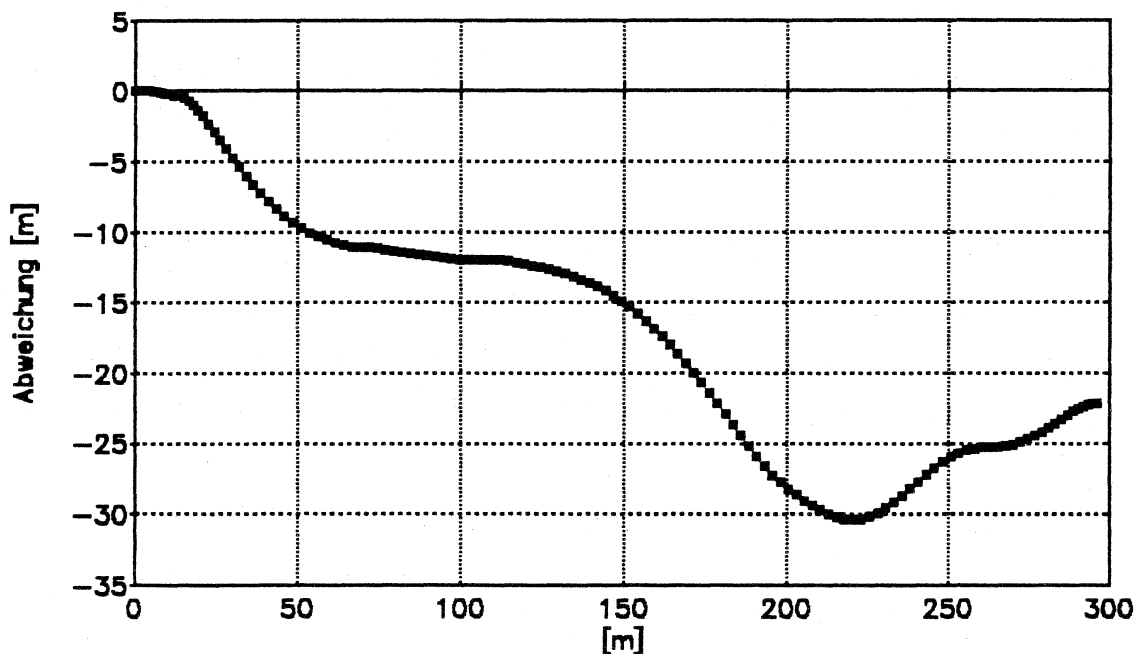


Abbildung 32: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren ("Krone-Xact")

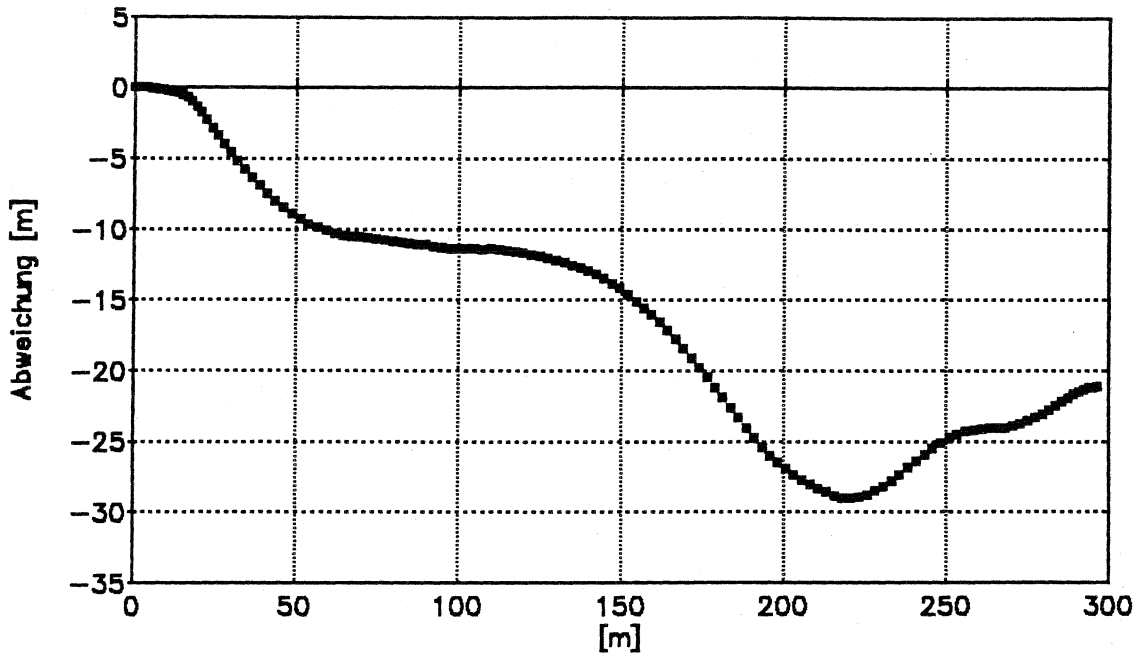


Abbildung 33: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

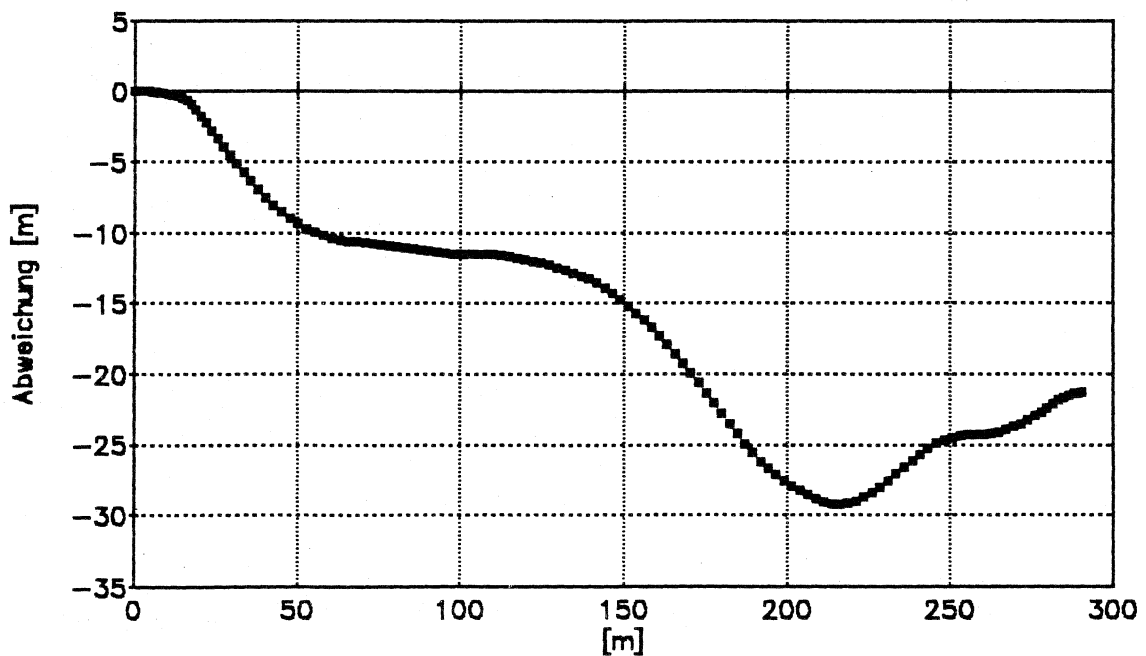


Abbildung 34: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

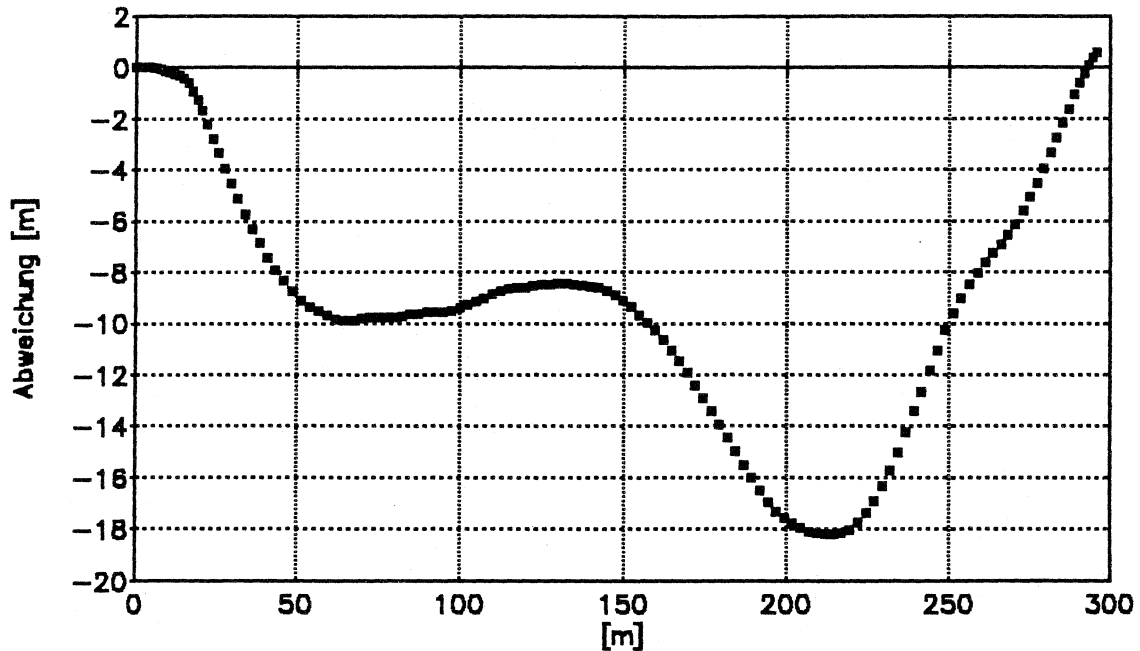


Abbildung 35: Geradeausfahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei einem um + 0,1% veränderten Impulsratenverhältnis

Ergebnisse

Alle Sensorenpaare lassen bei Geradeausfahrt einen systematischen Fehler erkennen, wobei die rekonstruierte Fahrkurve in jedem Fall einer eindeutig stetigen allerdings nicht linearen Funktion folgt.

Die räumliche Abweichung zwischen wahren und berechnetem Standort tritt vorwiegend in Richtung der Y-Komponente deutlich hervor (mittlere Abweichung).

Der Standortfehler resultiert somit im wesentlichen aus einem Kurswinkelfehler. Dieser ergibt sich, Geradeausfahrt und gleiche Grundkalibrierung vorausgesetzt, aus einem von 1 abweichenden Verhältnis der Impulssummen pro zurückgelegtem Wegintervall und pflanzt sich in der Koppelrechnung fort.

Wie die Analyse der Rohdaten für die jeweiligen korrespondierenden Radsensoren, die eine etwa gleiche mittlere Impulsrate aufweisen, zeigt, ist die Differenz der Impulssummen zwischen linkem und rechtem Sensor zum überwiegenden Teil vom Betrag 1 bzw. erhöht oder vermindert sich um diesen Betrag (Übersicht 2, Anhang). Dieses Verhalten ist als ein stochastisch auftretender Fehler bzw. als Quantisierungsfehler anzusehen.

Da dieser Fehlereinfluß bei digitalen Systemen nie ganz auszuschließen ist, ergibt sich für diese ein sich mit dem Weg fortpflanzender Standortfehler, wenn auch jeweils mit unterschiedlich starker Ausprägung. Ähnlich wirken sich schon geringe Lenkkorrekturen des Fahrers auf die Ortung aus.

Aus dem additiven Verhalten des Ortungsfehlers bei Koppelnavigation läßt sich die Forderung nach einer möglichst hohen Auflösung der Sensoren ableiten, da sich Winkelfehler mit abnehmendem Vektorbetrag in ihrer Auswirkung auf das Ortungsergebnis entsprechend einer verbesserten Näherung an den tatsächlichen Kursverlauf reduzieren.

Die zu wünschende Erhöhung der Auflösung um mindestens den Faktor 100 bis 1 000 für die Radsensoren schließt zwar ein Abgreifen von Zahnrädern aus, wäre aber z.B. über die Ausführung eines Annäherungsschalters als Differentialfühler zu einer sich mit dem Rad drehenden Lochscheibe mit erhöhtem geometrischen Auflösungsvermögen oder mit Hilfe einer codierten, absolut arbeitenden Drehwinkelscheibe (bis zu 10 000 Impulse / Umdrehung) möglich. Damit wäre gleichzeitig eine einfache Richtungserkennung und Wiederaufnahme des Ortungsvorganges nach eventuell auftretendem Systemausfall realisierbar.

Für höhere Fahrgeschwindigkeiten werden von verschiedenen Firmen gegen Verschmutzung geschützte, optische Verfahren (Abtastung des Meßumformers im Durchlichtverfahren) angeboten [21, 27]. Den Vorteilen solcher Meßsysteme stehen allerdings Kosten zwischen ca. 1 000 DM und 5 000 DM je nach Ausführung der Lochscheiben gegenüber.

Für die höher auflösenden Ultraschallsensoren ist die stark unterschiedliche mittlere Impulsrate auffallend, die sich evtl. aus der Verwendung von Sensoren unterschiedlicher Baureihen mit abweichender Grundkalibrierung ergibt.

Bei einem maximal zu erwartenden relativen Fehler (Abweichung des 95 % Vertrauensintervalls vom Mittelwert) der verwandten Sensoren von ca. 2 bis 3 % für die mittlere Impulsrate, wie er in Vorversuchen für unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten ermittelt wurde, muß im Versuchsfall mit einem maximal möglichen Winkelfehler von ca. $0,03^\circ$ pro Meter zurückgelegter Fahrstrecke gerechnet werden.

Wie die Simulationsversuche zur Änderung des Impulsratenverhältnisses zeigen, geht hiervon der größte Effekt auf das Koppelergebnis indirekt über einem sich fortpflanzenden bzw. verstärkenden Winkelfehler sowohl für die Rad- als auch Ultraschallsensoren aus. Als problematisch ist in diesem Zusammenhang die sich mit der Geschwindigkeit und Fahrbahnbeschaffenheit ändernde Impulsrate der Ultraschallsensoren anzusehen.

Die Versuche zeigen bereits bei einer Änderung des Verhältnisses um 0,1 % einen erheblichen Krümmungseffekt auf den rekonstruierten Kurs bei Geradeausfahrt.

Die Änderung der Spurweite hat in keinem Fall einen erkennbaren Wegfehler (Abweichung in Richtung der X-Komponente) zufolge. Allerdings werden bei einer Vergrößerung der Spurweite alle Richtungswinkel nach 3.4 verkleinert dargestellt, womit sich die geringfügige rechnerische Verbesserung der Ortsbestimmung in Richtung der Y-Komponente erklären läßt. Zu beachten ist jedoch, daß die Vergrößerung der Spur um immerhin 5 % entsprechend 0,09 m die mittlere Abweichung in Richtung der Y-Komponente im dargestellten Fall nur um maximal 5 % (0,17 m) änderte. Alle, die Spurweite beeinflussenden Faktoren dürfen daher zumindest bei überwiegend geradeaus verlaufendem Kurs, wie z.B. Fahrt in einer Fahrgasse, in ihrer Wirkung auf das Ortungsergebnis nicht überschätzt werden, zumal deren Auftreten nicht kontinuierlich über die ganze Fahrstrecke zu erwarten ist.

Ebenso kann für die Änderung der mittleren Impulsraten keine wesentliche Beeinträchtigung des Kurswinkels festgestellt werden. Die Verringerrung der mittleren Abweichung in Richtung der Y-Komponente ergibt sich aus einer Verkleinerung des auftretenden Kurswinkelfehlers nach 3.9 und beträgt im Versuchsfall maximal 4,4 %. Im Unterschied zu einer Änderung der Spurweite kann allerdings in Übereinstimmung mit 3.8 ein stets proportionaler Wegfehler in Richtung der X-Komponente festgestellt werden, der sich wegen der gegebenen Proportionalität rechnerisch korrigieren läßt.

5.2.2 Ortungsfehler bei Kurvenfahrt (8-Kurs) ¹

Um die Ortungsgenauigkeit der Sensoren bei Kurvenfahrt und den dabei auftretenden dynamischen Einflüssen zu prüfen, wurden insgesamt fünf Fahrten entlang des oben beschriebenen "8-Kurses" durchgeführt (Fahrt 1 und 2 entgegen dem Uhrzeigersinn, Fahrt 3 bis 5 im Uhrzeigersinn). Für die Ultraschallsensoren liegen für die Fahrten 2 und 4 wegen eines Ausfalls während der Meßwerterfassung keine Daten vor.

Ortungsgenauigkeit der vorderen Radsensoren

Für die vorderen Radsensoren ergibt sich, wie bereits bei Geradeausfahrt zu erkennen war, ein sich mit dem Weg fortpflanzender Ortungsfehler (Abb. 36 bis 40). Er resultiert sowohl aus einem Wegfehler (ca. 10 %) als auch einem Kurswinkelfehler. Längere Geraden werden in der Rekonstruktion durch einen Winkeloffset überlagert und damit gekrümmt dargestellt. Dies läßt, abgesehen vom Einfluß eines digitalen Quantisierungsfehlers, auf ein von 1 abweichendes Radumfangsverhältnis bzw. eine dynamische Änderung des Impulsratenverhältnisses der beiden Sensoren schließen.

¹

Bei sehr hoher Übereinstimmung zwischen den rekonstruierten Fahrkurven verschiedener Wiederholungen wurden diese aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eigens abgebildet

Auffallend ist die hohe Übereinstimmung der Ortungsergebnisse zwischen den Wiederholungen bei gleicher Umfahrungsrichtung. Dies ist auf einen erheblichen Einfluß der sich bei Kurvenfahrten ändernden Fahrzeugparameter (z.B. unterschiedliche Einfederung, Radbelastung usw. je nach Umfahrungsrichtung) auf den aus den Wegdifferenzen abgeleiteten Kurswinkel zurückzuführen. Insgesamt bleibt der Standortfehler über eine Wegstrecke von ca. 100 m ab Fahrtbeginn vergleichsweise gering (maximale Abweichung ca. 5 m), wobei Kurven- als auch Geradeausfahrt gut nachvollzogen werden. Trotz des erheblichen Winkelfehlers kann nach zwei Fahrten (Fahrt 1 und 2) ein "Zurückfinden" zum Ausgangspunkt zumindest in Richtung der Y-Koordinate erreicht werden.

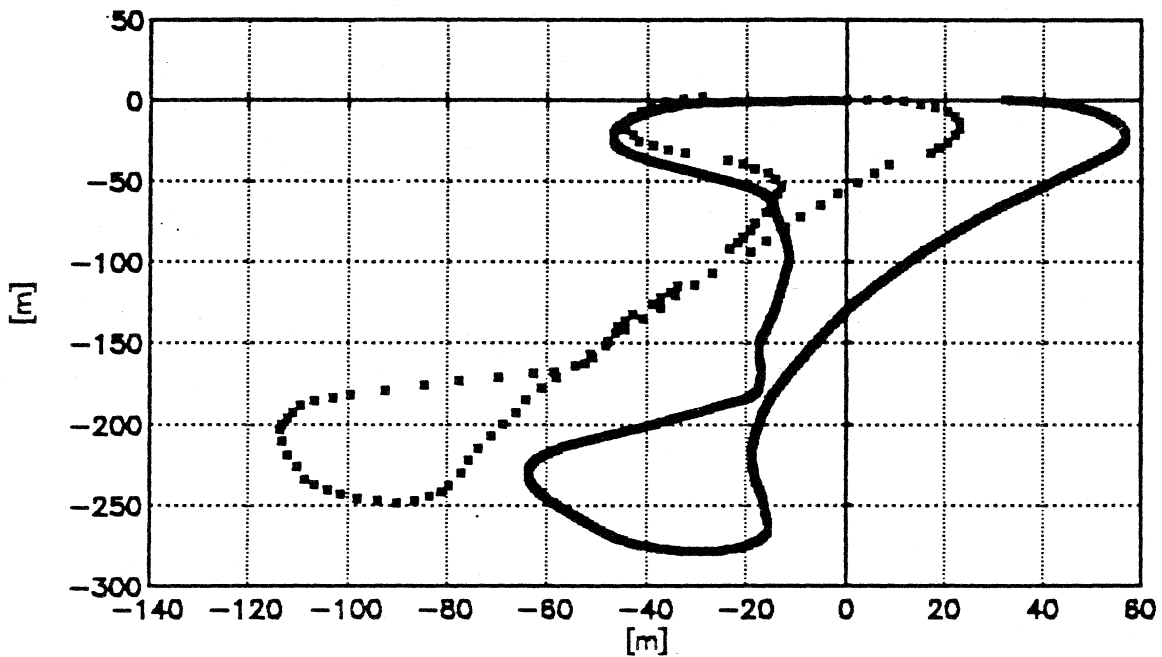


Abbildung 36: 8-Kurs, 1. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

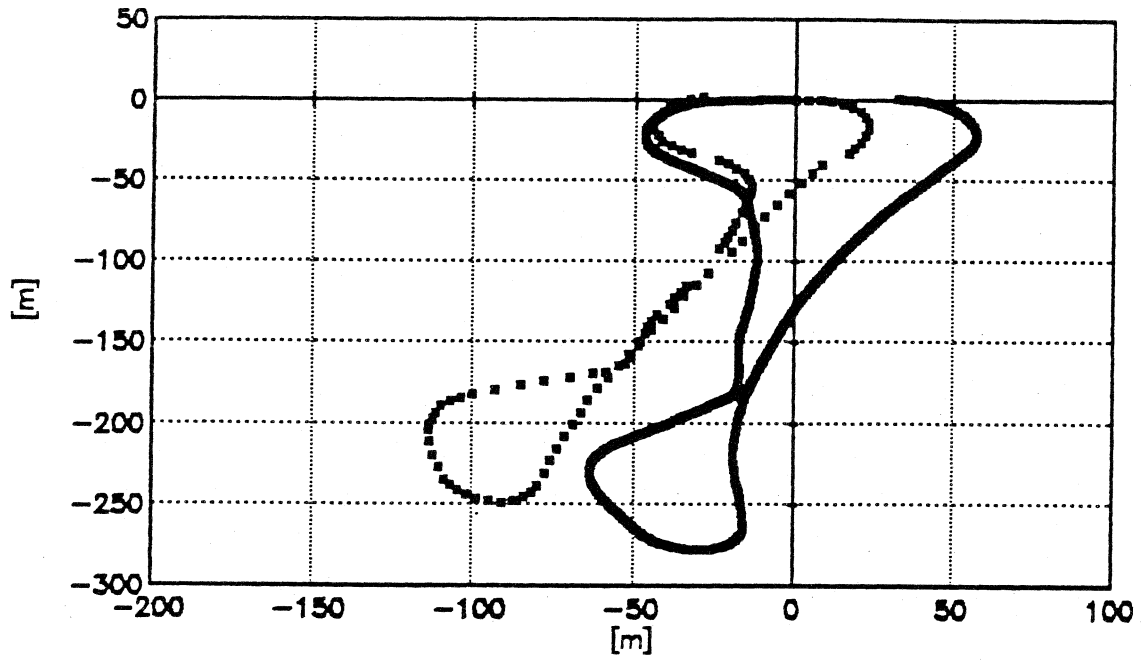


Abbildung 37: 8-Kurs, 2. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

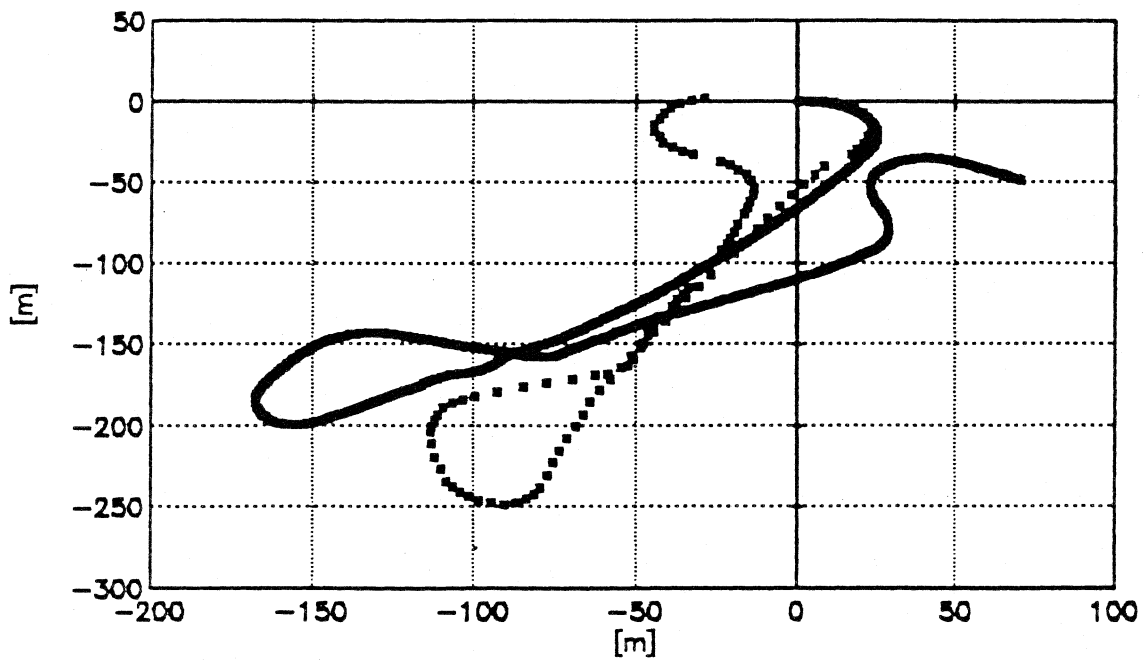


Abbildung 38: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

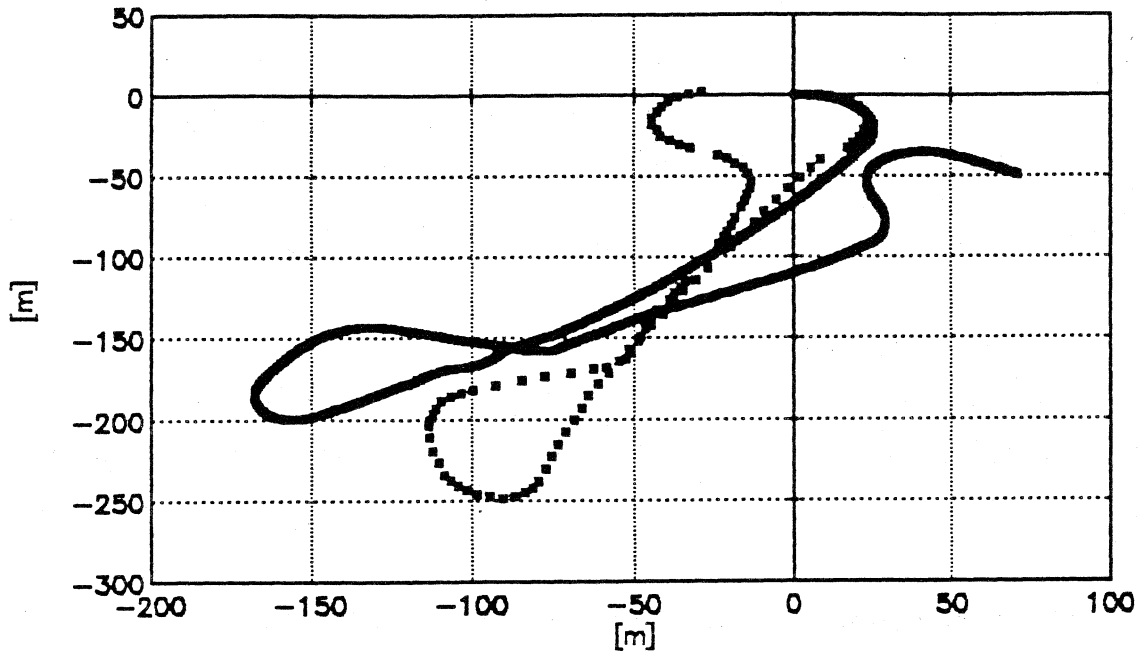


Abbildung 39: 8-Kurs, 4. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

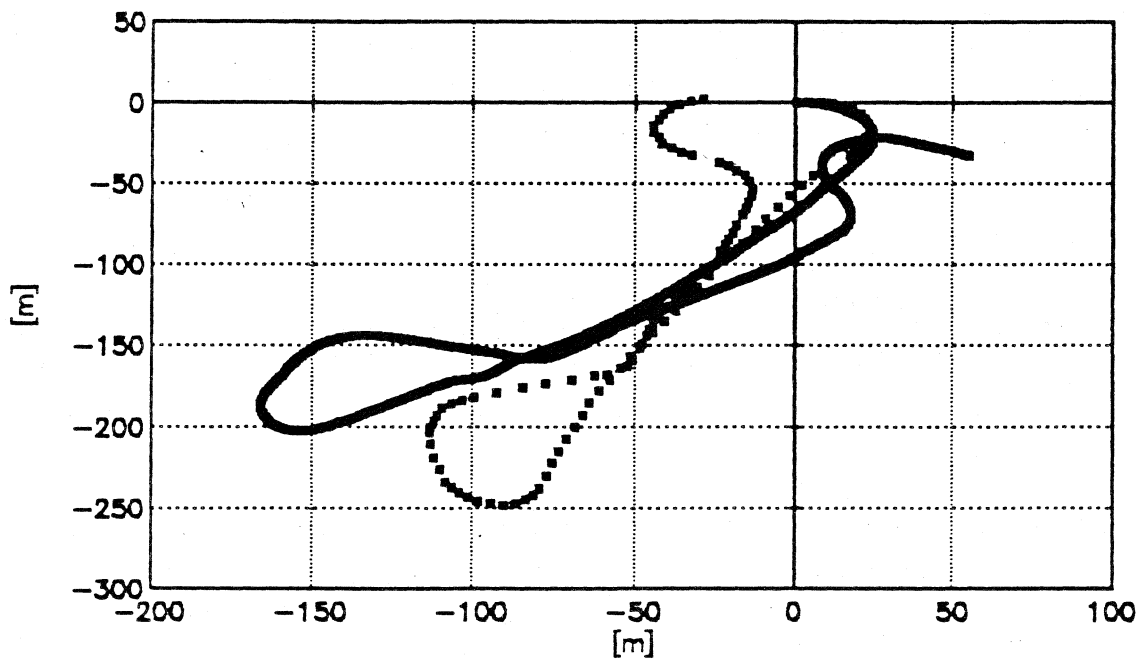


Abbildung 40: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren

Ortungsgenauigkeit der hinteren Radsensoren

Auch die rekonstruierten Fahrkurven für die hinteren Radsensoren lassen deutlich einen mit dem Weg zunehmenden Ortungsfehler als typisches Merkmal der Koppelnavigation erkennen (Abb. 41 bis 43). Eine gute Übereinstimmung mit dem Originalkurs wird über eine Fahrstrecke von ca. 20 bis 90 m ab Fahrtbeginn erreicht. Kurvenfahrten werden nicht in jedem Fall als solche erkannt (Fahrt 1 und 2) bzw. übertrieben dargestellt (Fahrten 3 bis 5), was schließlich zu erheblichen Standortfehlern führt.

Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse für die jeweilig gleiche Umfahrungsrichtung ist sehr hoch, so daß nach Vergleich der Rohdaten eine Übereinstimmung der Fahrkurven von Fahrt 1 und 2 bzw. 3 und 4 sowie z.T. auch für Fahrt 5 festgestellt werden kann. Wie bereits die Ergebnisse der Geradeausfahrt zeigten, tritt im Vergleich zu den vorderen Radsensoren bei der Geradennachbildung eine geringere Krümmung ein (Abb. 41). Dies dürfte hier u.a. auf einen geringeren Fehler durch Schlupf beim Abgreifen der nicht angetriebenen Hinterräder und auf ein evtl. selteneres Auftreten des digitalen Quantisierungsfehlers zurückzuführen sein.

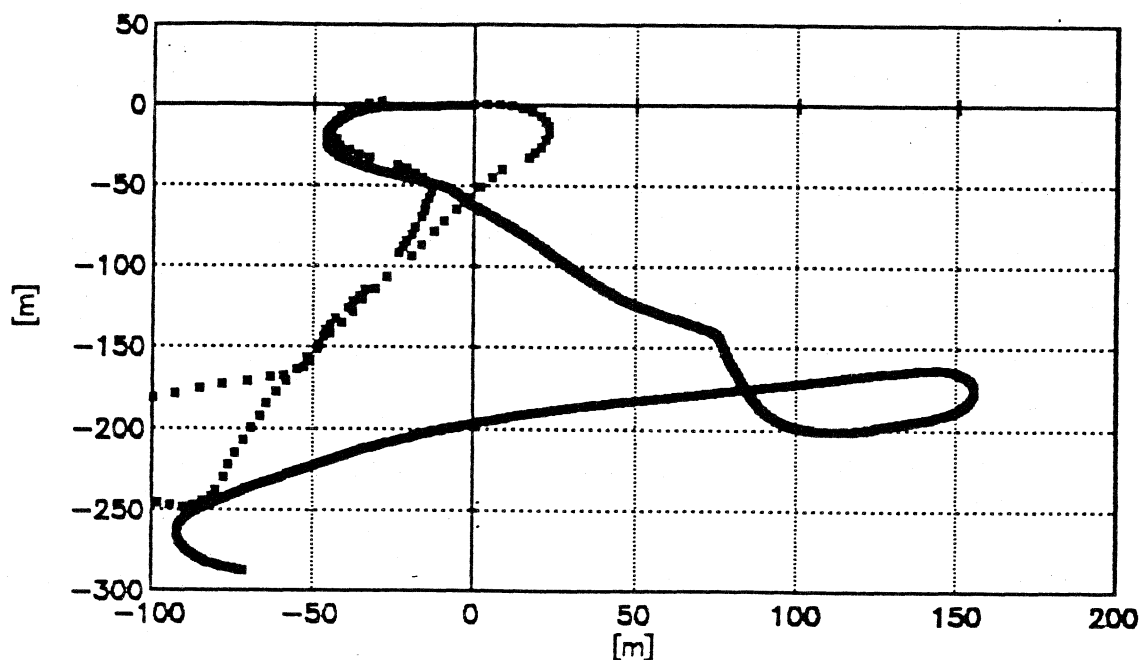


Abbildung 41: 8-Kurs, 1. (bzw. 2.) Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren

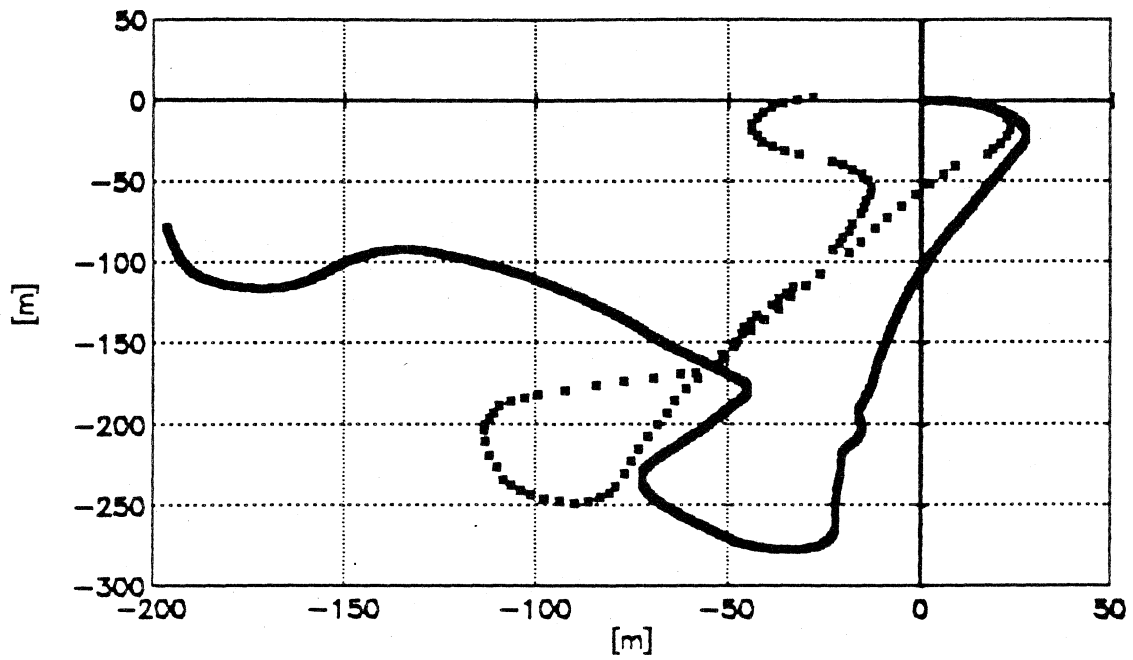


Abbildung 42: 8-Kurs, 3. (bzw. 4.) Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren

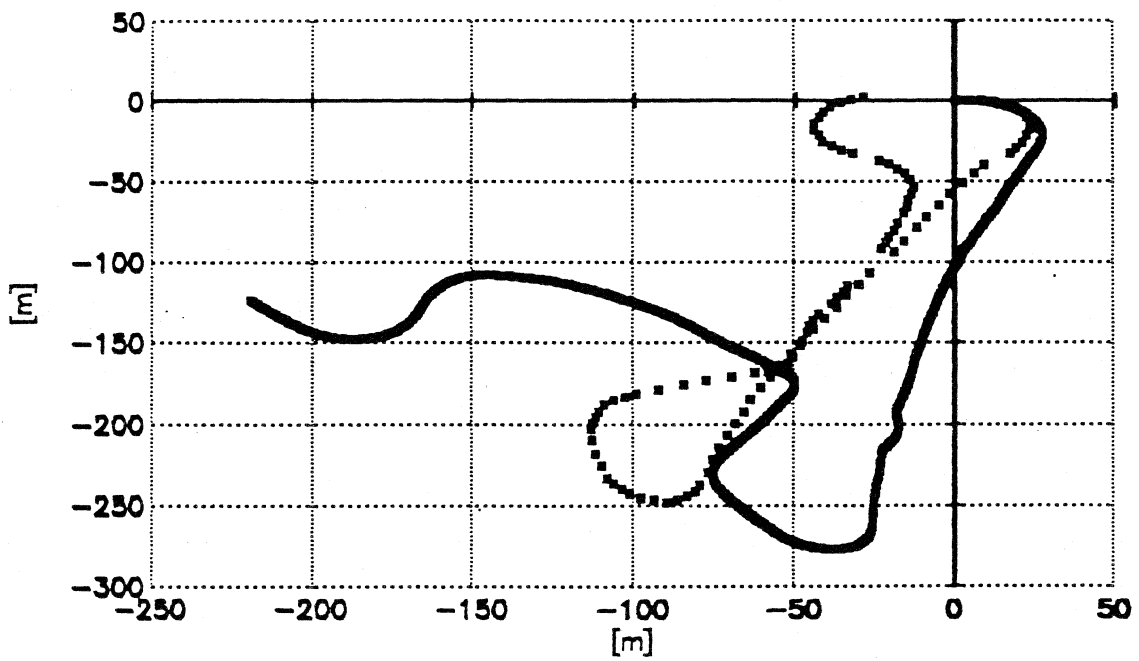


Abbildung 43: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren

Ortungsgenauigkeit der Ultraschallsensoren

Die Güte der Ortsbestimmung mit Hilfe der Ultraschallsensoren entspricht insgesamt betrachtet etwa den Ergebnissen, wie sie sich für die hinteren Radsensoren ergaben (Abb. 44 bis 46). Auch hier zeigt sich der für das Ortungsverfahren typische mit dem Weg zunehmende Verlust an Ortungsgenauigkeit.

Der Standortfehler kann trotz der schlupfunabhängigen Wegmessung nicht sichtbar verringert werden. Im günstigsten Fall wird über eine Wegstrecke von ca. 80 m nach Fahrtbeginn der Kursverlauf mit relativ geringer Abweichung (ca. 5 m bis 10 m) nachvollzogen (Abb. 46).

Als kritisch ist sicherlich der Ausfall der Ultraschallsensoren während der Fahrten 2 und 4 (ebenso wie in Vorversuchen) anzusehen, da diese nicht absolut arbeiten und damit eine Wiederaufnahme der Ortung unmöglich wird.

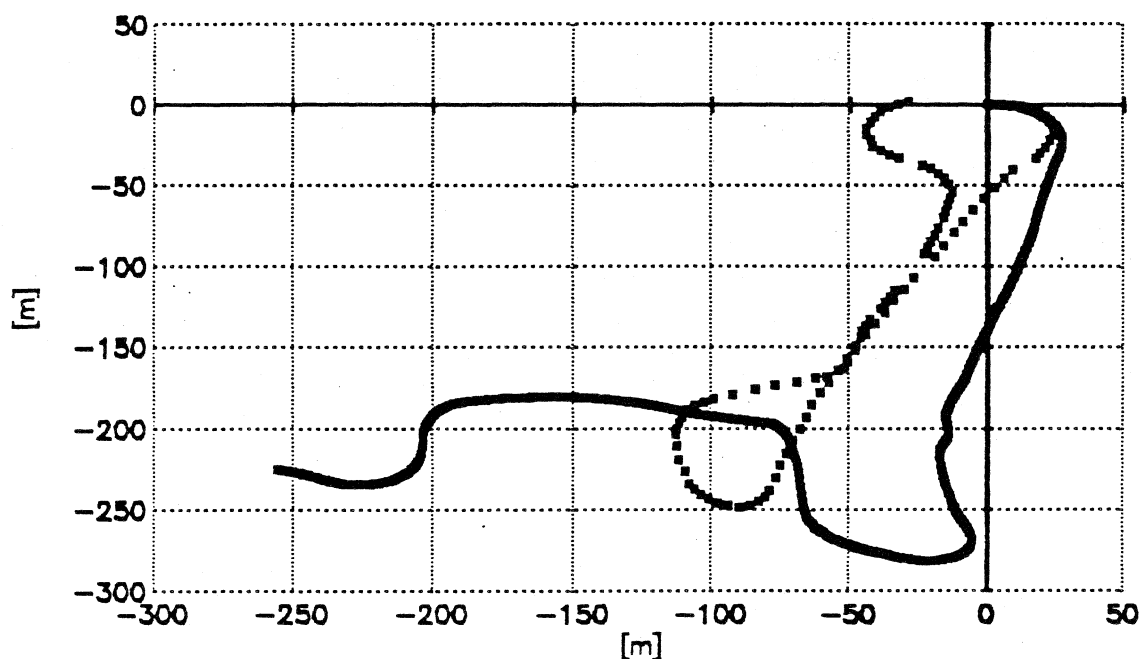


Abbildung 44: 8-Kurs, 1. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren

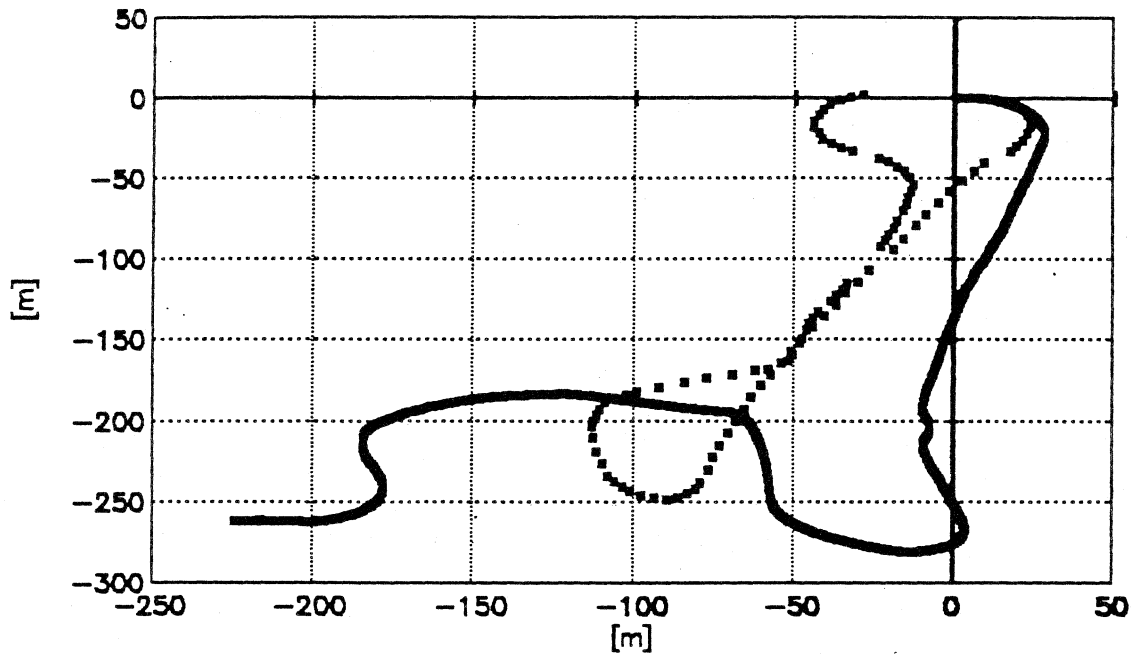


Abbildung 45: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren

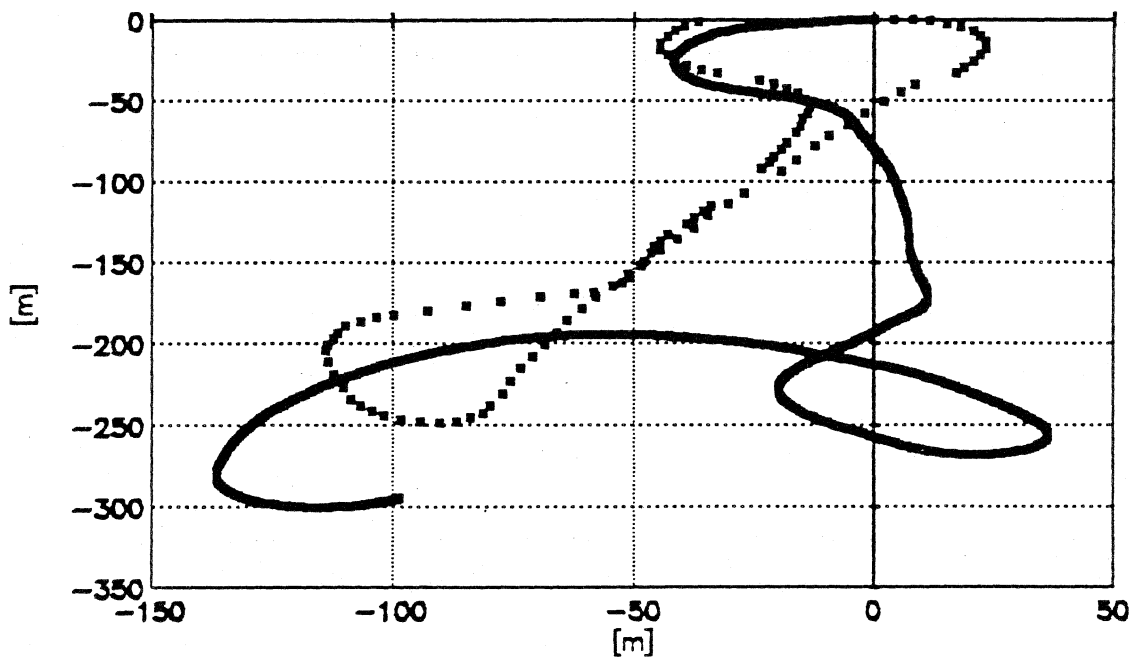


Abbildung 46: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren

Ergebnisse

Bei einem Vergleich der rekonstruierten Kurse für alle Sensorenpaare (va. der hinteren Radsensoren und Ultraschallsensoren) fällt ein ähnlicher Verlauf innerhalb der Wiederholungen und, wie oben bereits erwähnt wurde, zwischen den Wiederholungen einer Umfahrungsrichtung auf. Es ist daher anzunehmen, daß beim durchgeführten Versuch im wesentlichen die Fahrzeug- bzw. Sensorparameter, die in die Koppelrechnung eingehen, für die Ortungsgüte von entscheidender Bedeutung waren.

Ebenso wie für das Vorgehen bei Geradeausfahrt wurden daher für die gesamte Fahrstrecke die Parameter Spurweite, mittlere Impulsrate und Impulsratenverhältnis beispielhaft anhand einer Fahrt (Fahrt 3) geändert, um ihre Auswirkung auf die Ortungsgenauigkeit zu quantifizieren.

5.3 Einfluß einer Veränderung von Spurweite, mittlerer Impulsrate und Impulsratenverhältnis auf die Ortungsgüte bei Kurvenfahrt

Um einen möglichen Einfluß einer Spurweitenänderung deutlich darzustellen, wurde diese für die simulierte Fahrkurve mit +5 % angenommen (Abb. 47 bis 49). Ein Vergleich mit dem ursprünglichen Kursverlauf (Abb. 38, 42, 45) läßt erkennen, welcher erheblicher Einfluß auf das Koppelergebnis von den die Spurweite ändernden äußeren Faktoren ausgehen kann. Dabei geht mit einer Vergrößerung der Spur eine Abschwächung der auftretenden Kurvenkrümmungen einher. Dieser Effekt tritt bei Geradeausfahrt aufgrund geringerer Kurswinkeländerungen (die im Prinzip nur durch Quantisierungsfehler und Lenkkorrekturen hervorgerufen werden) weniger deutlich in Erscheinung (vgl. 5.2.1). Je kurvenreicher sich also ein Kurs gestaltet, desto ausgeprägter stellt sich der Einfluß einer Spuränderung dar.

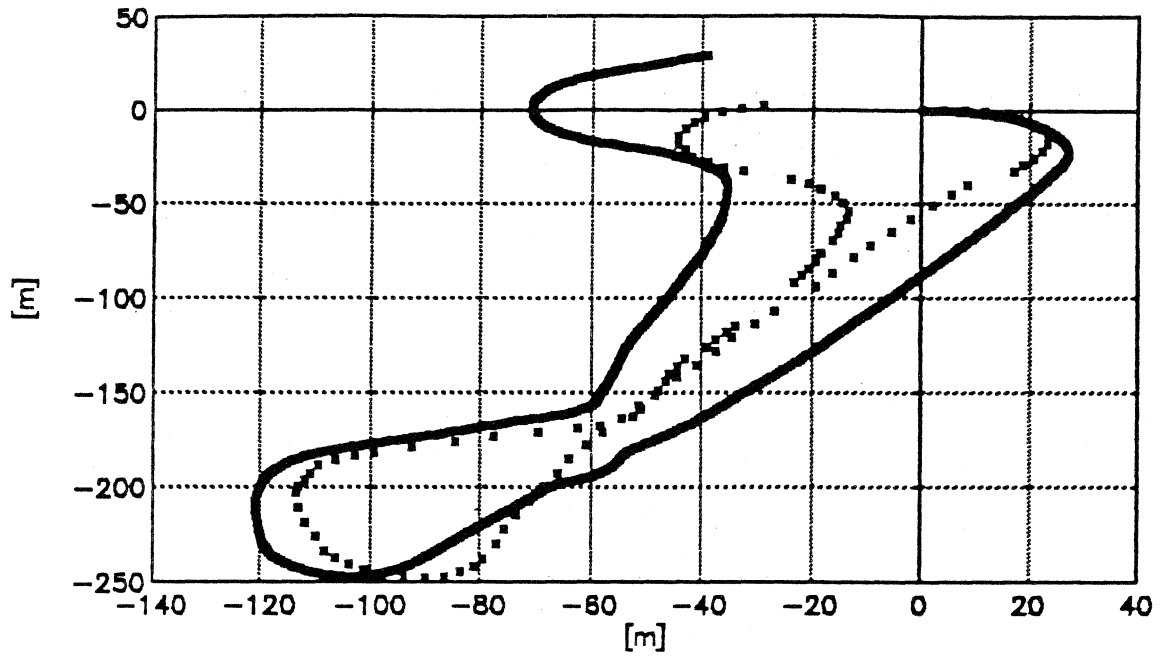


Abbildung 47: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

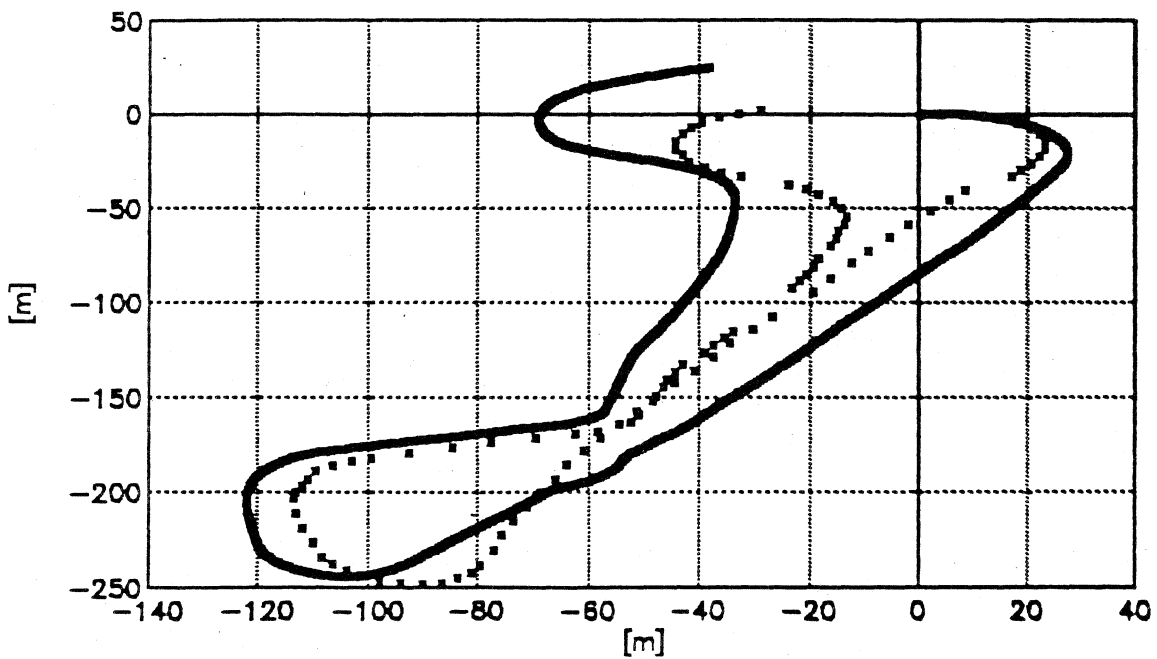


Abbildung 48: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

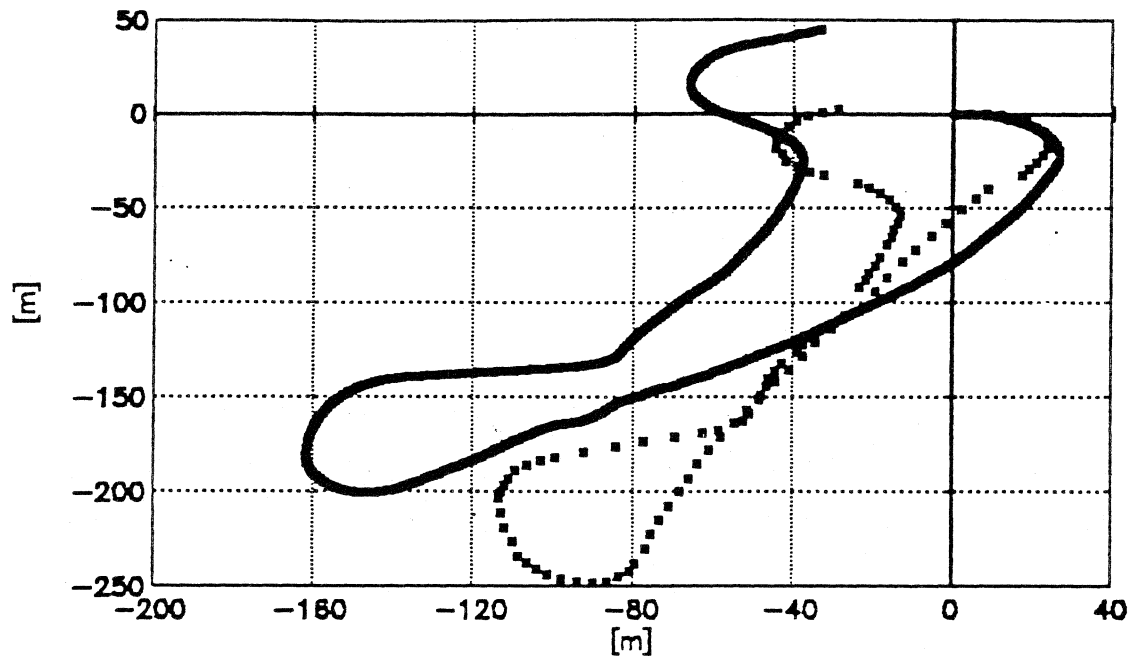


Abbildung 49: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei einer um + 5% veränderten Spurweite

Aus einer Erhöhung der Impulsrate um 2 % resultiert in Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen bei Geradeausfahrt eine proportionale Weglängenänderung von ca. 2 % (13 m) (Abb. 50 bis 52). Desweiteren ergibt sich durch die rechnerische Verkleinerung des Kurvenwinkels eine geringfügige Änderung des Koppelergebnisses. Da das Impulsratenverhältnis allerdings konstant bleibt, ist kein wesentlicher Einfluß auf die Ortungsgüte festzustellen.

Bei Änderung des Impulsratenverhältnisses ergibt sich entsprechend den Ergebnissen bei Geradeausfahrt eine ganz erhebliche Beeinträchtigung des Standortfehlers. Auffallend ist, daß sich hierbei eine z.T. sehr gute Annäherung an den Originalkurs erzielen läßt (Abb. 54).

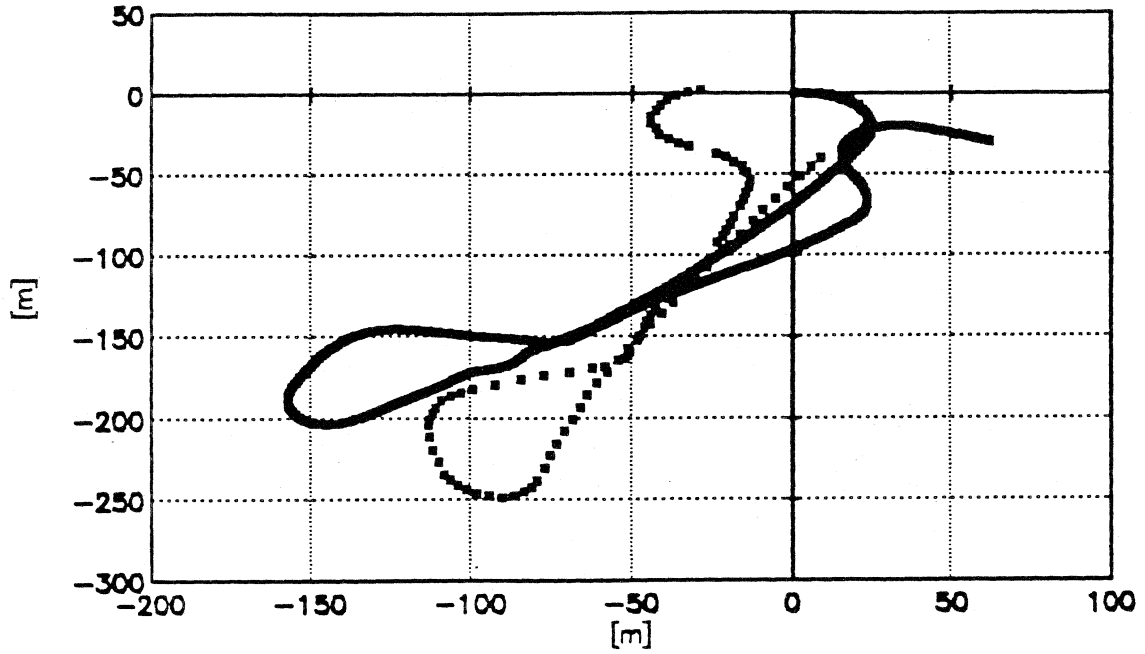


Abbildung 50: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

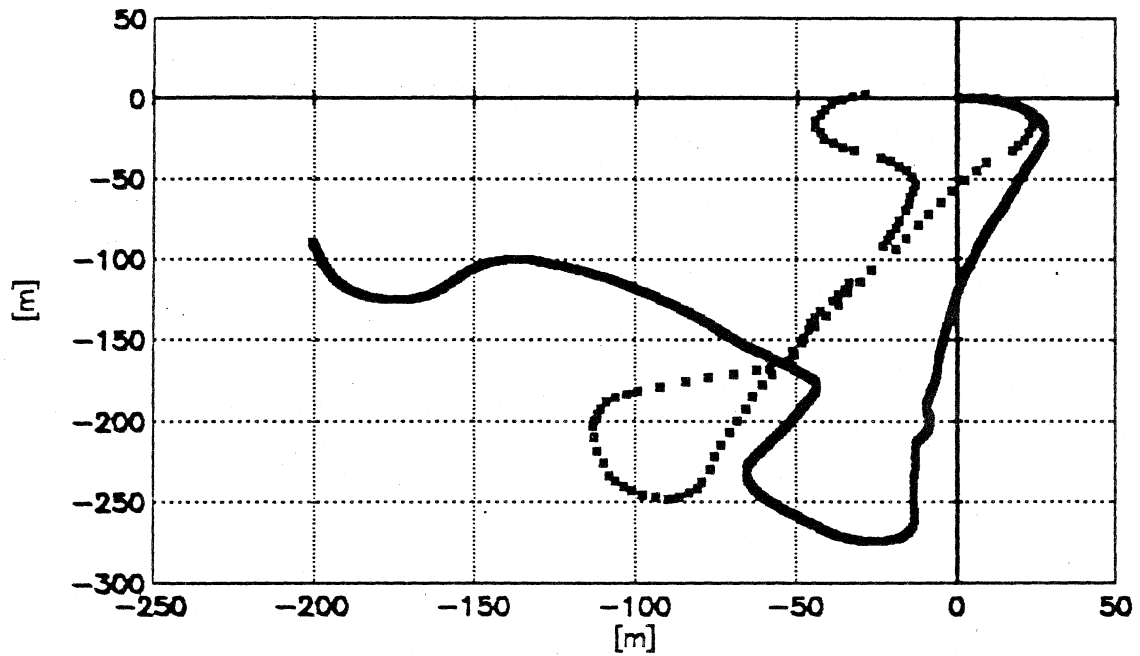


Abbildung 51: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

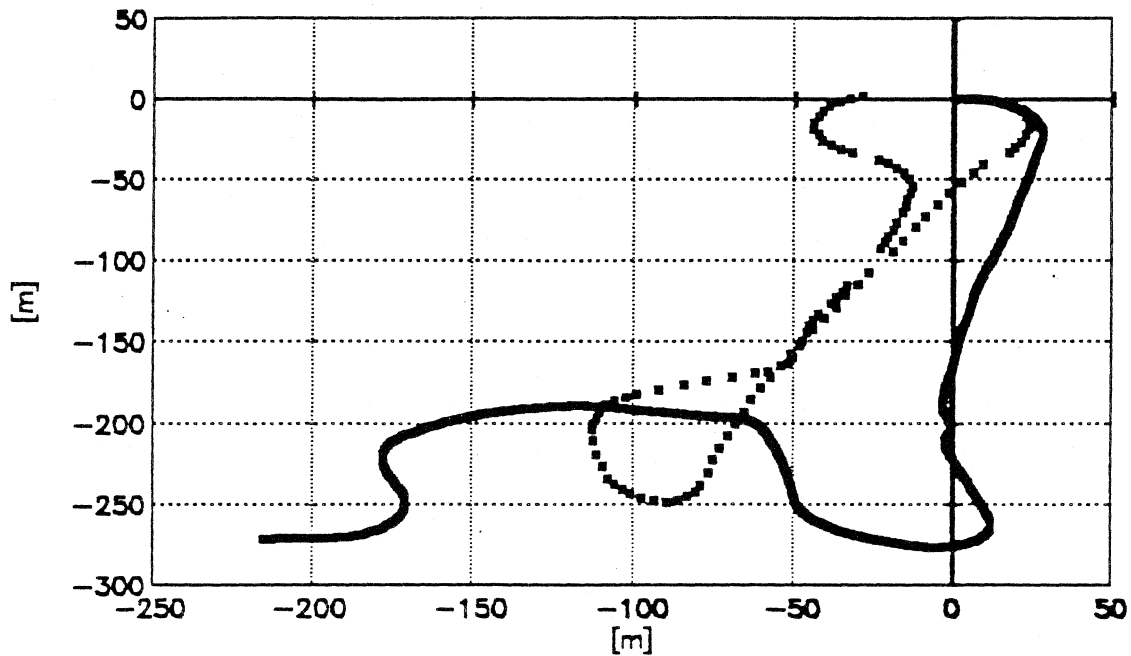


Abbildung 52: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei einer um + 2% veränderten mittleren Impulsrate

5.4 Versuch zur Optimierung des Ortungsergebnisses anhand eines korrigierten Impulsratenverhältnisses

Da der bedeutende Einfluß einer Impulsratenänderung auch in Geradeausfahrt schon erkannt wurde, sollte in einem weiteren Simulationsversuch geprüft werden, ob sich eine Optimierung der Ortung über eine Korrektur des Impulsratenverhältnisses nach erkennbaren Gesetzmäßigkeiten erreichen läßt. Als Optimierungskriterium wurde die Übereinstimmung von Start- und Zielkoordinaten (in zumindest einer Dimension) gewählt. Die Näherung der rekonstruierten Fahrkurve an den Originalkurs bzw. die Änderung der Impulsrate wurde nach dem Verfahren der Intervallschachtelung durchgeführt.

Für die vorderen als auch hinteren Radsensoren kann in allen Fällen durch die Änderung des Impulsratenverhältnisses eine recht gute Übereinstimmung von Start- und Zielkoordinaten als auch eine Verbesserung des Koppelergebnisses insgesamt erreicht werden

(Abb. 53 bis 61). Es wird allerdings deutlich, daß dieses Kriterium alleine zu einer Minimierung des Standortfehlers nicht ausreicht, da sich gerade im Falle der 1. bzw. 2. Fahrt noch erhebliche Abweichungen zwischen rekonstruierter Kurve und Originalkurs aufgrund von Weg- und Winkelfehlern ergeben.

Für die Ultraschallsensoren kann zwar eine im Vergleich zur Ortung ohne Anpassung des Impulsratenverhältnisses verbesserte Abbildung der Fahrkurve erreicht werden. Die extremen Abweichungen im Falle der 1. Fahrt können aber durch das Optimierungsverfahren nicht zufriedenstellend korrigiert werden (Abb. 59). Insgesamt ist aufgrund der sich dynamisch ändernden Einflußfaktoren eine Optimierung des Koppelergebnisses alleine über eine Anpassung des Impulsratenverhältnisses nur sehr begrenzt möglich, zumal sich hierfür keine bestimmten Gesetzmäßigkeiten ableiten lassen.

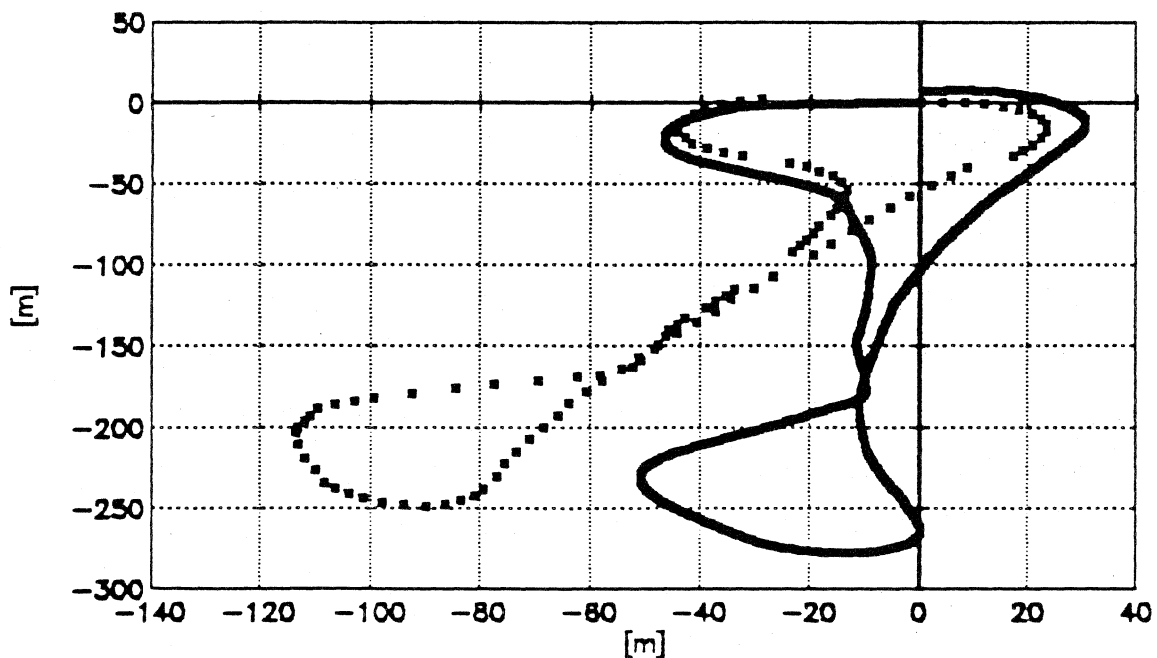


Abbildung 53: 8-Kurs, 1. (bzw. 2.) Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 0,14%)

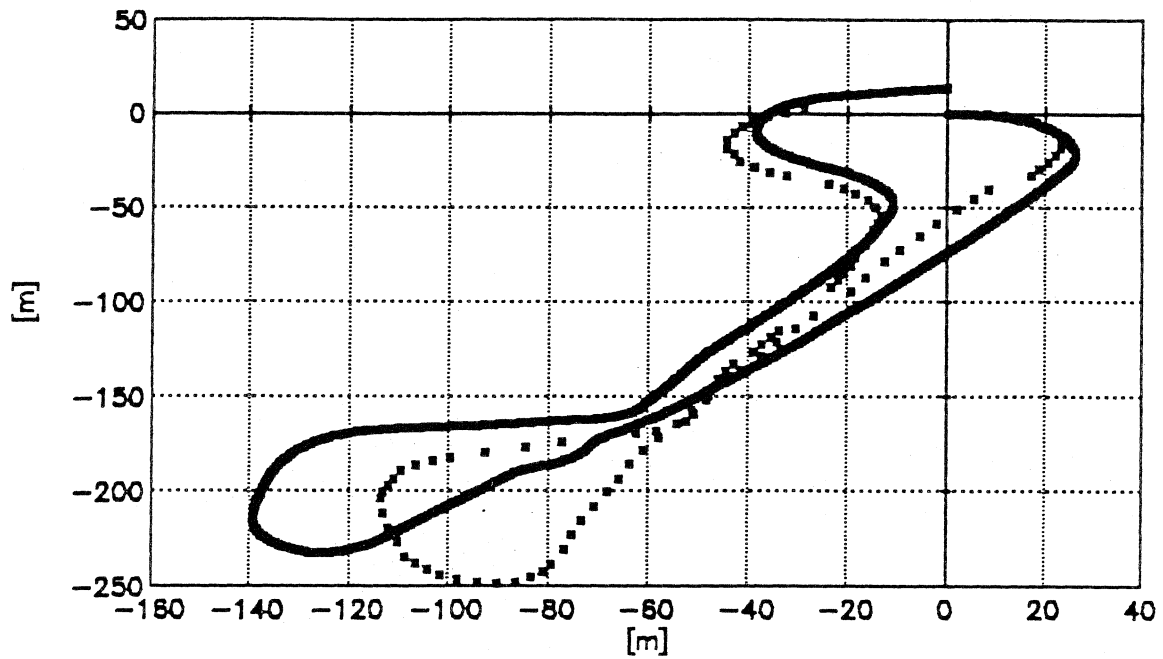


Abbildung 54: 8-Kurs, 3. (bzw. 4.) Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (- 0,2%)

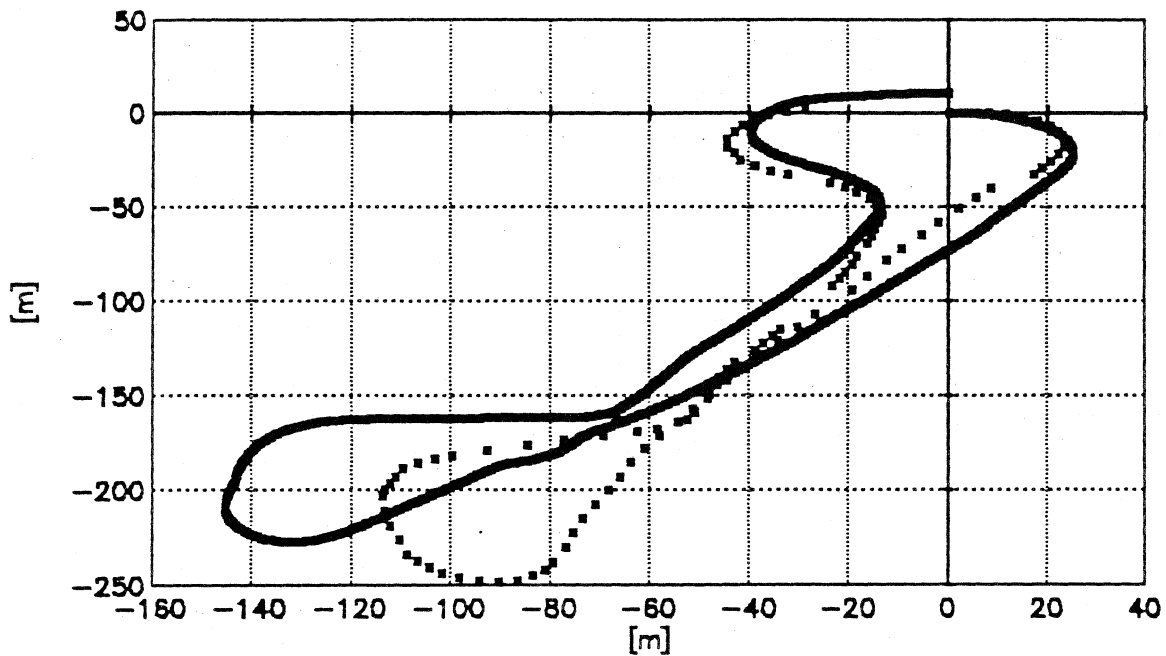


Abbildung 55: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der vorderen Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (- 0,15%)

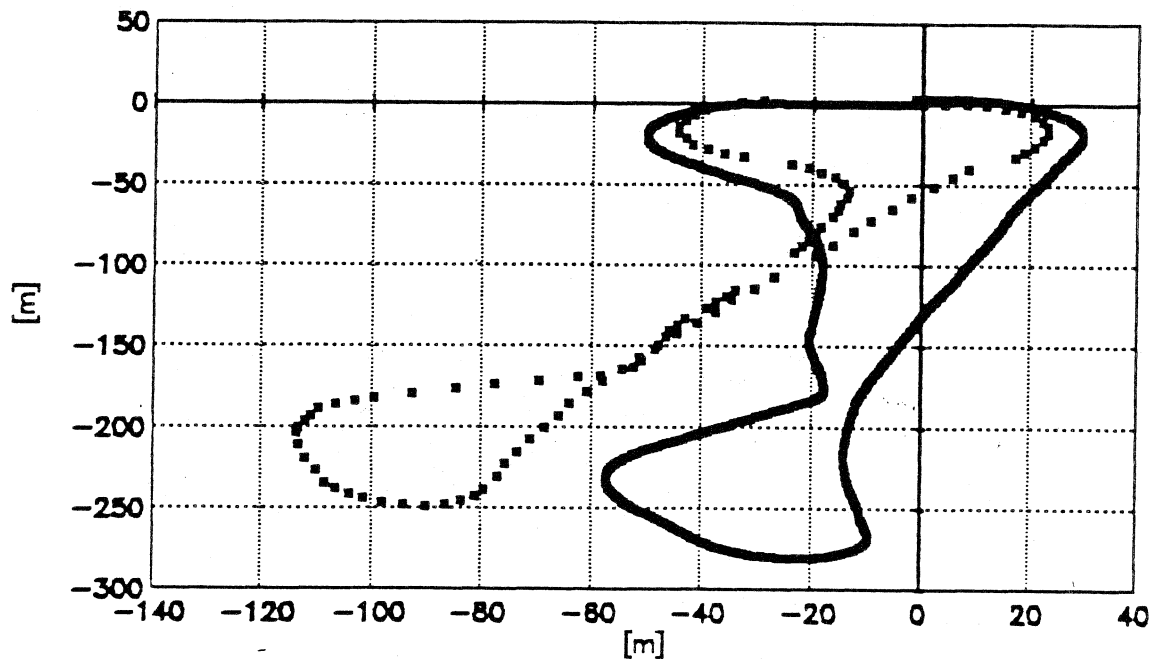


Abbildung 56: 8-Kurs, 1. (bzw. 2.) Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (- 0,74%)

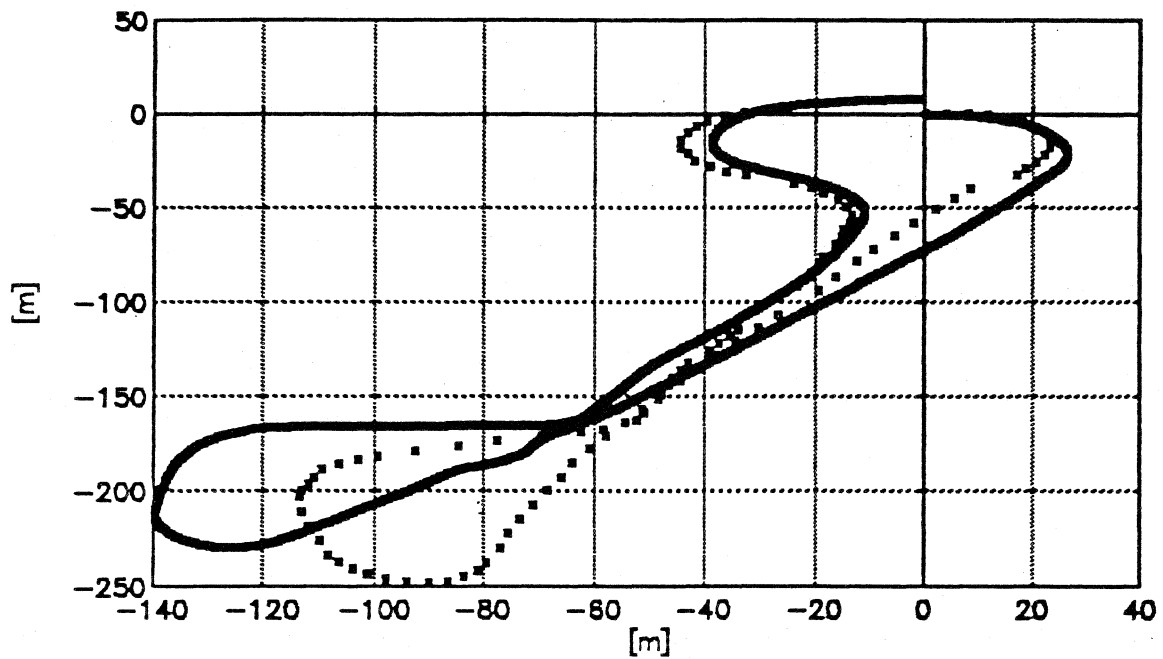


Abbildung 57: 8-Kurs, 3. (bzw. 4.) Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 0,45%)

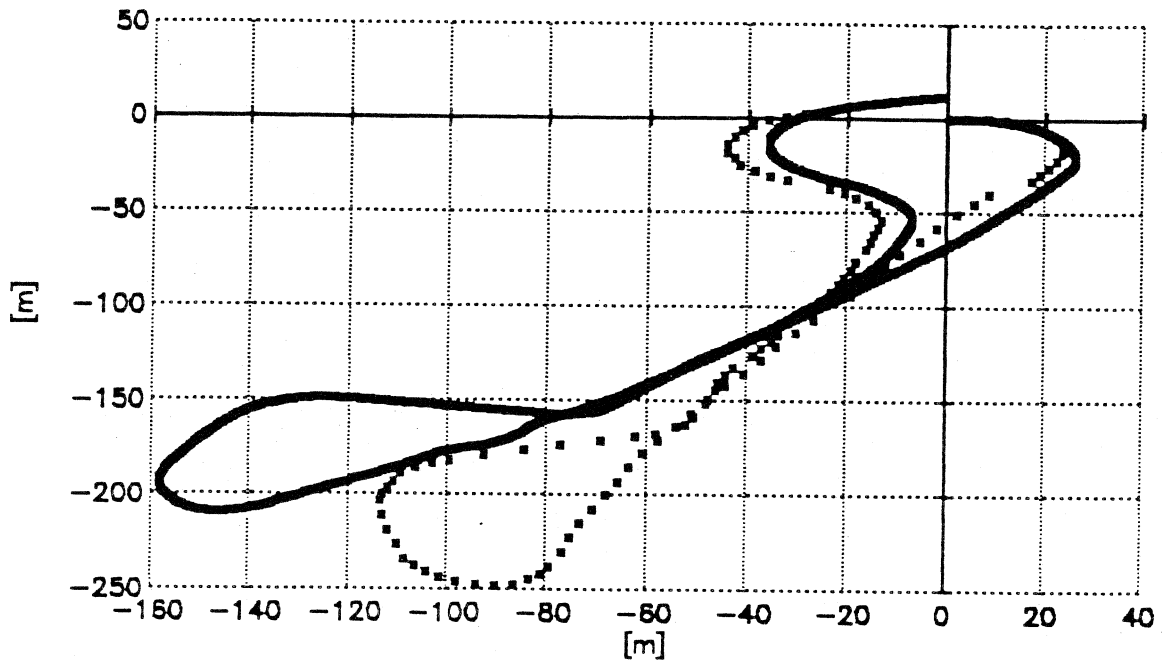


Abbildung 58: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der hinteren Radsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 0,57%)

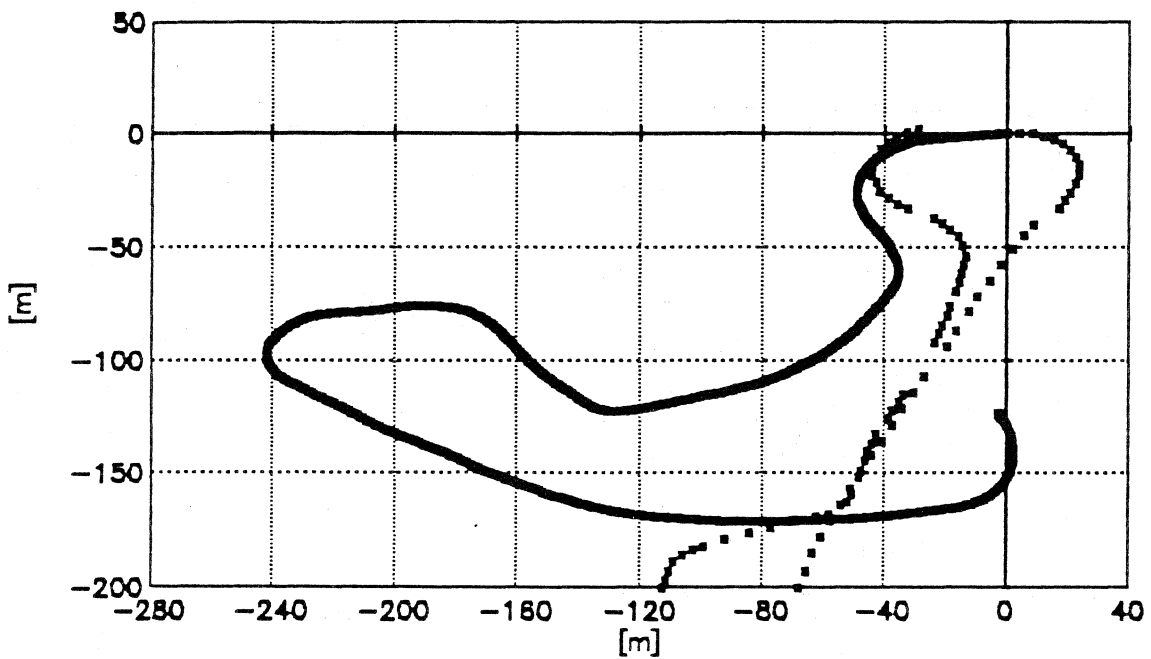


Abbildung 59: 8-Kurs, 1. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 1,49%)

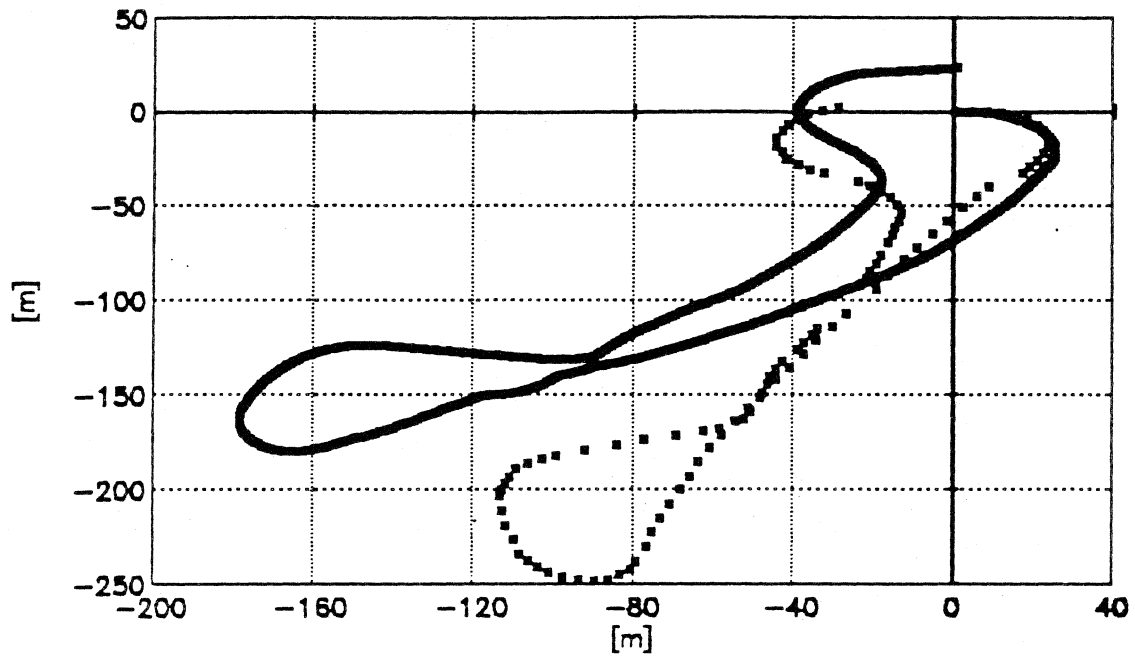


Abbildung 60: 8-Kurs, 3. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 1%)

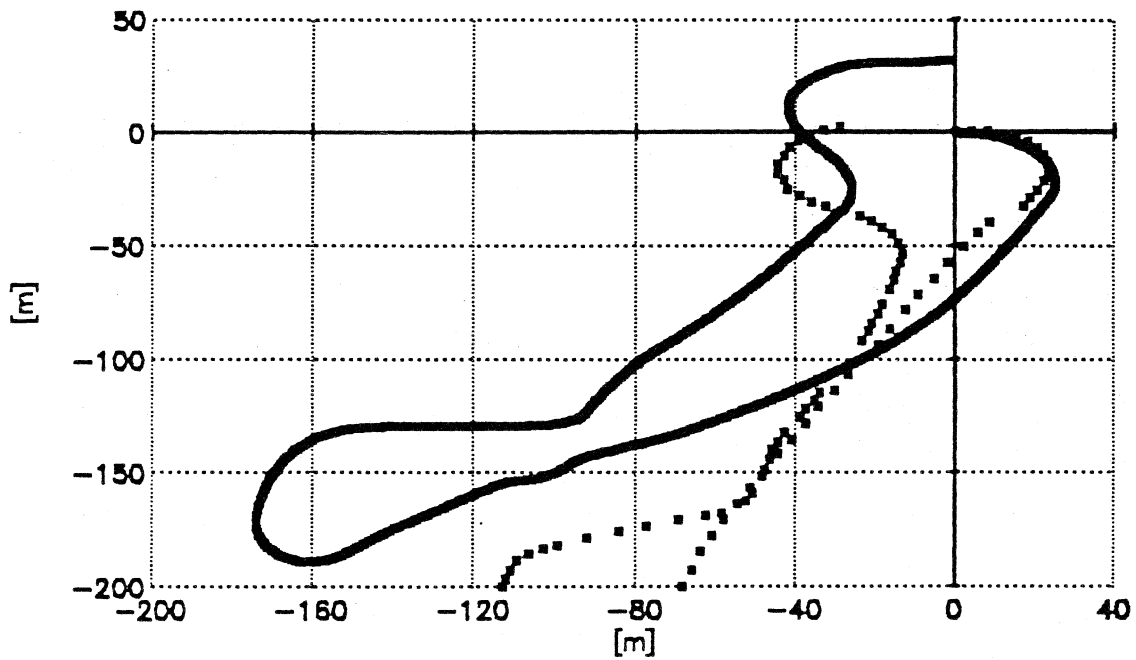


Abbildung 61: 8-Kurs, 5. Fahrt, Ortungsfehler der Ultraschallsensoren bei optimiertem Impulsratenverhältnis (+ 0,88%)

6. Untersuchungen zur Gewinnung der Richtungsinformation durch Messung des Lenkwinkels

Aufgrund der Ergebnisse der Fahrversuche und entsprechender Literaturhinweise [21] sollte in einem weiteren Versuchsabschnitt abgeschätzt werden, inwieweit die zur Koppelrechnung notwendige Richtungsinformation unter Berücksichtigung der kinematischen Zusammenhänge zwischen Rad- und Fahrzeugbewegung auch aus der Messung des Lenkwinkels gewonnen werden kann.

6.1 Grundlagen

Als Meßgröße für die Relativbewegung zwischen Rad und Fahrzeugaufbau bzw. für die Lage der Radmittelebene zur Fahrzeuglängsachse kann u.a. der Einschlagswinkel der Vorderräder, die Stellung der Spurstange oder die Winkelstellung des Lenkrades dienen. Je weiter der Meßpunkt vom Rad entfernt liegt, desto größer sind allerdings die zu erwartenden Fehlereinflüsse aufgrund von Elastizitäten innerhalb der Wirkungskette Lenkrad-Rad.

Der gefahrene Kurvenradius R kann nach BUSCHMANN und KOESSLER 1976 [7], wie aus Abbildung 62 ersichtlich, zumindest unter Voraussetzung annähernd statischer Verhältnisse berechnet werden zu:

$$R = l / \tan(\delta_r) - b_L / 2 \quad \text{und} \quad R = l / \tan(\delta_l) + b_L / 2 \quad (6.1)$$

(b_L = Lenkzapfenspurweite, l = Radstand, δ_r bzw. δ_l = Radeinschlagswinkel des kurvenäußeren bzw. kurveninneren Rades)

Kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen Radeinschlagswinkel δ_r bzw. δ_l und dem Meßwert LW (für den Lenkwinkel) des entsprechenden Lenkwinkelaufnehmers beschrieben werden, so ist damit auch der Kurvenradius R als Funktion des Meßwertes LW gegeben.

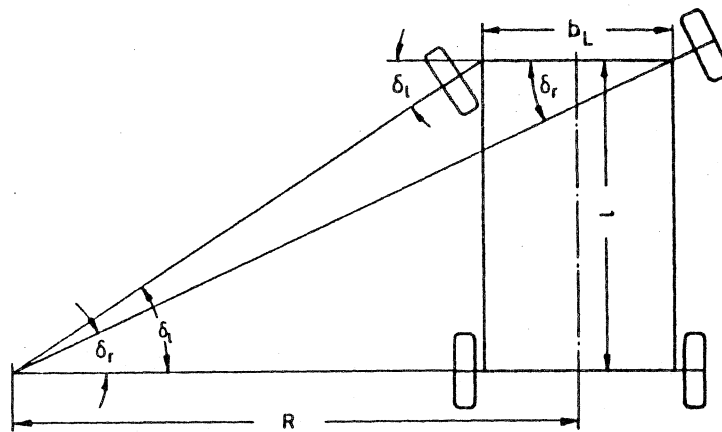


Abbildung 62: Lenkgeometrie für den quasistatischen Fall [7 in 21]

6.2 Methodik und Versuchsaufbau

Am Institut für Landtechnik-Weihenstephan wurden entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise statische Versuche zur Kalibrierung eines Lenkwinkelaufnehmers durchgeführt. Ein eventuell gegebener theoretischer Zusammenhang zwischen Radeinschlagswinkel und Meßwert LW soll in Fahrversuchen zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden.

Der im Rahmen der Versuchsanstellung realisierte Meßwertaufnehmer sollte ohne Veränderung oder teilweiser Demontage der Lenkanlage bei gleichzeitig leichter Zugänglichkeit zur Justierung am Versuchsfahrzeug anzubringen und hoch auflösend sein. Dementsprechend wurde ein Linearpotentiometer mit Schubstange (Megatron SLP 30-200-5k, Linearitätstoleranz $\pm 0,1 \%$) mit Hilfe einer speziellen Halterung zwischen Fahrzeug und Achsschenkel zum indirekten Abgreifen des Radeinschlagswinkels angebracht (Abb. 63).

Die Ausgangsspannung U_a des Potentiometers wird größenordnungsmäßig von der durch eine Normalspannungsquelle (Burster 3401 : E 4,8900 V) aufgebauten Eingangsspannung U_e und von der längenabhängigen Schleiferstellung bestimmt, wofür die

Beziehung $U_a = f(s)$ gilt. Der Windungssprung der Drahtwicklung des Potentiometers, der den begrenzenden Faktor für die Auflösung darstellt, war unter Berücksichtigung der Fragestellung vernachlässigbar gering. Ansonsten könnte mittels Längensensoren mit einer Widerstandsbahn aus Karbonfilm oder Leitplaste eine nahezu unendlich feine Auflösung erreicht werden.

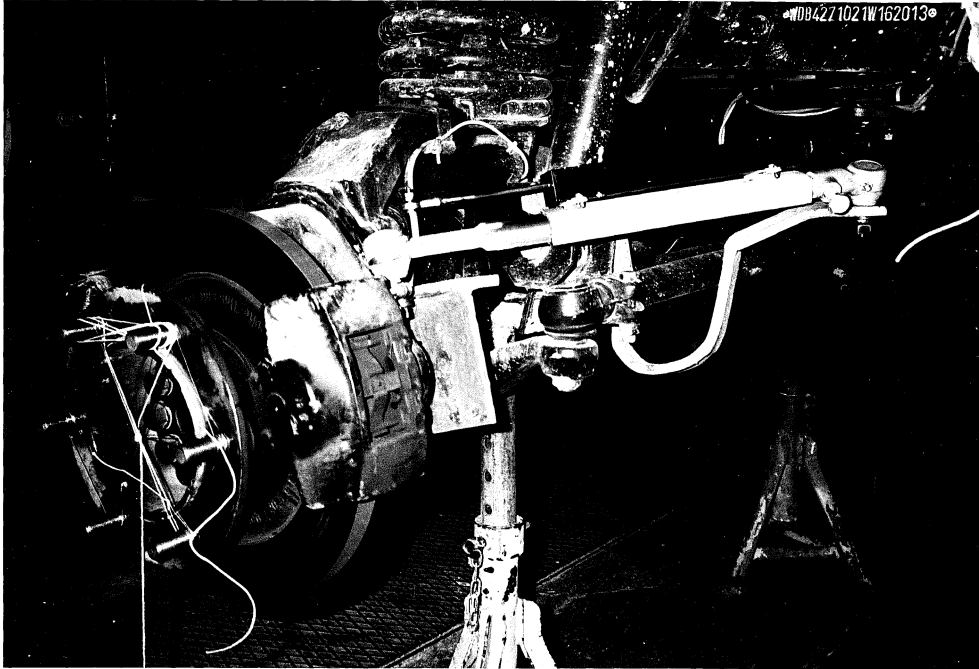


Abbildung 63: Anordnung des Linearpotentiometers am Versuchsfahrzeug (Unimog U 1 400)

Zur Kontrolle des Versuchsverlaufs wurde zwischen Digitalvoltmeter (Hewlett Packard 3468 : MB Auto) und Potentiometer ein Linienschreiber (Lanmann 252 MB 2V) geschaltet (Abb. 65).

Die Vorderachse des Versuchsfahrzeugs (Unimog 1 400) wurde so aufgebockt, daß die Radflanschmittelpunkte eine zu einer Projektionsebene (Metallmaßband) parallele Grundlinie G und die Fahrzeuglängsachse eine Senkrechte zu dieser Projektionsebene bildete. Sowohl an der rechten als auch linken Radflansch fixierte Laserstrahler (Laserpointer Imatronic) projizierten Leuchtpunkte genau auf das Stahlmaßband (Abb. 64). Dieses ermöglichte aufgrund seiner Flexibilität, die sich aus der Lenkgeometrie ergebende vertikale Verschiebung der Leuchtpunkte zu verfolgen.

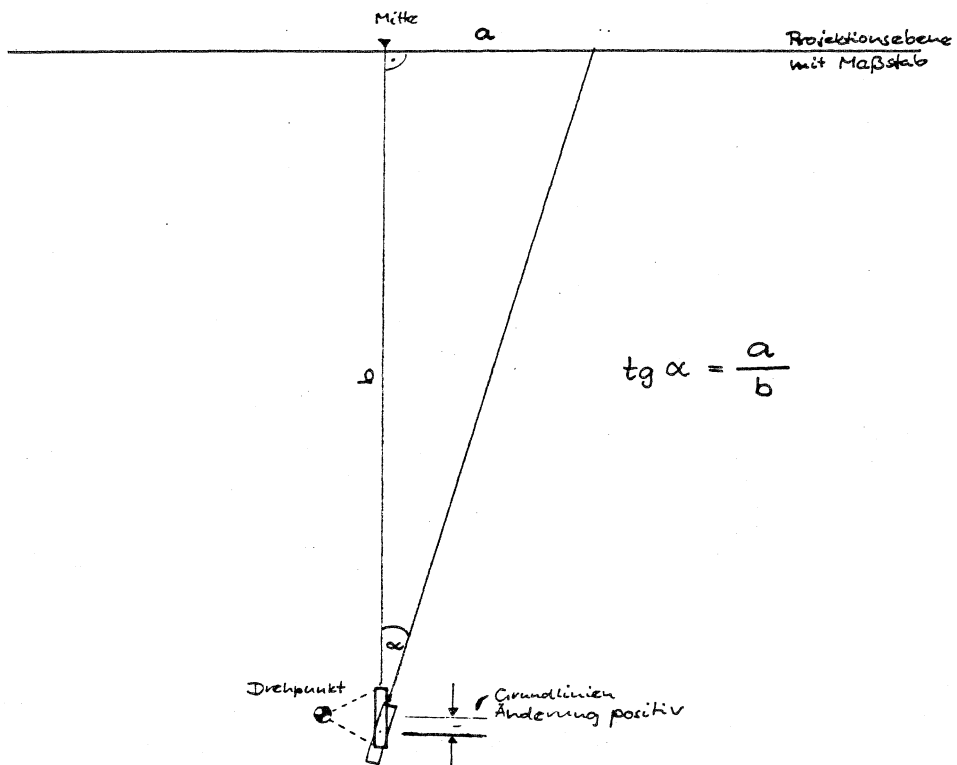


Abbildung 64: Lenkwinkelsensor, Auswertung des Meßprotokolls

Meßaufbau:

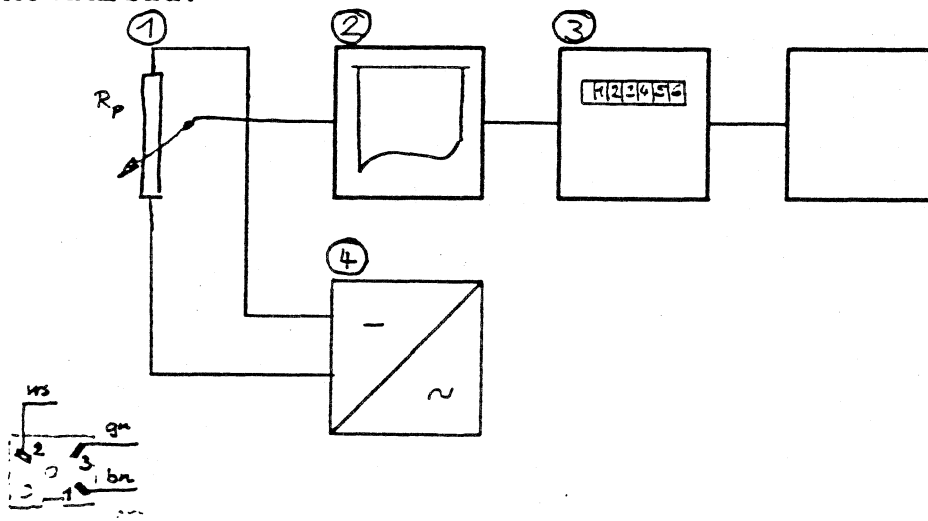


Abbildung 65: Meßaufbau zur Kalibrierung des Lenkwinkelsensors:
 1. Linearpotentiometer, 2. Linienschreiber, 3. Digitalvoltmeter, 4. Normalspannungsquelle

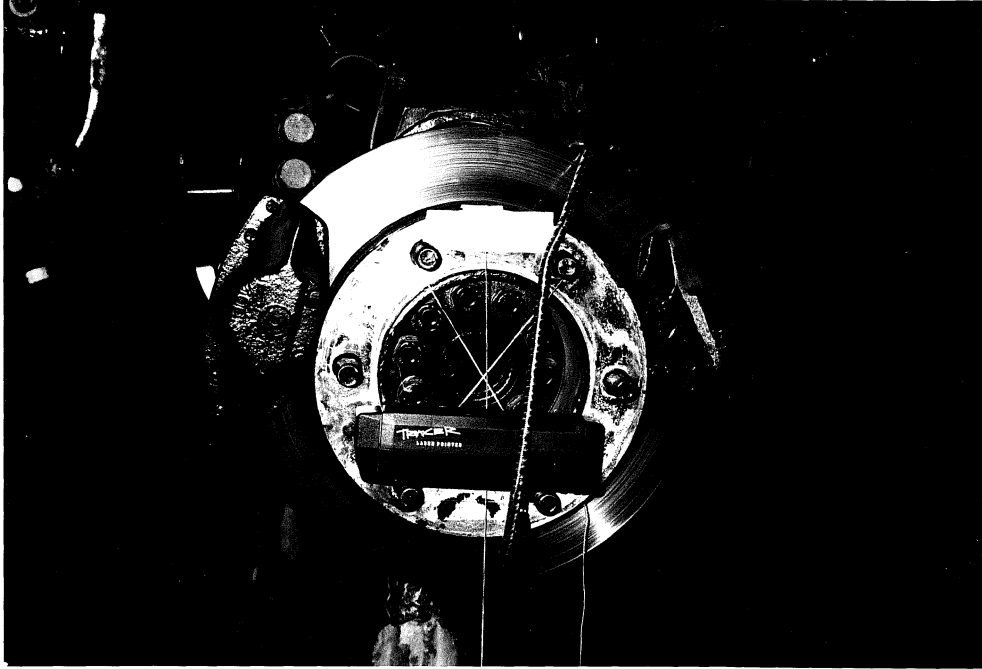


Abbildung 66: Anordnung des Laserpointers (Imatronic) an der Radflansch

Die Radeinschlagswinkel δ_r bzw. δ_l wurden (nach Abb. 64) berechnet zu:

$$\text{TAN}(\delta_r) = a / b_r \quad (6.2)$$

$$\text{TAN}(\delta_l) = a / b_l \quad (6.3)$$

(a = Abstand zwischen Grundlinie und Projektionsebene korrigiert um die sich aus dem Radsturz ergebende negative bzw. positive Grundlinienänderung, b_r bzw. b_l = Strecke zwischen den Laserprojektionspunkten bei genauer Mittelstellung der Fahrzeugräder (Geradeausfahrt) und jeweiliger Winkelstellung (Kurvenfahrt))

6.3 Versuchsdurchführung

Zur Meßwertgewinnung wurden die Radeinschlagswinkel zur Simulation einer Kurvenfahrt in beliebigen aber etwa gleichen Winkelabständen von der Mittelstellung der Räder ausgehend bis zum maximalen Winkel variiert und die entsprechenden Anzeigewerte des Digitalvoltmeters sowie die Strecken a und b_r bzw. b_l notiert.

6.4 Versuchsergebnisse

Folgende linearen Beziehungen wurden für die jeweiligen Radeinschlagswinkel und den Meßwert LW des Voltmeters (bzw. Linearpotentiometers) im Stand meßtechnisch ermittelt:

Rechtseinschlag rechtes Rad (Abb. 67):

$$\delta_r = 34,74^\circ - 0,0014^\circ * LW; \quad r = 0,999 \quad (6.4)$$

Linkseinschlag rechtes Rad (Abb. 68):

$$\delta_r = - 33,08^\circ + 0,0013^\circ * LW; \quad r = 0,999 \quad (6.5)$$

Rechtseinschlag linkes Rad (Abb. 69):

$$\delta_l = 30,75^\circ - 0,0012^\circ * LW; \quad r = 0,999 \quad (6.6)$$

Linkseinschlag linkes Rad (Abb. 70):

$$\delta_l = - 39,18^\circ + 0,0015^\circ * LW; \quad r = 0,997 \quad (6.7)$$

Damit ergibt sich mit 6.1 folgender theoretischer Zusammenhang zwischen gefahrenem Radius R und dem Meßwert für den Radeinschlagswinkel des Versuchsfahrzeugs:

für Rechtskurven:

(rechtes Rad)

$$R = 1 / \text{TAN} (34,72^\circ - 0,0014^\circ * LW) + b_L / 2 \quad (6.8)$$

(linkes Rad)

$$R = 1 / \text{TAN} (30,75^\circ - 0,0012^\circ * LW) - b_L / 2 \quad (6.9)$$

für Linkskurven:

(rechtes Rad)

$$R = 1 / \text{TAN} (- 33,0842^\circ - 0,0013^\circ * LW) - b_L / 2 \quad (6.10)$$

(linkes Rad)

$$R = 1 / \text{TAN} (- 39,1811^\circ + 0,0015^\circ * LW) + b_L / 2 \quad (6.11)$$

Die aufgenommenen Kennlinien können nach einer Überprüfung in Fahrversuchen durch Hinzufügen entsprechender Terme so modifiziert werden, daß auch Einflüsse wie z.B. eine Fahrzeugquerbeschleunigung Berücksichtigung finden.

Allerdings wird darauf hingewiesen, daß bei sehr großen Kurvenradien (> 100 m) die Auflösung stark abnimmt und die Fehlerquelle Schlupf bei der Messung des Lenkwinkels nicht miterfaßt wird. Zudem ist eine exakte Kalibrierung des Systems für jeden Fahrzeugtyp individuell erforderlich und für den Endbenutzer wegen des großen Platzbedarfs meist selbst nicht durchführbar [21].

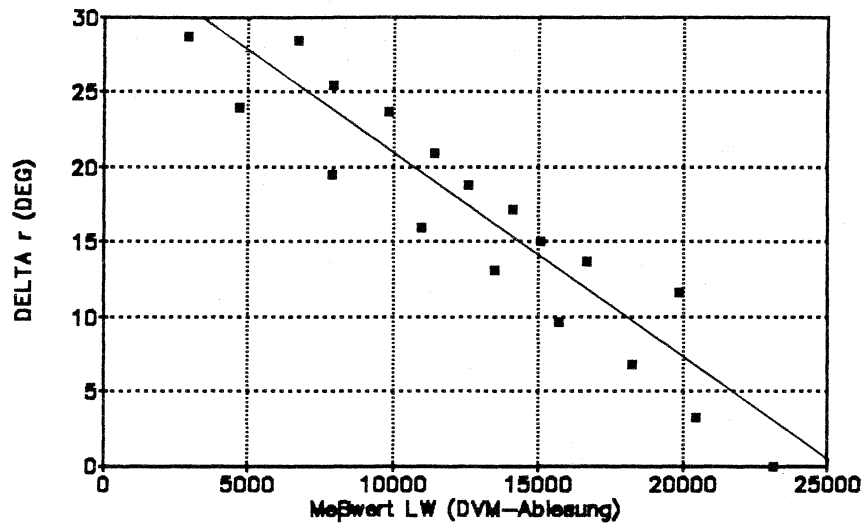


Abbildung 67: Radeinschlagswinkel δ_r als Funktion des Meßwertes LW bei Rechtskurven

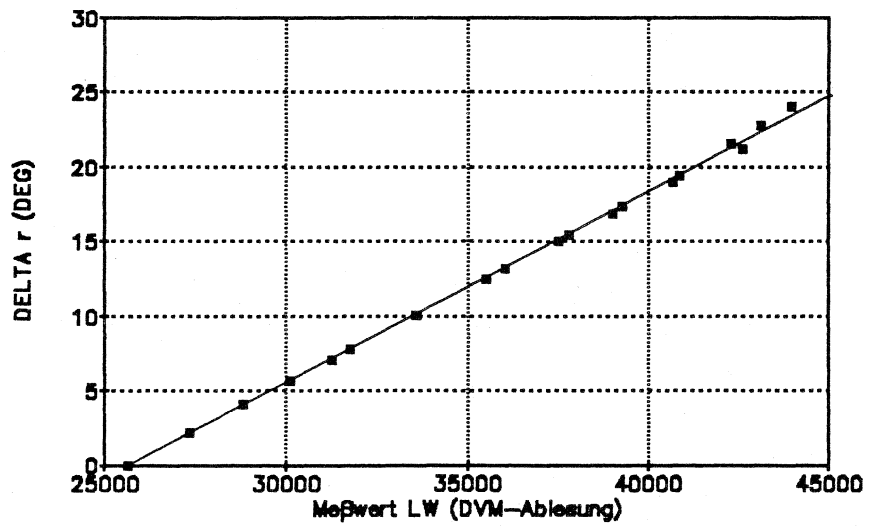


Abbildung 68: Radeinschlagswinkel δ_r als Funktion des Meßwertes LW bei Linkskurven

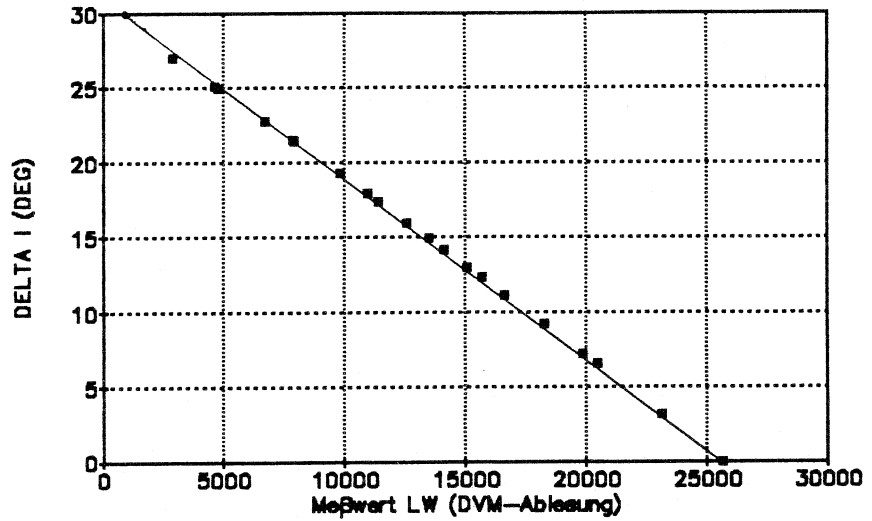


Abbildung 69: Radeinschlagswinkel δ_1 als Funktion des Meßwertes LW bei Rechtskurven

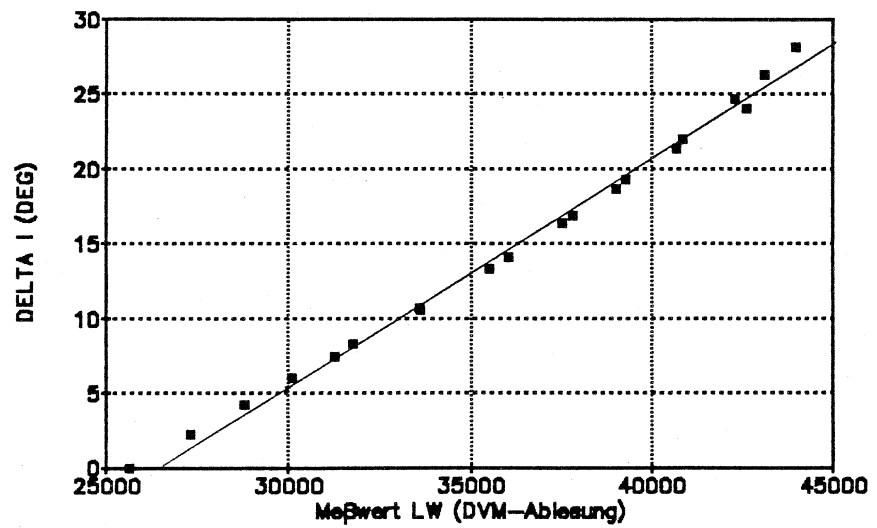


Abbildung 70: Radeinschlagswinkel δ_1 als Funktion des Meßwertes LW bei Linkskurven

7. Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Die Forderung nach einer ökonomischen Produktionstechnik in der Außenwirtschaft sowie nach einer Entlastung der Umwelt ist eng mit der Konzipierung und Entwicklung eines Ortungssystems für landwirtschaftliche Fahrzeuge verknüpft.

In der derzeitigen Entwicklung deutet sich aufgrund seiner entscheidenden Vorteile für den landwirtschaftlichen Bereich die Übernahme der satellitengestützten Ortung (Global Positioning System) als primäres Ortungsverfahren an. Allerdings stellt sich gleichzeitig damit die Forderung nach einem ergänzenden Sekundärverfahren, da das Auftreten von Systemstörungen bei Satellitenortung nicht ganz auszuschließen ist.

Im Sinne von Kostenminimierung durch Nutzung bereits vorhandener Technik wurden aus diesem Grunde Wegsensoren, wie sie heute v.a. bei leistungsstärkeren Schleppern zum Ausrüstungsstandard gehören, auf ihre Verwendbarkeit für Ortungszwecke geprüft.

Generell ist entsprechend den vorliegenden Ergebnissen Koppelnavigation sowohl über Raddrehzahlmessungen als auch über Wegmessung nach dem Doppler-Verfahren möglich.

Im landwirtschaftlichen Bereich ist allerdings aufgrund der extremen Umgebungsbedingungen und der resultierenden Belastungszustände für das Fahrwerk mit einer erheblichen Zunahme des Standortfehlers in Abhängigkeit von der Länge der zurückgelegten Wegstrecke insbesondere bei kurvenreicher Fahrt zu rechnen. Nicht in jedem Fall kann daher eine über die für die Satellitenortung garantierte Mindestgenauigkeit von 80 m hinausgehende Ortungsgüte erreicht werden.

Äußerst niedrige Kosten, Robustheit, Systemzuverlässigkeit und eine unter günstigen Verhältnissen mit anderen Sensorsystemen durchaus vergleichbare Ortungsgüte spricht für eine Verwendung von Radsensoren in der Koppelnavigation.

Als problematisch für ihren Einsatz ist v.a. der starke Einfluß von Fahrverhalten und Fahrbahnbeschaffenheit auf den Radschlupf bzw. die Messung des zurückgelegten Weges und damit das Koppelergebnis anzusehen.

Da desweiteren geringste Winkelfehler, hervorgerufen durch nicht zu vermeidende Lenkkorrekturen des Fahrers und das Auftreten des Quantisierungsfehlers digitaler Systeme, zu erheblichen Standortfehlern führen können, erhebt sich die Forderung nach Verwendung hochauflösender, absolut arbeitender Radsensoren. Nach vorsichtiger Schätzung stünden die damit verbundenen Kosten von ca. 2 000 bis 5 000 DM pro Sensor allerdings in keinem Verhältnis zum erreichbaren Genauigkeitsgewinn in der Positionsbestimmung.

Ogleich die verwendeten Ultraschallsensoren sowohl eine schlupfunabhängige Wegmessung erlauben als auch über ein hohes Auflösungsvermögen verfügen, konnten die in sie gesetzten Erwartungen bezüglich der erreichbaren Ortungsgüte nicht erfüllt werden.

Ihre Verwendbarkeit wird im wesentlichen durch die zufällig auftretenden Schwankungen der Impulsrate und den sich daraus ergebenden Kurswinkelfehler eingeschränkt. Da sich dieses Verhalten systembedingt nie ganz ausschließen läßt, ist auch ihr Einsatz über längere Fahrstrecken als kritisch einzuschätzen. In jedem Fall sollte auf die Installation baureihengleicher Sensorpaare mit derselben Grundkalibrierung geachtet werden.

Der Einfluß einer Spurweitenänderung bzw. einer fehlerbehafteten Spurweitenmessung auf die Ortungsgüte steigt mit der Zunahme der auszuführenden Lenkbewegungen bei kurvenreicher Fahrroute. Die Simulationsversuche zeigen allerdings, daß hier durchaus die Angaben der Fahrzeughersteller bzw. die unter statischen Verhältnissen ermittelten Meßergebnisse für die Spurweite in der Koppelrechnung verwendet werden können.

Es ist allerdings zu beachten, daß zumindest bei einer kurzzeitig auftretenden Spuränderung aufgrund starker dynamischer Belastungen des Fahrwerks ähnlich hohe Ortungsfehler wie bei einem sich ändernden Impulsratenverhältnis auftreten können.

Prinzipiell lassen sich aufgrund der durchgeführten Versuche folgende Forderungen bezüglich der Konzipierung eines Ortungssystems mit Hilfe von Wegsensoren ableiten:

- Wahl möglichst kurzer Weginkremente (hohe Ortungsrate), da damit der Einfluß des gewählten Koppelrechenverfahrens auf die Ortungsgenauigkeit abnimmt. Zudem kann so die Geschwindigkeit im jeweils betrachteten Wegintervall als konstant angenommen werden und ein Phasenversatz der Sensorimpulse und der damit verbundenen Kurswinkelfehler vermieden werden.
- äußerst exakte Kalibrierung der verwendeten Sensoren, genaue Bestimmung der Spurweite und, bei Raddrehzahlmessung, des Radumfangsverhältnisses sowie des absoluten Radumfangs.
- Verwendung möglichst hochauflösender Sensoren derselben Baureihe
- möglichst keine Schwankungen der Impulsrate zweier korrespondierender Sensoren

Weiterhin ist eine ruhige Fahrweise als ein Beitrag zur Erhöhung der Ortungsgenauigkeit anzusehen.

Da nicht davon ausgegangen werden darf, daß die während einer Kalibrierfahrt ermittelten Parameter in jedem Fall für weitere Fahrten ihre Gültigkeit behalten, scheint es sinnvoll, bei Weiterentwicklung des Verfahrens zu prüfen, ob eine dynamische Bestimmung von Fahrzeugparametern und damit verbundene Ermittlung von Korrekturverfahren mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Da ein einmal auftretender Kurswinkelfehler für das Koppelergebnis eine entscheidende Fehlergröße darstellt, sollte auch überprüft werden, ob mit Hilfe eines Lenkwinkelnehmers im Sinne einer Plausibilitätskontrolle eine Verbesserung der Ortsbestimmung unter dynamischen Verhältnissen möglich ist. Der auffallend deutliche Zusammenhang zwischen Meßwert LW eines Lenkwinkelgebers und dem Radeinschlagswinkel unter quasistatischen Verhältnissen ermutigt dazu.

Es ist allerdings zu beachten, daß bereits geringe dynamische Belastungen des Lenkwinkelaufnehmers zu Signalschwankungen führen können. In Anlehnung an Ausführungen industrieller Steuerungsanlagen wäre daher für Fahrversuche dessen Integration in die Lenksäule günstig, da dies Fehlereinflüsse durch Druck- und Zugkräfte weitestgehend ausschließt.

Die guten Ortungsergebnisse, die mit Hilfe von Kreiselkompaß oder optischen Rotationssensoren möglich sind, legen nahe, auch diese Verfahren auf ihre Einsatzmöglichkeit zum Aufbau eines sekundären Ortungsverfahrens für landwirtschaftliche Fahrzeuge zu prüfen. Gerade sich neuerdings ergebende Möglichkeiten zur Nutzung von Technologie aus dem militärischen Bereich könnten hier evtl. auch für die Landwirtschaft nutzbar gemacht werden.

8. Zusammenfassung

Im Sinne einer Realisierung teilschlagbezogener Produktionstechnik im Pflanzenbau und einer Optimierung des Betriebsmanagements wurde in der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit einer Positionsbestimmung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld untersucht.

Neben der Beschreibung der sich für diesen Zweck generell anbietenden Möglichkeiten stand als Hauptziel der Untersuchungen entsprechend der derzeitigen Entwicklung, die als primäres Verfahren Satellitenortung (GPS) erwarten läßt, die Nutzung von Weg- und Lenkwinkelsensoren zum Aufbau eines sekundären Ortungssystems nach dem planimetrischen Verfahren (Koppelnavigation) im Vordergrund.

Dabei wurde aus Gründen der Wirtschaftlichkeit auf eine bereits bestehende, preisgünstige sowie robuste Technik zurückgegriffen, die zudem die Möglichkeit einer Nachrüstung landwirtschaftlicher Fahrzeuge bietet.

Untersuchungsgegenstand war zum einen die Ortungsgenauigkeit induktiv arbeitender Radsensoren an Vorder- als auch Hinterrädern und zum anderen der Ortungsfehler von Ultraschallsensoren jeweils bei Geradeaus- und Kurvenfahrt.

Als Koppelrechenverfahren wurde den gegebenen Umständen entsprechend das Näherungsverfahren mit Geraden gewählt.

Ein mit dem zurückgelegten Weg zunehmender Standortfehler wurde in den Versuchen als der entscheidende Nachteil der Koppelnavigation bestätigt.

Ohne die Korrektur möglicher Einflußgrößen für das Ortungsergebnis ermöglichten beide Sensorausführungen über maximal ca. 100 m Fahrstrecke eine zufriedenstellende Positionsbestimmung.

Desweiteren wurde anhand von Simulationsversuchen erkannt, daß durch eine genaue Bestimmung bzw. eine dynamische Korrektur wichtiger Einflußfaktoren wie z.B. Radumfang, Spurweite, Impulsrate der Sensoren usw. eine Verbesserung des Ortungsergebnisses möglich ist.

Versuche zur Kalibrierung eines Lenkwinkelaufnehmers unter quasistatischen Verhältnissen zeigten, daß durch die Nutzung eines solchen zusätzlichen Meßwertaufnehmers eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Standortfehlers gegeben ist.

Literaturverzeichnis

1. Anonym:
"Durchschnitt ist heute nichts mehr". DLG-Mitteilungen (1990) H. 1,
S. 20-23
2. Auernhammer, H.:
Elektronik in Traktoren und Maschinen. München: BLV-Verlag 1989
3. Auernhammer, H.:
Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte
Düngung. Landtechnik 45 (1990), H. 7/8, S. 272-278
4. Auernhammer, H., T. Muhr und M. Demmel:
Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Feld. Kurzfassung eines
Vortrages, DEULA Freising, 1990
5. Auernhammer, H.:
Elektronik auf dem Feld und im Weltall. DLG-Mitteilungen (1991)
H. 11, S. 42-46
6. Bundeswehr, Materialamt des Heeres:
Fahrzeugnavigationsanlage FNA 4-15, Band 1 als TDv 6605/015-12,
1975
7. Buschmann, H. und P. Koessler:
Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik. Band 2. München: Wilhelm Heyne
Verlag 1976
8. Eylert, B.:
Expertise der DGON-Arbeitsgruppe "Automatische Positionsbestimmung
von Kraftfahrzeugen". Ortung und Navigation (1988), 2, S.165-216
9. Gill, E. und S. Ward:
Automatic vehicle location. Agricultural engineering proceedings of the
11th international congress on agricultural engineering (CIGR), Dublin,
Irland 4-8 Sept. 1989 (edited by Dodd V., Grace P.), S. 3105-3109, 1989
10. Hankel, R. und W. Urbanski:
OKE - ein autarkes Ortungssystem für Einsatzfahrzeuge. Ortung und
Navigation (1987), S. 117-135
11. Hardegg M.:
Ertragsmessung am Mähdrescher. Seminararbeit am Institut für
Landtechnik, 1990.

12. Hartel, P. und K.H. Thiel:
Das NAVSTAR Global Positioning System (GPS). Veröffentlichung des
Instituts für Navigation, Universität Stuttgart, 1990, S. 329-359
13. Hartel, P.:
Konzeptionelle Überlegungen für die weltweite Nutzung von Satelliten-
Navigationssystemen. Ortung und Navigation Nr. 1 (1991), S. 107-119
14. Jahns, G.:
Entlasten durch Automatisieren. Landbauforschung Völkenrode,
Sonderheft No. 52, S. 57-63, 1980
15. Lechner, W.:
Untersuchungen einer kreisorientierten Landfahrzeugnavigationanlage
im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der
Höhenübertragung. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und
Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München (1988),
0001/88 B, 0664
16. Mansfeld, W.:
Grundlagen der Ortung und Navigation, Funkortung 1983
17. Mansfeld, W.:
Funkortungs- und Navigationssystem NAVSTAR-GPS. Radio, Fernsehen,
Elektronik 11 und 12 (1988) S. 723-727, S. 796- 799
18. Monzel F.G.:
Grundlagen Differential GPS, Realtime Differential GPS-Anwendungen.
Workshop 6.-7. 11. 1990, Hamburg, Standard Elektrik Lorenz AG,
Stuttgart
19. Muhr, T.:
Vergleich von berührungslos arbeitenden Geschwindigkeitssensoren für
die Landwirtschaft. Diplomarbeit, Institut für Landtechnik,
Weihenstephan 1989
20. Neukirchner, E., O. Pilsack und D. Schlögel:
EVA-Ortungs- und Navigationssystem für Landfahrzeuge.
Nachrichtentechnische Zeitschrift, Bd. 36 (1983), Nr. 4, S. 214-218
21. Pöhls, A.:
Ein Beitrag zur autonomen Fahrzeugortung mit Raddrehzahlmessungen.
Dissertation im Fachbereich Konstruktion und Fertigung der TU Berlin,
1986
22. Reimpell, J.:
Fahrwerktechnik 1, 3. Auflage, Vogel-Verlag Würzburg 1976

23. Schanz, G.W.:
Sensoren - Fühler der Meßtechnik. Heidelberg: Hüthig Verlag 1988
24. Schänzer, G.:
Einsatzmöglichkeiten von Satellitennavigation. Ortung und Navigation (1989), Nr. 3
25. Schueller, J. K. et al.:
Determination of spatially variable yield maps. ASAE-Paper Nr. 87-1533, St. Joseph MI, 1987
26. Stafford, J.V. und B. Ambler:
Dynamic location for spatially selective field operations. ASAE-Paper Nr. 91-3528, Silsoe, Bedford, MK45 4HS, UK, 1991
27. Stanzel, H.:
mündliche Mitteilung, 1991
28. Stiller, A.H.:
Möglichkeiten der Kombination von GPS und GLONASS. Positionspapier des Fachausschusses für Weltraumtechnik, 1989
29. Unterlagen der Firma Krone
30. Unterlagen der Daimler-Benz AG
31. VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik:
Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Tagung Weihenstephan, 5. /6. März 1992, Heft 14, 1992

Anhang

Impulssummen: Geradeausfahrt

<i>US-rechts</i>	<i>US-links</i>	<i>vr</i>	<i>vl</i>	<i>hr</i>	<i>hl</i>	<i>Impulse/m</i>
191,853	171,613	7,863	7,867	7,826	7,896	
16	18	2	2	1	1	
75	69	5	5	4	4	
178	160	9	10	9	9	
317	285	15	16	15	15	
497	444	23	23	22	23	
677	600	30	30	29	30	
851	757	37	38	37	38	
1055	936	46	46	45	46	
1276	1130	55	56	54	55	
1517	1341	65	66	64	65	
1774	1574	76	76	75	76	
2047	1811	87	88	86	88	
2317	2065	99	99	98	99	
2633	2325	112	112	111	112	
2934	2582	124	124	123	124	
3227	2819	135	135	134	136	
3511	3064	147	147	146	147	
3806	3316	159	159	158	160	
4118	3585	172	172	171	173	
4457	3885	187	187	185	187	
4804	4199	201	201	200	202	
5169	4524	216	216	215	217	
5554	4869	232	232	231	233	
5935	5217	248	249	247	249	
6345	5585	265	266	264	266	
6778	5976	283	284	282	285	
7209	6367	301	302	300	303	
7652	6769	320	320	318	321	
8129	7198	340	340	338	341	
8591	7624	359	360	357	361	
9068	8057	379	380	377	381	
9576	8513	400	400	398	402	
10068	8964	420	421	418	422	
10559	9417	441	442	439	443	
11086	9888	462	463	460	464	
11586	10337	483	483	480	485	
12078	10785	503	503	500	505	
12586	11247	524	524	521	526	
13067	11687	544	544	541	546	
13560	12123	564	564	561	566	
14062	12569	584	585	581	587	
14549	13000	604	604	601	606	
15033	13437	624	624	621	626	
15534	13887	644	645	641	647	
16014	14318	664	664	661	667	
16497	14745	683	684	680	686	
16985	15187	703	704	700	706	
17472	15616	723	723	719	726	
17945	16038	742	743	739	745	
18433	16479	762	763	759	766	
18906	16909	782	782	778	785	
19383	17337	801	802	797	805	
19874	17778	821	822	818	825	
20343	18195	840	841	837	844	
20815	18620	860	861	856	864	
21310	19060	880	880	876	884	
21790	19482	899	900	895	903	
22267	19903	918	919	914	922	
22753	20338	938	939	934	942	
23223	20759	958	958	953	962	
23692	21179	977	978	972	981	
24181	21612	997	998	992	1001	
24660	22039	1016	1017	1012	1021	
25138	22465	1035	1036	1031	1040	
25625	22896	1055	1056	1051	1060	
26096	23315	1075	1076	1070	1079	

Übersicht 2:

Rohdaten (Impulssummen) für die Rad- und Ultraschallsensoren bei Geradeausfahrt (Ausschnitt)

Impulssummen: Geradeausfahrt (Fortsetzung)

<i>US-rechts</i>	<i>US-links</i>	<i>vr</i>	<i>vl</i>	<i>hr</i>	<i>hl</i>
26096	23315	1075	1076	1070	1079
26568	23739	1094	1095	1089	1099
27057	24174	1114	1115	1109	1119
27531	24586	1133	1134	1128	1138
28005	25006	1153	1154	1148	1158
28497	25442	1173	1174	1168	1178
28978	25865	1192	1193	1187	1198
29456	26283	1212	1213	1206	1217
29946	26724	1232	1233	1226	1237
30422	27149	1251	1252	1246	1257
30899	27568	1271	1272	1265	1276
31394	28004	1291	1292	1285	1297
31871	28427	1310	1311	1304	1316
32347	28852	1330	1331	1324	1336
32847	29292	1350	1351	1344	1356
33328	29722	1369	1370	1363	1376
33802	30145	1389	1390	1383	1395
34303	30587	1409	1410	1403	1416
34779	31017	1429	1430	1423	1435
35259	31442	1448	1449	1442	1455
35752	31884	1468	1470	1462	1475
36229	32312	1488	1489	1482	1495
36709	32748	1508	1509	1501	1514
37207	33193	1528	1529	1521	1535
37680	33624	1547	1548	1541	1554
38146	34058	1567	1568	1560	1574
38629	34495	1587	1588	1580	1594
39103	34922	1606	1607	1599	1614
39577	35351	1626	1627	1619	1633
40058	35791	1646	1647	1639	1653
40538	36223	1666	1667	1659	1673
41012	36650	1685	1686	1678	1693
41511	37099	1706	1707	1698	1713
41978	37530	1725	1726	1718	1733
42446	37969	1745	1746	1737	1753
42944	38421	1766	1767	1758	1773
43415	38857	1785	1786	1777	1793
43894	39296	1805	1806	1797	1813
44380	39740	1825	1826	1817	1833
44856	40175	1845	1846	1837	1853
45334	40609	1865	1866	1857	1873
45830	41059	1886	1887	1877	1894
46322	41492	1906	1907	1897	1914
46810	41929	1925	1927	1917	1934
47316	42386	1946	1947	1938	1955
47804	42816	1966	1967	1957	1975
48292	43242	1985	1987	1977	1994
48798	43680	2006	2007	1997	2015
49280	44106	2025	2027	2016	2035
49761	44526	2045	2046	2035	2054
50248	44957	2065	2066	2055	2074
50719	45375	2084	2085	2074	2093
51184	45784	2102	2104	2093	2112
51647	46204	2121	2123	2112	2131
52080	46602	2140	2141	2130	2149
52526	47008	2158	2159	2148	2168
52972	47416	2176	2177	2167	2186
53404	47802	2194	2195	2184	2204
53828	48186	2211	2212	2201	2221
54253	48576	2228	2229	2218	2239
54654	48935	2244	2245	2234	2255
55037	49278	2260	2261	2250	2270
55416	49619	2275	2276	2265	2285
55767	49934	2289	2290	2279	2299
56114	50231	2302	2304	2292	2313
56447	50522	2316	2317	2305	2326
56761	50796	2328	2329	2317	2339
57056	51050	2339	2341	2329	2350
57333	51290	2350	2351	2339	2361
57556	51484	2359	2360	2348	2369

Übersicht 2 (Fortsetzung)

<i>vr</i>	<i>vl</i>	<i>b</i>	<i>delta s</i>	<i>delta alpha</i>	<i>Xn</i>	<i>Yn</i>
7,86333	7,86666	1,835				
2	2	0,2543	0,00	0,25	0,00	
5	5	0,3814	0,00	0,64	0,00	
9	10	0,5722	-0,07	1,21	0,00	
15	16	0,7629	-0,07	1,97	-0,05	
23	23	0,9536	0,00	2,92	-0,12	
30	30	0,8900	0,00	3,81	-0,12	
37	38	0,9536	-0,07	4,78	-0,12	
46	46	1,0807	0,00	5,84	-0,19	
55	58	1,2079	-0,07	7,05	-0,19	
65	66	1,2715	-0,07	8,32	-0,27	
76	76	1,3350	0,00	9,65	-0,36	
87	88	1,4622	-0,07	11,11	-0,36	
99	99	1,4622	0,00	12,57	-0,46	
112	112	1,6529	0,00	14,22	-0,45	
124	124	1,5257	0,00	15,75	-0,45	
135	135	1,3986	0,00	17,15	-0,44	
147	147	1,5257	0,00	18,67	-0,44	
159	159	1,5257	0,00	20,20	-0,43	
172	172	1,6529	0,01	21,85	-0,42	
187	187	1,9072	0,01	23,76	-0,41	
201	201	1,7800	0,01	25,54	-0,40	
216	216	1,9072	0,01	27,45	-0,39	
232	232	2,0343	0,01	29,48	-0,38	
248	249	2,0979	-0,06	31,58	-0,37	
265	266	2,1615	-0,06	33,74	-0,50	
283	284	2,2886	-0,06	36,02	-0,64	
301	302	2,2886	-0,06	38,31	-0,78	
320	320	2,3522	0,01	40,65	-0,92	
340	340	2,5429	0,01	43,20	-0,90	
359	360	2,4793	-0,06	45,88	-0,87	
379	380	2,5429	-0,06	48,21	-1,02	
400	400	2,6065	0,01	50,82	-1,17	
420	421	2,6065	-0,06	53,42	-1,14	
441	442	2,6701	-0,06	56,09	-1,30	
462	463	2,6701	-0,06	58,75	-1,45	
483	483	2,6065	0,01	61,36	-1,59	
503	503	2,5429	0,01	63,90	-1,55	
524	524	2,6701	0,02	66,57	-1,52	
544	544	2,5429	0,02	69,11	-1,48	
564	564	2,5429	0,02	71,65	-1,44	
584	585	2,6065	-0,05	74,28	-1,39	
604	604	2,4793	0,02	76,74	-1,52	
624	624	2,5429	0,02	79,28	-1,48	
644	645	2,6065	-0,05	81,88	-1,43	
664	664	2,4793	0,02	84,38	-1,55	
683	684	2,4793	-0,05	86,84	-1,51	
703	704	2,5429	-0,05	89,38	-1,63	
723	723	2,4793	0,02	91,86	-1,75	
742	743	2,4793	-0,05	94,33	-1,70	
762	763	2,5429	-0,05	96,87	-1,82	
782	782	2,4793	0,02	99,35	-1,94	
801	802	2,4793	-0,05	101,83	-1,88	
821	822	2,5429	-0,05	104,37	-2,00	
840	841	2,4158	-0,04	106,78	-2,10	
860	861	2,5429	-0,04	109,32	-2,22	
880	880	2,4793	0,03	111,80	-2,33	
899	900	2,4793	-0,04	114,28	-2,26	
918	919	2,4158	-0,04	116,69	-2,37	
938	939	2,5429	-0,04	119,23	-2,47	
958	958	2,4793	0,03	121,71	-2,58	
977	978	2,4793	-0,04	124,19	-2,51	
997	998	2,5429	-0,04	126,73	-2,61	
1016	1017	2,4158	-0,04	129,14	-2,71	
1035	1036	2,4158	-0,04	131,56	-2,80	
1055	1056	2,5429	-0,04	134,10	-2,90	
1075	1076	2,5429	-0,04	136,64	-3,00	
1094	1095	2,4158	-0,04	139,05	-3,09	
1114	1115	2,5429	-0,04	141,60	-3,19	
1133	1134	2,4158	-0,04	144,01	-3,27	
1153	1154	2,5429	-0,04	146,55	-3,37	
1173	1174	2,5429	-0,03	149,09	-3,46	
1192	1193	2,4158	-0,03	151,51	-3,54	

Übersicht 3: Berechnung der Koordinaten bei Geradeausfahrt für die vorderen Radsensoren

<i>vr</i>	<i>vl</i>	<i>b</i>	<i>delta s</i>	<i>delta alpha</i>	<i>Xn</i>	<i>Yn</i>
7,86333	7,86666	1,835				
1212	1213	2,5429	-0,03	154,05	-3,63	
1232	1233	2,5429	-0,03	156,59	-3,71	
1251	1252	2,4158	-0,03	159,00	-3,79	
1271	1272	2,5429	-0,03	161,54	-3,88	
1291	1292	2,5429	-0,03	164,09	-3,96	
1310	1311	2,4158	-0,03	166,50	-4,03	
1330	1331	2,5429	-0,03	169,04	-4,11	
1350	1351	2,5429	-0,03	171,58	-4,19	
1369	1370	2,4158	-0,03	174,00	-4,26	
1389	1390	2,5429	-0,03	176,54	-4,33	
1409	1410	2,5429	-0,03	179,08	-4,41	
1429	1430	2,5429	-0,03	181,62	-4,48	
1448	1449	2,4158	-0,03	184,04	-4,54	
1468	1470	2,6065	-0,10	186,65	-4,61	
1488	1489	2,4793	-0,03	189,11	-4,85	
1508	1509	2,5429	-0,03	191,66	-4,91	
1528	1529	2,5429	-0,02	194,20	-4,98	
1547	1548	2,4158	-0,02	196,61	-5,04	
1567	1568	2,5429	-0,02	199,15	-5,10	
1587	1588	2,5429	-0,02	201,70	-5,16	
1606	1607	2,4158	-0,02	204,11	-5,21	
1626	1627	2,5429	-0,02	206,65	-5,27	
1646	1647	2,5429	-0,02	209,20	-5,32	
1666	1667	2,5429	-0,02	211,74	-5,38	
1685	1686	2,4158	-0,02	214,15	-5,43	
1706	1707	2,6701	-0,02	216,82	-5,48	
1725	1726	2,4158	-0,02	219,24	-5,53	
1745	1746	2,5429	-0,02	221,78	-5,57	
1766	1767	2,6701	-0,02	224,45	-5,62	
1785	1786	2,4158	-0,02	226,87	-5,66	
1805	1806	2,5429	-0,02	229,41	-5,71	
1825	1826	2,5429	-0,02	231,95	-5,75	
1845	1846	2,5429	-0,02	234,49	-5,79	
1865	1866	2,5429	-0,01	237,04	-5,83	
1886	1887	2,6701	-0,01	239,71	-5,87	
1906	1907	2,5429	-0,01	242,25	-5,90	
1925	1927	2,4793	-0,08	244,73	-5,93	
1946	1947	2,6065	-0,01	247,33	-6,15	
1966	1967	2,5429	-0,01	249,87	-6,18	
1985	1987	2,4793	-0,08	252,35	-6,21	
2006	2007	2,6065	-0,01	254,95	-6,42	
2025	2027	2,4793	-0,08	257,43	-6,44	
2045	2046	2,4793	-0,01	259,90	-6,64	
2065	2066	2,5429	-0,01	262,44	-6,66	
2084	2085	2,4158	-0,01	264,86	-6,68	
2102	2104	2,3522	-0,08	267,21	-6,70	
2121	2123	2,4158	-0,08	269,62	-6,89	
2140	2141	2,3522	-0,01	271,96	-7,07	
2158	2159	2,2886	-0,01	274,25	-7,08	
2176	2177	2,2886	-0,01	276,54	-7,10	
2194	2195	2,2886	0,00	278,83	-7,11	
2211	2212	2,1615	0,00	280,99	-7,12	
2228	2229	2,1615	0,00	283,15	-7,13	
2244	2245	2,0343	0,00	285,18	-7,14	
2260	2261	2,0343	0,00	287,22	-7,14	
2275	2276	1,9072	0,00	289,13	-7,15	
2289	2290	1,7800	0,00	290,91	-7,15	
2302	2304	1,7165	-0,07	292,62	-7,16	
2316	2317	1,7165	0,00	294,33	-7,28	
2328	2329	1,5257	0,00	295,86	-7,28	
2339	2341	1,4622	-0,07	297,32	-7,28	
2350	2351	1,3350	0,00	298,65	-7,38	
2359	2360	1,1443	0,00	299,80	-7,38	

Übersicht 3 (Fortsetzung)