

Diplomarbeit

**Untersuchungen zur Signalabschattung
bei Einsatz eines differenziellen globalen
Positioniersystems in der Landwirtschaft**

Christian Seebauer

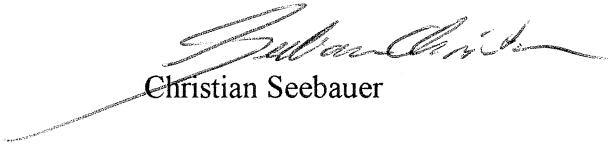
Angefertigt am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der
Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit dem
Institut für Landtechnik der Technischen Universität München -
Weihenstephan

April 1995

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig durchgeführt habe und alle mir zuteil gewordenen Hilfen, sowie das benutzte Schrifttum angegeben habe.

München, den 24.04.1995



Christian Seebauer

Vorwort

An dieser Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. techn. Peter Russer, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der TU München durchzuführen.

Weiterhin danke ich herzlich meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel für seine tatkräftige Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. agr. Hans Schön und Herrn Dr. Dr. habil. Hermann Auernhammer für die hervorragende Zusammenarbeit mit dem Institut für Landtechnik der TU München - Weihenstephan.

Für die Betreuung in Weihenstephan und für die zahlreichen Hinweise möchte ich Herrn Dipl.-Ing. agr. Markus Demmel und Herrn Dipl.-Ing. agr. Thomas Muhr danken. Herr Muhr ermöglichte mir die Durchführung der Versuche in Adelschlag und gab wertvolle Hilfen bei der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Für die technische Unterstützung im Hardwarebereich bedanke ich mich bei Herrn Martin Haußmann.

Dank für wertvolle Hilfen bei der Einarbeitung möchte ich ferner Herrn Dipl.-Ing agr. Karl Wild und Herrn Dr. Hans Stanzel, sowie den Mitarbeitern der Firma Geokonzept in Adelschlag aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	4
2 STAND DER TECHNIK	7
2.1 Ortungstechniken	7
2.2 Ortungstechniken in der Landtechnik.....	8
2.3 Vorteile der Satellitenortung	10
2.4 Aufbau der Satellitenortung.....	11
2.5 Systemvergleich NAVSTAR-GPS und GLONASS.....	12
2.6 Theoretische Grundlagen zum NAVSTAR-GPS.....	14
2.6.1 Signalstrukturen	14
2.6.2 Modulationsverfahren.....	16
2.6.2.1 Kodierung durch Phasencode-Modulation.....	18
2.6.2.2 C/A-Code-Modulation.....	19
2.6.2.3 Daten-Code-Modulation.....	20
2.6.2.4 P-Code-Modulation.....	21
2.6.2.5 Y-Code-Modulation	22
2.6.2.6 Anwendung der Modulationsverfahren auf die Trägerfrequenzen	23
2.6.3 Die GPS-Nachricht.....	24
2.6.3.1 Information von Subframe 1	25
2.6.3.2 Information von Subframe 2 und 3.....	25
2.6.3.3 Information von Subframe 4	25
2.6.3.4 Information von Subframe 5	26
2.6.3.5 Strukturierung zum Masterframe	27
2.7 Erreichbare Genauigkeiten beim GPS	28
2.7.1 Fehlerpotential bei der Pseudostreckenmessung.....	28
2.7.2 DOP-Faktoren.....	30

2.7.3 Künstliche Signalverschlechterung	33
2.8 Das differenzielle GPS.....	35
2.9 Signalabschattung und Multipath beim DGPS.....	40
2.9.1 Das Ausleuchtungsgebiet eines Satelliten	41
2.9.2 Augenblickliche Satellitenkonstellation	42
2.9.3 Der Horizont des mobilen GPS-Empfängers	43
2.9.4 Der Horizont der Mobilstation.....	44
2.9.5 Abschattung des Referenzsignals	45
3 ZIELSETZUNG DER DIPLOMARBEIT	47
4 VERSUCHE ZUR ABSCHATTUNG.....	49
4.1 Stationäre Messungen	49
4.2 Versuche im dynamischen Betrieb	50
4.3 Versuchsaufbau.....	50
4.4 Versuchsdurchführung	53
4.5 Versuchsauswertung / Fahrspuren quer über das Feld.....	58
4.6 Versuchsauswertung / Fahrspuren parallel zum Waldrand.....	66
4.6.1 Aufgezeichnete Rohdaten	66
4.6.2 Datenaufbereitung	69
4.6.3 Abschattungseffekte am Waldrand.....	72
5 VERSUCH MIT REFERENZSYSTEM.....	75
5.1 Versuchsaufbau.....	75
5.2 Datenaufbereitung.....	77
5.2.1 Ausschnitt aus den Rohdaten	77
5.2.2 Format der aufbereiteten Datensätze.....	78

5.3 Koordinatentransformation.....	83
5.4 Auswertung des DGPS-Kurses.....	84
5.5 Signalverhalten bei Abschattung.....	86
5.5.1 Anzahl ausgewerteter Satelliten bei Signalabschattung.....	88
5.5.2 Verhalten des HDOP bei Signalabschattung.....	88
5.5.3 Verhalten weiterer Parameter bei Signalabschattung.....	89
5.6 Vergleich DGPS mit bordautonomer Navigation.....	91
5.6.1 Kompaßvergleich.....	91
5.6.2 Abgleich der Radsensorik.....	94
6 AUSBLICKE / KOPPELNAVIGATION.....	102
7 ANHANG.....	110
7.1 Quellcode kopp_nav.cpp.....	110
7.2 Quellcode trennfor.cpp.....	123
8 LITERATURVERZEICHNIS.....	125

1 Einleitung

In der modernen Landtechnik wird zunehmend das Ziel verfolgt, die Flächen punktuell differenziert zu bewirtschaften. Messungen von AUERNHAMMER, MUHR und DEMMEL [17] (Abbildung 1.1) zeigen, daß dies von großem Vorteil ist. Schon in kleinen Feldern variiert die Beschaffenheit des Bodens und damit die Ertragsqualität sehr stark.

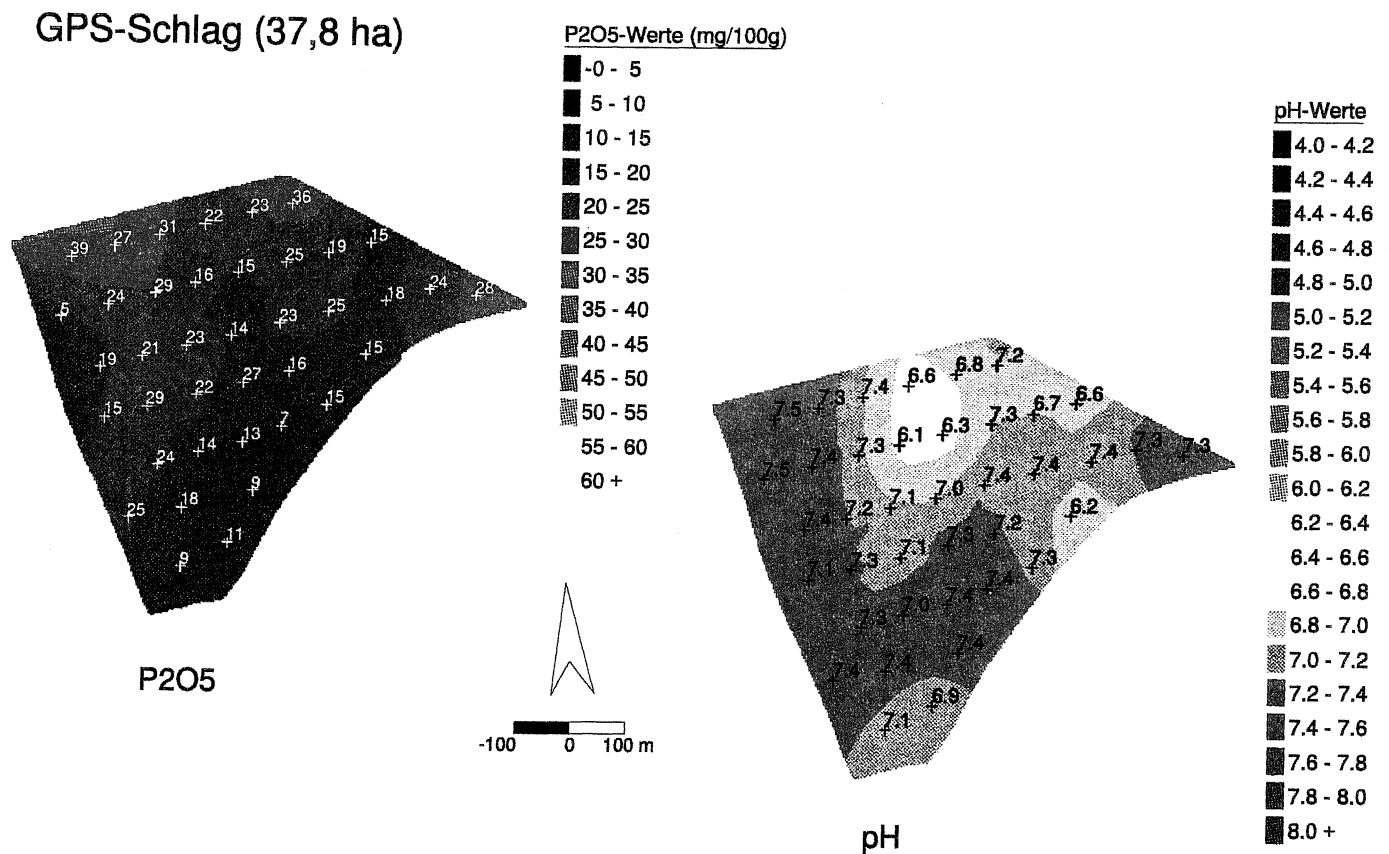


Abbildung 1.1: Kartierung des Nährstoffes Phosphat und des pH-Wertes

Bisher wurden auf einem Schlag nur einzelne Proben entnommen, vermischt und ergaben einen ungenauen Durchschnittswert. Der Landwirt mußte seine Düngung nach diesem Mittelwert ausrichten.

Bei dieser Analyse ist es unvermeidbar, daß einzelne Parzellen unterversorgt werden und einen schlechteren Ertrag bringen, andere Abschnitte hingegen deutlich überdüngt wer-

den. Eine Ausschwemmung führt dann zu Umweltbelastungen. Mit Abbildung 1.1 wird deutlich, daß eine georeferenzierte Bearbeitung ein Optimum an Ertrag und Umweltschutz bringen könnte.

Auch andere Parameter wie Ertragsgüte oder Schädlingsbefall können schon während der Bearbeitung erfaßt werden und ihren Ortskoordinaten zugeordnet werden. Dadurch ergeben sich in der Beurteilung und Bearbeitung der Flächen weitere Vorteile für den Landwirt.

Eine genaue Ertragskartierung wird möglich, wenn neben einer kontinuierlichen Wägevorrichtung in der Erntemaschine auch ein exaktes Positionsmeßsystem zur Verfügung steht. Versuche von 1992 in Scheyern [17] (Abbildung 1.2) belegen, daß eine Ertragskartierung prinzipiell möglich ist. Nachteilig ist bisher die grobe Rasterung von 50 m und der Ortungsausfall in Abbildung 1.2 links oben (weiß).

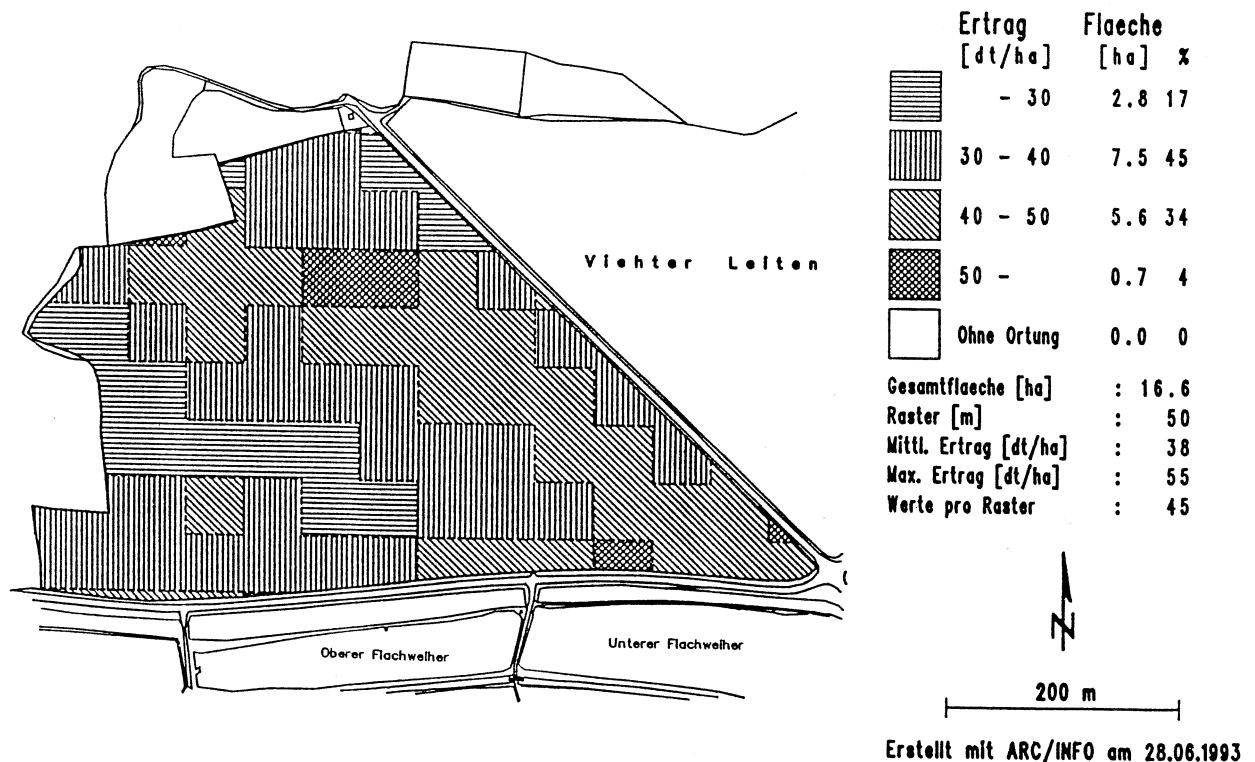


Abbildung 1.2: Ertragskarte Scheyern 1992

Auch ökonomische Gesichtspunkte rechtfertigen mehr und mehr ein positionsgestütztes Aufzeichnungsverfahren für Ort und Zeit. Gerade der Landwirt als Lohnunternehmer wird zusehend daran interessiert sein, seine Arbeitsflächen- und Zeiten exakt abrechnen zu können. Für Großbetriebe könnte mit solchen Systemen zudem die Nutzungsdauer teurer Maschinen ausgewertet und optimiert werden.

MUHR und AUERNHAMMER [14] haben gezeigt, daß die Satellitenortung ein erfolgversprechendes Verfahren für den landwirtschaftlichen Einsatzbereich ist. Zu klären ist, wie sich Satellitenortungssysteme bei Signalabschattungen verhalten, die im praktischen Einsatz wie in Abbildung 1.2 an Randgebieten auftreten.

2 Stand der Technik

2.1 Ortungstechniken

Ortung ist ein Begriff für die Gesamtheit der Meß- und Rechenvorgänge zur Bestimmung eines Standortes. Dabei interessieren im landwirtschaftlichen Bereich vorrangig:

- Die Ermittlung der exakten Position der landwirtschaftlichen Maschine bzw des bearbeitenden Werkzeugs durch die Angabe der räumlichen Koordinaten
- Die Ermittlung des Bewegungszustandes, insbesondere des horizontalen Geschwindigkeitsvektors
- Erfassen von Änderungen des Bewegungszustandes. Hier spielen im landwirtschaftlichen Bereich Beschleunigungen eine untergeordnete Rolle, Anfahr- und Wendevorgänge müssen jedoch präzise erfaßt werden.

Die technischen Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld wurden von MUHR und AUERNHAMMER [13] näher untersucht (Tabellen 2.1 und 2.2).

Die Ortungsverfahren sollen in den beiden Tabellen kurz gegenübergestellt werden. Prinzipiell können zwei Gruppen von Ortungstechniken unterschieden werden. Dies sind zum einen bordautonome Sensorsysteme (Tabelle 2.1) und zum anderen Sender- und Empfängersysteme (Tabelle 2.2).

Bordautonome Systeme werden bereits seit längerem verwendet und sind in zahlreichen Varianten kostengünstig verfügbar. Sie sind unabhängig von externen Komponenten. Eine stetige Initialisierung ist erforderlich, weil Positionen nur über einen bestimmten Zeitraum hinweg gehalten werden können. Drifterscheinungen führen hier zu hohen Ungenauigkeiten.

Bordautonome Systeme können unterteilt werden in eine quasizweidimensionale Methode (Linearisierter Schlag) und in echt zweidimensionale Verfahren (Koppelortung).

2.2 Ortungstechniken in der Landtechnik

Tabelle 2.1: Bordautonome Systeme

Ortungssysteme	Bordautonome Systeme	
	Linearisierter Schlag	Koppelortung
Prinzip	Wegmessung entlang einer vorgegebenen Spur. Diese liefert dann die zweite Koordinate	Gekoppelte Sensoren erfassen eigenständig die zweidimensionale Position
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Bereits etabliertes Verfahren • geringer Kostenaufwand • unabhängig (autonom) 	<ul style="list-style-type: none"> • unabhängig (autonom) • Sicherheit durch Verknüpfung verschiedener Komponenten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Initialisierung notwendig • geringe Präzision • nur quasizweidimensional 	<ul style="list-style-type: none"> • Initialisierung und Totpunkt-abgleich notwendig • aufwendig und teuer • bestehende Systeme nur bedingt im landwirtschaftl. Bereich einsetzbar • hohe Störanfälligkeit im off-road-Einsatz
Beispiele	Weg- und Geschwindigkeitssensoren; Berührungslose Erfassung durch Ultraschall und Radar (Dopplereffekt)	<ul style="list-style-type: none"> • Trägheitsnavigation • Doppler-Navigation

Unter der Einbeziehung externer Komponenten lassen sich Ortungssysteme realisieren, die eine absolute Positionsbestimmung zulassen. Die erdgebundene Triangulation (Tabelle 2.2) benutzt für die Vermessung ortsfeste Bezugspunkte wie Funkbaken oder Reflektoren. Der Aufwand, der hier betrieben werden muß, ist allerdings sehr hoch.

Eine einfach zu realisierende Alternative bietet die raumgebundene Triangulation. Hier werden die Bezugspunkte durch Satelliten modelliert.

Tabelle 2.2: Sender-/ Empfängersysteme

Ortungssysteme	Sender- und Empfangssysteme	
	Erdgebundene Triangulation	Raumgebundene Triangulation
Prinzip	Vermessung mit Hilfe von ortsfesten Bezugspunkten oder naturgegebenen Eigenschaften	Ortung durch Auswertung von Satellitensignalen
Vorteile	Vorteile verlieren seit Einführung von GPS stark an Bedeutung	<ul style="list-style-type: none"> • weltweite Verfügbarkeit • wetterunabhängig • hohe Genauigkeit (DGPS) • dreidimensional • kostengünstig • keine Sensorfehler im rauen Einsatz
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Genauigkeit verfügbarer Systeme • Sichtverbindung notwendig (Lasermessung) • administrative Probleme bei Funkortung (Fernmeldegesetz) • Installation von Hilfsmitteln wie Baken und Reflektoren • 3-D-Ortung sehr kompliziert 	<ul style="list-style-type: none"> • militärische Vorbehalte beim NAVSTAR-GPS • Unvollständiger Ausbau von GLONASS • Abschattungsprobleme • Überbrückung kurzfristiger Ausfälle
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Funkortung • Schallortung • Laserortung 	<ul style="list-style-type: none"> • NAVSTAR • GLONASS

2.3 Vorteile der Satellitenortung

Bei der Gegenüberstellung der Ortungstechniken hat sich die raumbundene Triangulation in Tabelle 2.2 hervorgehoben. Seit dem vollständigen Ausbau des US-amerikanischen NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System) und des Pendant GLONASS (Global Navigation Satellite System) der GUS-Staaten kommen die angestrebten Eigenschaften voll zur Geltung.

GPS ist nicht an den jeweiligen Ort gebunden, wie das bei erdgebundener Triangulation der Fall ist, sondern weltweit und mittlerweile rund um die Uhr verfügbar. Es ist wetterunabhängig und es kann mit einem geringen Mehraufwand auch eine sehr hohe Genauigkeit erreicht werden. Zudem arbeitet GPS dreidimensional, zumindest wenn mehr als vier Satelliten gleichzeitig verfügbar sind. Dies ist im ebenen Gelände der Regelfall.

Die letzten Jahre haben zudem gezeigt, daß bei GPS-Empfängern ein rapider Preisverfall eingesetzt hat. Einzelne Hersteller bieten low-cost Geräte bereits ab 400 DM an.

Ein weiterer Vorteil, der die Satellitennavigation für die Landtechnik prädestiniert, ist die kleine, kompakte Bauweise. Ein GPS-Empfänger benötigt keinerlei externe Sensorik, von der Antenne einmal abgesehen. Das macht ihn für einen erschütterungsreichen Einsatz im rauhen Gelände unempfindlich. Eine gute Kapselung vor Staub und Nässe ist bei diesen Systemen möglich.

Im Gegensatz zu verschiedenen bordautonomen Systemen wie zB der Koppelortung, bedarf es bei der Satellitenortung keinerlei Initialisierung. Lediglich der Empfänger benötigt eine Aquisitionszeit - in der Regel etwas über 30 s, um geeignete Satelliten auszuwählen und seine Ausgangsposition zu bestimmen. Bei fahrzeugautonomen Systemen hingegen muß erst ein Koordinaten-Nullpunkt bestimmt werden und in kurzen Abständen die aktuelle Position erneut abgeglichen werden, weil nicht die absolute Position erfaßt wird, sondern Abstände, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen über eine Sensormimik aufgenommen werden müssen. GPS ist jedoch in der Lage, absolute Positionen auszugeben. Ein Abgleich entfällt.

Nachteilig auf das GPS wirkt sich die künstliche Verschlechterung (siehe Kapitel 2.7.3) des Signals wegen militärischer Vorbehalte aus. Die Verschlechterungen - Selected Availability (SA) und Anti-Spoofing (A-S), können aber durch geeignete Algorithmen im Empfänger weitgehend eliminiert werden. Die geeignetste Methode zur Verbesserung der Genauigkeit ist das differenzielle GPS, welches in Abschnitt 2.8 noch ausführlicher erläutert wird.

2.4 Aufbau der Satellitenortung

Es gibt derzeit zwei aktuelle Satellitenortungssysteme: Das NAVSTAR-GPS und GLO-NASS. Beide sind im strukturellen Aufbau fast identisch. Das NAVSTAR-GPS besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

- **GPS-Raumsegment**

24 Satelliten mit einer Umlaufzeit von 11 Stunden und 58 Minuten [6] und einem Abstand zur Erdoberfläche von ca. 20 183 km senden regelmäßig in kurzen Abständen ein hochfrequentes Signal auf den Trägerfrequenzen L_1, L_2 aus. Hierin sind die Sendezeit, die Positionen der Satelliten und deren Satellitennummer enthalten.

24 Satelliten sind notwendig, damit weltweit mindestens ständig 4 Satelliten verfügbar sind. Zu diesem Zweck sind die Satelliten auf 6 Umlaufbahnen mit jeweils 4 Satelliten verteilt.

- **GPS-Kontroll-Segment**

Das Kontrollsegment des Departement of Defence (DoD) besteht aus einer Master-Contol-Station in Colorado und vier Monitor-Stations in Kwajalein (Marshall-Inseln), Diego Garcia (Indischer Ozean), Ascension (südlicher Atlantik) und Hawaii.

Das Kontrollsegment übernimmt die Beobachtung der Satelliten und die Vorausberechnung ihrer Bahndaten, die Überwachung der Satellitenuhren sowie deren Extrapolation und die Übermittlung der Korrekturdaten an die Satelliten.

Um die volle Genauigkeit des Systems zu gewährleisten, werden die Satellitendaten bis zu dreimal pro Tag aktualisiert. Von den Kontrollstationen werden außerdem physikalische Daten der Erdatmosphäre erfaßt und weitergegeben.

- **GPS-Nutzer-Segment**

Ein GPS-Empfänger kann die Satellitensignale empfangen und dekodieren. Im Empfänger sitzt eine genaue Quarzuhr, die ständig korrigiert wird. So ist der GPS-Empfänger in der Lage, die Laufzeit des Signals zu bestimmen. Über die Laufzeit kann mit geeigneten Fehlerkorrekturen die Entfernung zum Satelliten bestimmt werden. Bereits mit zwei Entfernungsmessungen kann in einer bekannten Ebene die Position ungefähr bestimmt werden. Mit drei Messungen ist es möglich, die Position dreidimensional zu bestimmen. Mobile GPS-Empfänger enthalten keine hochpräzisen Atomuhren, wie die Satelliten, sondern müssen mit einer einfacheren Technik auskommen.

Deshalb wird, wenn möglich, eine weitere Messung zu einem vierten Satelliten vorgenommen. Dadurch kann der Empfängeruhrenfehler nicht nur bestimmt werden, sondern auch eliminiert werden. Mit der Sichtverbindung zu vier Satelliten kann prinzipiell eine befriedigende dreidimensionale Positionsgenauigkeit erzielt werden.

2.5 Systemvergleich NAVSTAR-GPS und GLONASS

GLONASS soll bei seinem vollständigen Ausbau aus 24 Satelliten bestehen. Es hat strukturell einen sehr ähnlichen Aufbau wie das NAVSTAR-GPS. Die GLONASS-Satelliten bewegen sich auf drei Bahnebenen in ca. 19.150 km Höhe und haben eine etwas kürzere Umlaufzeit von 11 Stunden und 15 Minuten. Die Bahnneigung der GLONASS-Satelliten beträgt $64,8^\circ$ gegenüber der Inklination der GPS-Bahnen von 55° . Dies würde in Deutschland einen Genauigkeitsvorteil für GLONASS bringen. Das Satellitensystem der GUS-Staaten stellt die Koordinaten im Soviet Geodetic System 1985 dar, während GPS das weit verbreitete World Geodetic System 1984 benutzt.

Beide Systeme verwenden für die Datenübertragung zwei L-Band-Trägerfrequenzen L_1, L_2 .

GLONASS-Satelliten besitzen zu ihrer Identifikation aber keine unterschiedlichen Kodierungen wie das NAVSTAR-GPS, sondern variable Frequenzen.

Jeder GLONASS-Satellit hat seine eigene Trägerfrequenz, die sich von f_1, f_2 durch einen Frequenzanteil für den i -ten Satelliten Δf_i unterscheiden:

$$\begin{aligned} f_1 &= 1,602 \text{ GHz} + \Delta f_i \\ f_2 &= 1,246 \text{ GHz} + \Delta f_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

Der Frequenzanteil ergibt sich nach KLOSS [6] für das L_1 -Band durch die Zuordnung:

$$\begin{aligned} \Delta f_i &= \text{chan} \cdot \frac{9}{16} \\ \text{chan} &= 1 \dots 24 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Die fortlaufende Nummer der GLONASS- Satelliten wird mit chan (Kanal) bezeichnet.

Beim L_2 -Band berechnet sich der Frequenzanteil zu:

$$\begin{aligned} \Delta f_i &= \text{chan} \cdot \frac{7}{16} \\ \text{chan} &= 1 \dots 24 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Beim NAVSTAR-GPS sind die fest definierten Frequenzen:

$$\begin{aligned} f_1 &= 1,57542 \text{ GHz} \\ f_2 &= 1,22760 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Auch die Signalkodierung (siehe auch 2.6.2) erfolgt bei beiden Systemen in ähnlicher Weise durch eine PRN-Sequenz (Pseudo Random Noise).

Ein Vorteil von GLONASS ist, daß die Signale nicht künstlich verschlechtert werden, wie dies bei GPS der Fall ist.

Gegen GLONASS spricht jedoch der aktuelle Ausbaustatus. Die angestrebte Lebensdauer der GLONASS-Satelliten von vier Jahren konnte nicht erreicht werden. Die Satelliten des Starts im Februar 1993 hatten beispielsweise eine Lebensdauer von nur zwei Monaten. Derzeit sind nach dem Statusreport der Referenz- und Monitorstation der DLR in Oberpfaffenhofen [6] nur 13 aktive Satelliten im Orbit. Die unsichere politische Situation und die unklare Finanzierung des GLONASS-Projektes sprechen gegenwärtig nicht für die Realisierung eines landtechnischen Ortungssystems mit GLONASS.

Einen Ausblick für zukünftige Lösungen stellen Hybridsysteme dar, die sowohl GLONASS als auch GPS nutzen und deshalb zur Positionsbestimmung die doppelte Anzahl der Satelliten heranziehen könnten.

Relevante Ortungssysteme für die Landtechnik lassen sich im Moment nur durch das NAVSTAR-GPS verwirklichen.

2.6 Theoretische Grundlagen zum NAVSTAR-GPS

2.6.1 Signalstrukturen

Die GPS-Satelliten senden simultan ihre Botschaften auf zwei verschiedenen Frequenzbändern, die mit L_1, L_2 bezeichnet werden. Tabelle 2.3 zeigt die Frequenzen der beiden Bänder sowie deren Wellenlänge.

Tabelle 2.3: Frequenzen und Wellenlängen des NAVSTAR-GPS

Band	Frequenz [MHz]	Wellenlänge [m]
L_1	1575,42	0,19
L_2	1227,60	0,24

Die Auswahl der Frequenzen hat folgende Gründe:

- Die sogenannten PRN-Codes (Pseudo Random Noise) benötigen sehr große Bandbreiten. So benötigt der C/A-Code auf dem L_1 -Band 2,046 MHz und der P-Code auf dem L_2 -Band 20,46 MHz. In anderen Frequenzbändern standen diese Bandbreiten nicht unbenutzt zur Verfügung.
- Die Abweichung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium gegenüber der im Vakuum ist frequenzabhängig. Das Signal wird auf dem Weg zur Erde mehr oder weniger stark verzögert. Dies verfälscht frequenzabhängig die Güte der Laufzeitmessung. Prinzipiell gilt: Je höher die Frequenz, desto geringer die Verzögerungen. Deshalb wurden Frequenzen im Gigahertzbereich gewählt.
- Weitere Effekte, die vorwiegend in der Ionosphäre auftreten, grenzen den Frequenzbereich ebenfalls ein. Bei tiefen Frequenzen < 100 MHz sind ionosphärische Verzögerungen des Signals besonders hoch. Aber auch hohe Frequenzen lassen sich nicht beliebig anwenden, da hier im Bereich > 10 GHz die Dämpfung in der Troposphäre besonders hoch ist. Bei noch höheren Frequenzen müßten die GPS-Empfänger mit Richtantennen betrieben werden. Mit den heute üblichen Mehrkanalempfängern hätte das einen größeren technischen Aufwand und Preis zur Folge. Die beiden Frequenzbänder L_1, L_2 stellen also einen guten Kompromiß zwischen den begrenzenden Faktoren dar. Die Dämpfung ist relativ klein und der technische Aufwand begrenzt.
- Die Entscheidung, zwei unterschiedliche Frequenzbänder zu wählen, ist für eine gute Laufzeitkorrektur von elementarer Bedeutung. Die Laufzeiten τ der Signale in der Ionosphäre (Höhe ca. 80 bis 450 km, Abbildung 2.5) verhalten sich gem. BAUER [15] in guter Näherung umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenzen f .

$$\tau = \frac{R}{c} + \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f^3} \approx \frac{R}{c} + \frac{A}{f^2} \quad (2.5)$$

Dabei bedeuten:

τ :	Laufzeit des Signals	A, B :	Konstanten
c :	Lichtgeschwindigkeit	f :	Trägerfrequenz
R :	Wahre Entfernung		

Den Hauptanteil an der Abweichung der Signallaufzeit von der Laufzeit im Vakuum liefert der Term $\frac{A}{f^2}$.

Wird nur dieser Term betrachtet, ergibt die Laufzeitdifferenz zweier gleichzeitig vom Satelliten ausgesendeten Signale unterschiedlicher Frequenzen f_1, f_2 :

$$\Delta\tau = \frac{A}{f_1^2} - \frac{A}{f_2^2} = \frac{A}{f_1^2} \cdot \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} \quad (2.6)$$

Eine Messung der Laufzeitdifferenz $\Delta\tau$ ermöglicht die Berechnung der Konstante A und damit die Korrektur der gemessenen Laufzeiten. Der verbleibende Streckenfehler liegt bei einem Frequenzabstand von 347,82 MHz (ca. 20%) nach BAUER [15] in der Größenordnung von wenigen Zentimetern.

2.6.2 Modulationsverfahren

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen Modulationsverfahren vorgestellt werden. Anschließend wird die Anwendung dieser Verfahren auf die Trägerfrequenzen dargestellt. Zunächst soll aber kurz erläutert werden, warum eine komplexe Modulation der GPS-Signale erforderlich ist:

- Wenn neben der Laufzeit auch die Phasenlage als Kriterium herangezogen wird, liegt die Genauigkeit im Bereich einer Wellenlänge (siehe Tabelle 2.3), also im Zentimeterbereich. Die Messung wäre dann aber ohne eine Strukturierung des Signales außerhalb dieses Bereiches mehrdeutig. Die für die Ortsbestimmung notwendigen Bahndaten könnten zudem nicht gemeinsam mit dem GPS-Signal an den Empfänger übermittelt werden. Für bewegte Objekte, die in Echtzeit Ortung betreiben, wäre die Mehrdeutigkeit ein unlösbares Problem. Durch die Signalstrukturierung mit einer Phasenmodulation wird eine Mehrdeutigkeit vermieden und eine Übermittlung umfangreicher Bahndaten ermöglicht.
- Die Signale selbst werden durch eine Daten-Code-Modulation zum Träger diverser Navigationsnachrichten. Die Navigationsnachrichten enthalten u.a. die Bahndaten der Satelliten zur Grobortung und wichtige Informationen zur Fehlerkorrektur.

Die GPS-Navigationsnachricht wird im Abschnitt 2.6.3 erläutert.

- Ferner dient eine komplexe Modulation der militärischen Geheimhaltung. So verhindern bestimmte, für die Modulation verwendete Codes, daß nichtautorisierte Benutzer sich die volle Genauigkeit des GPS-Systems nicht zu Nutze machen können. Dies liegt im Sinne des DoD, da GPS militärischen Ursprungs ist.

Abbildung 2.1 soll einen Überblick zur Kodierung der GPS-Signale geben. Diese Abbildung stützt sich auf die gleichnamige Darstellung von BAUER [15] in Vermessung und Ortung mit Satelliten, 1992.

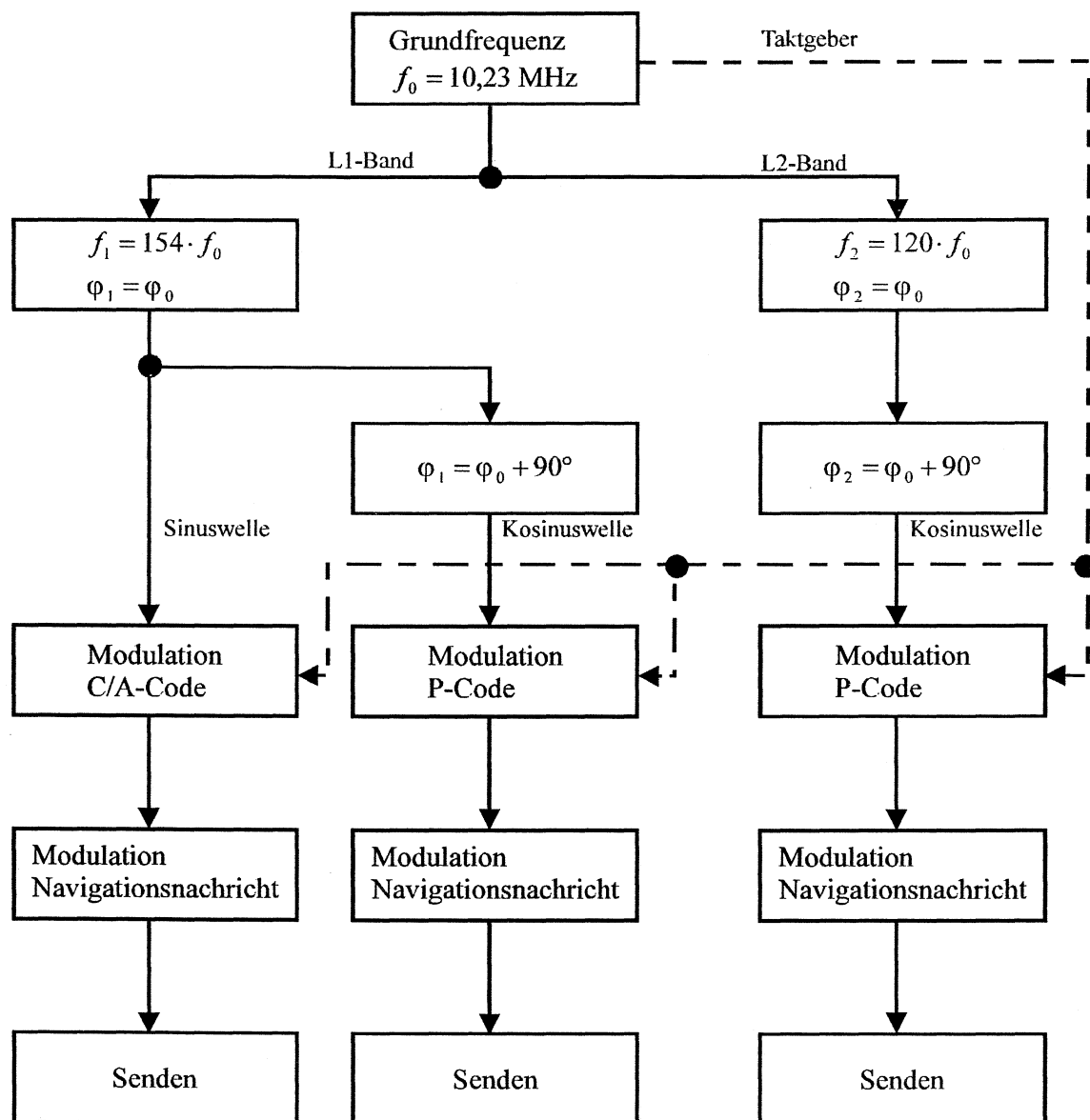


Abbildung 2.1: Kodierung der GPS-Signale

2.6.2.1 Kodierung durch Phasencode-Modulation

Beim NAVSTAR-GPS werden die beiden Frequenzen f_1, f_2 durch das Pseudo-Random-Noise-Verfahren (PRN) moduliert. Moduliert wird mit einer pseudo-zufälligen Folge der beiden Signalwerte -1 und +1. Bei einer pseudo-zufälligen Folge der Zahlen ± 1 sind in einer hinreichend langen Beobachtungszeit die beiden Werte statistisch gleich verteilt. Pseudo-zufällig bedeutet, daß die Werte nur scheinbar zufällig auftreten und Regelmäßigkeiten schwer erkennbar sind. Tatsächlich ist der Modulationsverlauf eine sehr lange, sich wiederholende Sequenz. Die Werte sind dabei eine Treppenfunktion $F(T)$ der Satellitenzeit T .

Abbildung 2.2 (BAUER [15]) zeigt qualitativ den Einfluß der Treppenfunktion auf das Signal. Das modulierte Signal $f_1 F(T)$ entsteht aus dem ursprünglichen Signal f_1 durch die Multiplikation mit $F(T)$. (Die Frequenzen sind in der Skizze nicht maßstabsgetreu aufgetragen)

- Der Wert +1 läßt das Signal unverändert
- Der Wert -1 dreht die Phasenlage des Signals um 180°.

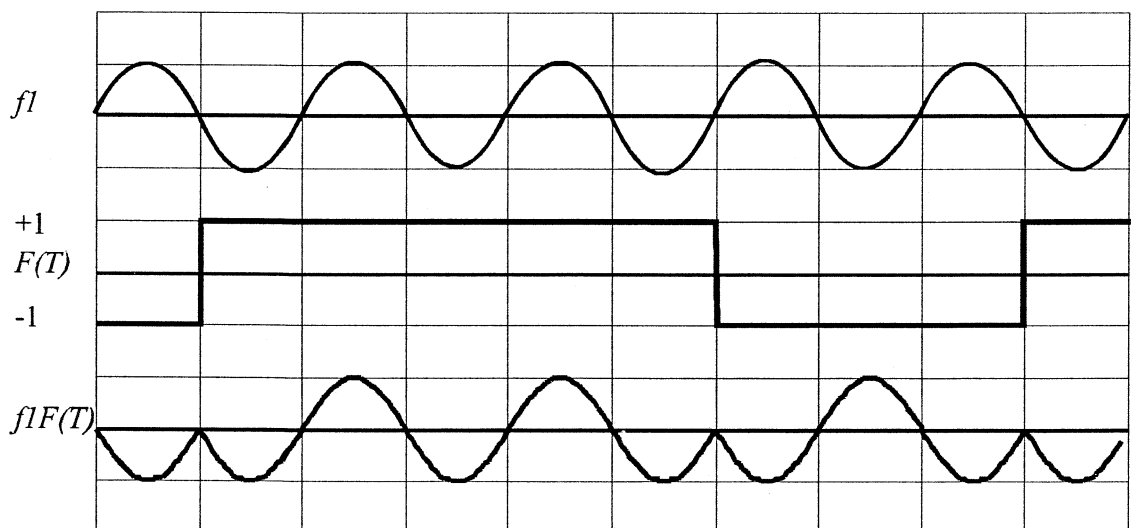


Abbildung 2.2: Phasencode-Modulation der GPS-Signale

2.6.2.2 C/A-Code-Modulation

Für die C/A-Code-Modulation haben sich in der Literatur drei gängige Bezeichnungen durchgesetzt:

Clear/Aquisition, Clear/Access und Coarse/Access. Die deutsche Literatur verwendet häufig die Bezeichnung Grob-Code. Diese Form der Codierung ist allgemein zugänglich. Dadurch wird jedem GPS-Nutzer die Auswertung des Signals bei eingeschränkter Genauigkeit ermöglicht.

Moduliert wird in einem Takt, der sich aus der Grundfrequenz f_0 des Cäsium-Satellitenoszillators ableitet:

$$f_0 = 10,23 \text{ MHz} \quad (2.7)$$

Anwendung findet das in Abschnitt 2.6.2.1 beschriebene PRN-Modulationsverfahren. Der Modulationstakt f_{mCA} beträgt genau ein Zehntel der Grundfrequenz:

$$f_{mCA} = \frac{f_0}{10} = 1,023 \text{ MHz} \quad (2.8)$$

Die Treppenfunktion $F(T)$ der PRN-Sequenz in Abbildung 4 kann mit einer Frequenz von 1,023 MHz ihre Werte negieren oder beibehalten. Eine Periode der PRN-Sequenz besteht aus 1022 Elementen, wenn keine Phasenmodulation erzeugt wird und aus 1024 Elementen bei Phasenmodulation. Bei einer Taktrate von 1,023 MHz dauert eine PRN-Sequenz etwa eine Millisekunde.

Bei einer Betrachtung des Verhältnisses ν_{CA} der Trägerfrequenz f_1 zum Modulationstakt f_{mCA} ergibt sich:

$$\nu_{CA} = \frac{f_1}{f_{mCA}} = \frac{1575,42 \text{ MHz}}{1,023 \text{ MHz}} = 1540 \quad (2.9)$$

Das bedeutet, jede 1540. Welle der Trägerfrequenz f_1 wird mit dem PRN-Wert -1 oder +1 moduliert. Mit der Wellenlänge $\lambda_1 = 0,19$ m berechnet sich dann für den C/A-Code eine Länge λ_{CA} von:

$$\lambda_{CA} = \nu_{CA} \lambda_1 = 1540 \cdot 0,19 \text{ m} = 293 \text{ m} \quad (2.10)$$

Durch eine spezielle Folge der Modulationen wird erreicht, daß jedes dieser 293 m langen Teilstücke nach dem Ablauf eines Modulationstaktes (nach jeder 1540. Welle) einzeln identifizierbar ist. Da die Dauer t der Sequenz des Pseudo-Random-Noise-Code etwa 1 ms ist, ergeben sich identische Teilstücke ebenfalls erst nach 1 ms. Die Mehrdeutigkeit in der Auswertung der Sinuswelle liegt demzufolge in einem Bereich s von:

$$s = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 3 \cdot 10^5 \text{ m} = 300 \text{ km} \quad (2.11)$$

In 2.11 bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit, s eine Strecke und s Sekunden.

Erzeugen läßt sich der C/A-Code nach dem Gold'schen Algorithmus. Er wiederholt sich jede Millisekunde seines Zeitarguments. Er kann aufgrund seiner Kürze sehr einfach entschlüsselt werden. Der C/A-Code entsteht aus einem Produkt zweier PRN-Codes von je 1023 Bit. Es gibt ausreichend viele C/A-Codes der gleichen Periode, so daß jedem Satelliten ein eigener Code zugewiesen werden kann.

2.6.2.3 Daten-Code-Modulation

Diese Form der Modulation wird zusätzlich auf die Sinus- und die Kosinuswelle der Trägerfrequenz f_1 und auf f_2 angewandt.

Eine Ortung in Echtzeit kann nur erfolgen, wenn die Bahndaten und andere wichtige Parameter der GPS-Satelliten häufig erhältlich sind. Es ist deshalb unumgänglich, mit Hilfe eines weiteren Modulationsverfahrens diese Daten mit auf das Signal zu packen.

Durch eine geeignete Phasenmodulation werden diese Daten sowohl der Sinus- als auch den Kosinuswellen aufgeprägt. Der Daten-Code-Modulationstakt beträgt 50 Hz, eine Sequenz dauert 30 s und nimmt die Werte -1 und +1 an. Dem Daten-Code, der eigentlichen GPS-Nachricht wird das Kapitel 2.6.3 gewidmet.

Bei der Trägerfrequenz f_1 ergibt sich ein Verhältnis v_{Dat} zum Modulationstakt f_{mDat} von:

$$v_{Dat} = \frac{f_1}{f_{mDat}} = \frac{1575,42 \cdot 10^6 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 31,508400 \cdot 10^6 \quad (2.12)$$

Jede 31 508 400te Welle der Trägerfrequenz f_1 wird zusätzlich zum C/A-Code mit einer -1 oder +1 phasenmoduliert.

Bei einer Taktrate von 50 Hz und einer Sequenzdauer von 30 s können 1500 Bit übertragen werden. Diese 1500 Bit bilden einen Rahmen, den GPS-Frame.

2.6.2.4 P-Code-Modulation

P-Code steht für „Precise“ und für hoheitliche Vorbehalte des DoD. Eine hochpräzise Realtime-Ortung soll nur den autorisierten Empfängern zugänglich gemacht werden. Dafür verwendet das DoD eine PRN-Sequenz, die sich erst alle 266 Tage wiederholt (vgl. PRN-Code der C/A-Modulation in 2.6.2.2, Sequenzdauer: 1 ms).

Der Modulationstakt des P-Codes ist mit der Grundfrequenz $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$ identisch. Zur Erklärung des Prinzips genügt die Betrachtung einer Frequenz.

Bei der Trägerfrequenz f_1 ergibt sich ein Verhältnis v_P zum Modulationstakt $f_{mP} = f_0$ von:

$$v_P = \frac{f_1}{f_{mP}} = \frac{1575,42 \text{ MHz}}{10,23 \text{ MHz}} = 154 \quad (2.13)$$

Im Gegensatz zur C/A-Modulation ist bei diesem Verfahren schon jede 154. Welle mit -1 oder +1 phasenmoduliert. Die Trägerfrequenz f_1 wird dadurch so modifiziert, daß einzeln identifizierbare Teilstücke schon alle 29,26 m entstehen.

$$\lambda_p = \lambda_1 \cdot v_p = 0,19 \text{ m} \cdot 154 = 29,26 \text{ m} \quad (2.14)$$

Ein identischer Wellenzug bei der P-Code-Modulierung ergibt sich im derzeitigen Betriebsmodus nach 7 Tagen. Die Auswertung eines Satellitensignals ist deshalb eindeutig. Durch die höhere Taktrate in dieser Betriebsart kann die Empfängeruhr öfter abgeglichen werden. Eine genauere Laufzeitmessung des GPS-Signals ermöglicht eine, um den Faktor 10 verbesserte Positionsbestimmung.

Wie zu Beginn von 2.6.2.4 erwähnt, dauert eine PRN-Sequenz des P-Codes theoretisch 266 Tage. Jeder Satellit erzeugt aber nur einen 7 Tage langen Ausschnitt daraus. Dies genügt, um eine Entschlüsselung sehr kompliziert zu gestalten. Eine Variation des P-Codes wäre zudem jederzeit denkbar. Durch die individuellen Ausschnitte aus der Gesamtsequenz erhält jeder GPS-Satellit seinen eigenen P-Code.

2.6.2.5 Y-Code-Modulation

Der Y-Geheimcode ist eine verschlüsselte Variante des P-Codes. Durch diese kann der P-Code zu jeder beliebigen Zeit vom DoD ersetzt werden kann. Die Y-Kodierung ist eine Maßnahme gegen Signalstörungen durch Störsender (Anti Spoofing bzw A-S, siehe 2.7.3). Dies bedeutet, daß ein GPS-Benutzer nur noch den C/A-Code des L_1 -Bandes auswerten kann. Nur speziell autorisierte Benutzer erhalten die Ausrüstung (PPS Host Application Equipment), die dann einen Zugang zum PPS (Precise Positioning Service) ermöglicht. Seit dem 31. Januar 1994 ist A-S laut dem Statusreport der Referenz- und Monitorstation Oberpfaffenhofen vom 11. Mai 1994 [6] eingeschaltet. Der P-Code ist somit nicht mehr zu empfangen.

2.6.2.6 Anwendung der Modulationsverfahren auf die Trägerfrequenzen

In Abbildung 3 wurden die verschiedenen Modulationsschritte als Ablaufdiagramm dargestellt. Anschließend wurden die verschiedenen Kodierungen beschrieben (2.6.2.2 bis 2.6.2.5). Die Auswirkungen der Modulationsverfahren auf die Trägerfrequenzen lassen sich zusammenfassend auch in einer geschlossenen mathematischen Schreibweise darstellen (BAUERSIMA [17] und BAUER [15]).

Dabei ist i der Index für den i -ten GPS-Satelliten.

$$f_{1i} = A_P P_i(T) D_i(T) \cos[\omega_1 T + \Phi_1(T)] + A_G G_i(T) D_i(T) \sin[\omega_1 T + \Phi_1(T)] \quad (2.15)$$

$$f_{2i} = B_P P_i(T) D_i(T) \cos[\omega_2 T + \Phi_2(T)] \quad (2.16)$$

Dabei bedeuten:

$\omega_1 = 2\pi f_1$: Trägerfrequenz 1 mit $f_1 = 1575,42$ MHz

$\omega_2 = 2\pi f_2$: Trägerfrequenz 2 mit $f_2 = 1227,60$ MHz

T : Die Zeitangabe der i -ten Atomuhr des Satelliten

$\Phi(T)$: Summe aus Kreisfrequenzabweichung und Phasenrauschen der Frequenzen

$P_i(T)$: P-Code-Modulationssignal

$G_i(T)$: C/A-Modulationssignal

A_P, A_G : Relative Amplituden von $P_i(T)$ und $G_i(T)$ gemessen zur Trägerfrequenz

B_P : Amplitude des $P_i(T)$ -Signals gemessen zur Trägerfrequenz

$D_i(t)$: Daten-Code-Modulationssignal

2.6.3 Die GPS-Nachricht

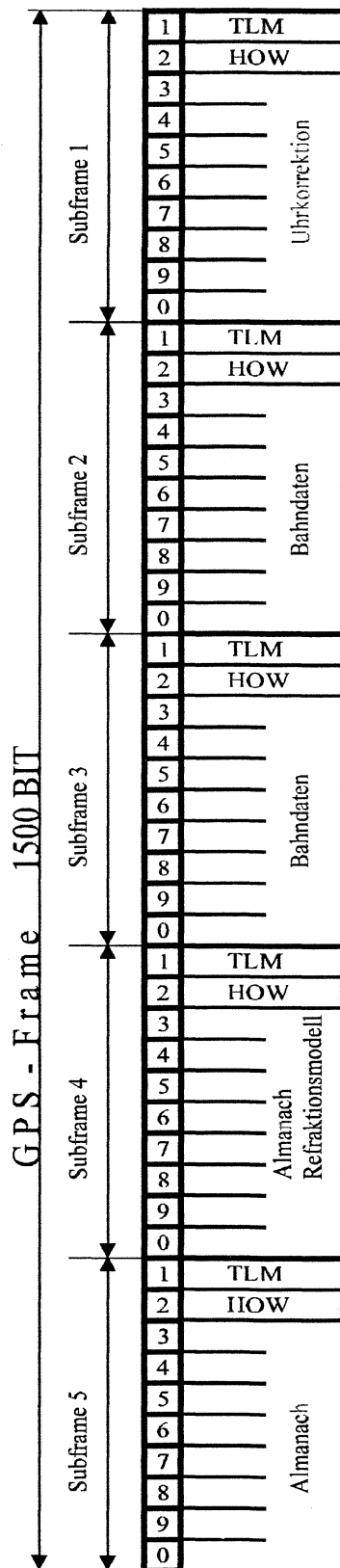


Abbildung 2.3 und die Beschreibung der GPS-Nachricht stützen sich auf BAUER [15]. Um in Echtzeit eine Ortsbestimmung durchführen zu können, muß vom GPS-Empfänger eine vollständige Nachricht der Länge $l = 1500$ Bit ausgewertet werden. Bei einem Takt $f_T = 50$ Hz dauert eine GPS-Nachricht somit:

$$t_F = \frac{1}{f_T} l = \frac{1}{50 \text{ Hz}} \cdot 1500 = 30 \text{ s} \quad (2.17)$$

Diese Nachricht bildet einen Rahmen (Frame: Index F), der seinerseits wieder in 5 Subframes mit je 10 Wörtern aufgeteilt ist. Ein einzelnes Wort besteht dann aus 30 Bit.

Die fünf Subframes beginnen mit den zwei Wörtern TLM (Telemetry-Word) und HOW (Hand-Over-Word).

- Dabei enthält das TLM eine feste 8-Bit-Struktur zur Synchronisation und eine 14-Bit lange Nachricht. Diese gibt an, ob gerade neue Ephemeriden an den Satelliten übersandt oder ob andere Satellitenoperationen ausgeführt werden.

- Dieses Wort enthält die Satellitenzeit des Beginns der nachfolgenden Subsequenz. Diese Zeitangabe ermöglicht auch den Zugang zum P-Code.

Die Nachricht selbst ist in den jeweils 10 Sequenzen der fünf Subframes enthalten.

Abbildung 2.3: GPS-Nachrichten-Rahmen

Der Inhalt dieser Subframes soll nachfolgend kurz beschrieben werden.

2.6.3.1 Information von Subframe 1

- AODC - Age of Data Clock, das exakte Alter der Uhrendaten
- Parameter für die Korrektur der Satellitenuhr. Hiermit kann die Differenz zwischen Satellitenzeit und GPS-Zeit ermittelt werden. Diese Differenz ist eine Funktion der Zeit und des Satellitenortes. Mit 3 Parametern a_0 , a_1 und a_2 und deren Referenzzeit t_{0C} können Drifterscheinungen, welche Frequenz- und Phasenverschiebungen zur Folge haben, verringert werden. Dargestellt werden diese Veränderungen durch ein Polynom zweiter Ordnung.
- Informationen über den Zustand des GPS-Satelliten (Health) und GPS-Wochennummer.

2.6.3.2 Information von Subframe 2 und 3

Diese Abschnitte enthalten wichtige Informationen zu den Satellitenbahnen:

- AODE - Age of Data Ephemeris, das Alter der Bahndaten
- Bahndaten der Satelliten
- Weitere Bahndaten des Satelliten in Subframe 3

2.6.3.3 Information von Subframe 4

Subframe 4 enthält Daten zur schnellen Vorrausberechnung der ungefähren GPS-Positionen:

- Almanach und Informationen über den technischen Zustand der geplanten Satelliten Nr. 25 bis 32. Der Almanach gibt die Bahndaten in vereinfachter Form wieder. Daraus ist abzuschätzen, wann welche Satelliten für die Ortung zur Verfügung stehen.

- Ionosphärisches Refraktionsmodell

Benutzern, die nicht über die Möglichkeit verfügen, beide Signale L_1 und L_2 zu empfangen, um daraus das Laufzeitverhalten der Signale zu bestimmen, wird ein Refraktionsmodell übermittelt. Hiermit können Korrekturen zum Laufzeitverhalten des empfangenen Signals vorgenommen werden.

- UTC-Daten (Universal Time Coordinated)

Information zur Berechnung der UTC-Zeit aus der GPS-Zeit

- Informationen, bei welchem Satelliten eventuell der P-Code durch einen geheimen Y-Code ersetzt wurde.

- Angaben über die aktuelle Satellitenkonfiguration

- Zusätzliche Informationen

2.6.3.4 Information von Subframe 5

- Almanach und Protokoll über den technischen Zustand der GPS-Satelliten Nr. 1 bis 24.

2.6.3.5 Strukturierung zum Masterframe

Die Subframes 3 und 4 enthalten den Almanach und eine Reihe von zusätzlichen Informationen, die in den 20 Wörtern zu je 30 Bit eines Frames nicht vollständig übermittelt werden können. Für die komplette Übertragung dieser umfangreichen Daten wird eine Folge von 25 Frames benötigt (Abbildung 2.4).

Dabei bleiben bei den 25 aufeinander folgenden Frames die Inhalte der Subframes 1-3 jeweils gleich. Die Inhalte der Subframes 4 und 5 werden während dieser Periode in fortlaufenden Paketen übermittelt. Die einzelnen Frames 1-25 werden auch als Page (Seite) bezeichnet und bilden einen übergeordneten Masterframe.

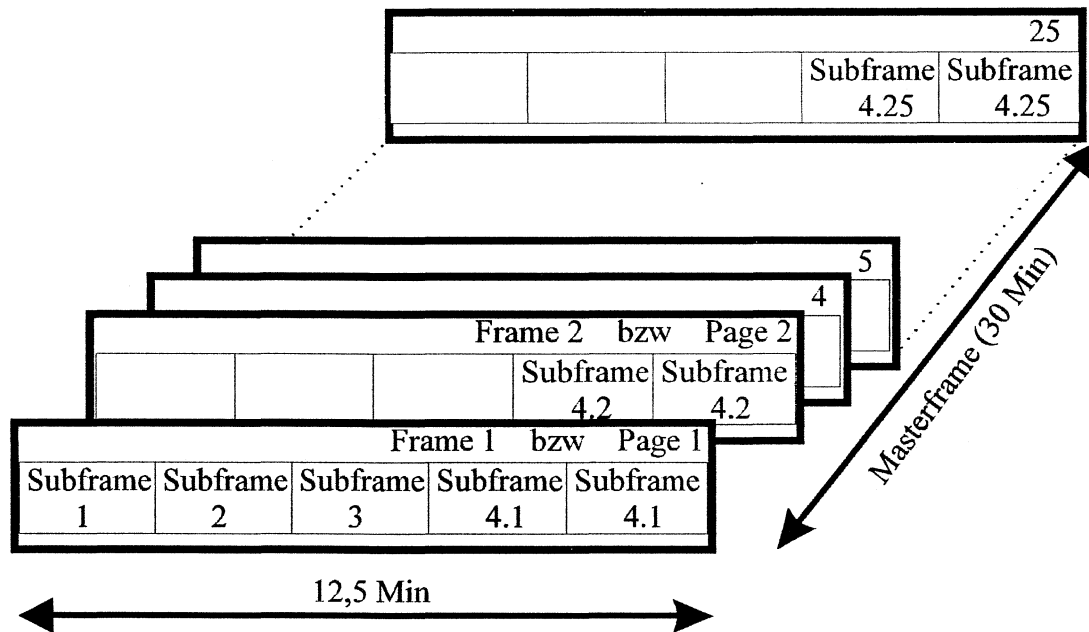


Abbildung 2.4: Frame-Strukturierung der GPS-Nachricht

Die Übertragung der gesamten GPS-Nachricht in einem Masterframe benötigt:

$$t_{MF} = 25 \cdot t_F = 25 \cdot 30 \text{ s} = 12,5 \text{ Min} \quad (2.18)$$

Für eine gute Ortung sind aber nicht notwendigerweise alle Bahndaten erforderlich. Ein GPS-Empfänger kann deshalb schon ab einer Aquisitionszeit von 30 s eine Positionsbestimmung durchführen.

2.7 Erreichbare Genauigkeiten beim GPS

Die erreichbaren Genauigkeiten beim GPS werden von unterschiedlichen Fehlereinflüssen bestimmt. Dabei lassen sich die Störgrößen in zwei Kategorien unterteilen:

Fehler, die bei der Pseudostreckenmessung entstehen, werden in Abschnitt 2.7.1 behandelt. Zur qualitativen Beurteilung dieser Fehlerkategorie wird in Abschnitt 2.7.2 der DOP-Faktor eingeführt.

Die zweite Fehlerkategorie wird von der künstlichen Signalverschlechterung gebildet, die in Abschnitt 2.7.3 erläutert wird.

2.7.1 Fehlerpotential bei der Pseudostreckenmessung

- **Satellitenfehler**

Satellitenfehler entstehen im wesentlichen durch Uhrenfehler der Satellitenuhr. BAUER [15] gibt einen aus Uhrenfehlern resultierenden Abweichungsbereich von $\pm 0,9$ m an. Die Ephemeridenfehler werden mit $\pm 1,5$ m beziffert.

- **Signalausbreitungsfehler**

Das Signal durchläuft auf dem Weg zur Erdoberfläche Bereiche mit unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen für die elektromagnetischen Wellen. Dies führt dazu, daß sich das Signal mit variablen Ausbreitungsgeschwindigkeiten fortpflanzt und dadurch keinen exakt geradlinigen Weg einschlägt. Die Brechung in der Ionosphäre und Troposphäre wird gem. BACHMANN [21] in Abbildung 7 verdeutlicht. Die durch Brechung verfälschte Entfernungsmessung wird als Pseudostreckenmessung bezeichnet. Im Bild ist die gekrümmte Signalstrecke mit Pseudo Range beschriftet. Die Entfernungen sind zur Demonstration des Brechungseffektes nicht maßstabsgetreu abgebildet.

Zur Korrektur der Pseudo Range werden Refraktionskoeffizienten herangezogen. Da sich in der Troposphäre das lokale Wettergeschehen abspielt, können diese Korrek-

turglieder nur hinreichend genau angegeben werden. Nach BAUER [15] führt diese Unsicherheit zu einem Fehler im Meterbereich. Extrem hoch kann der Laufzeitfehler des Satellitensignals werden, wenn der GPS-Satellit nur noch flach über dem Horizont steht. So können sich bei einem, bei 5° stehenden Satelliten nach WELLS [18] Streckenfehler bis zu 25 m ergeben.

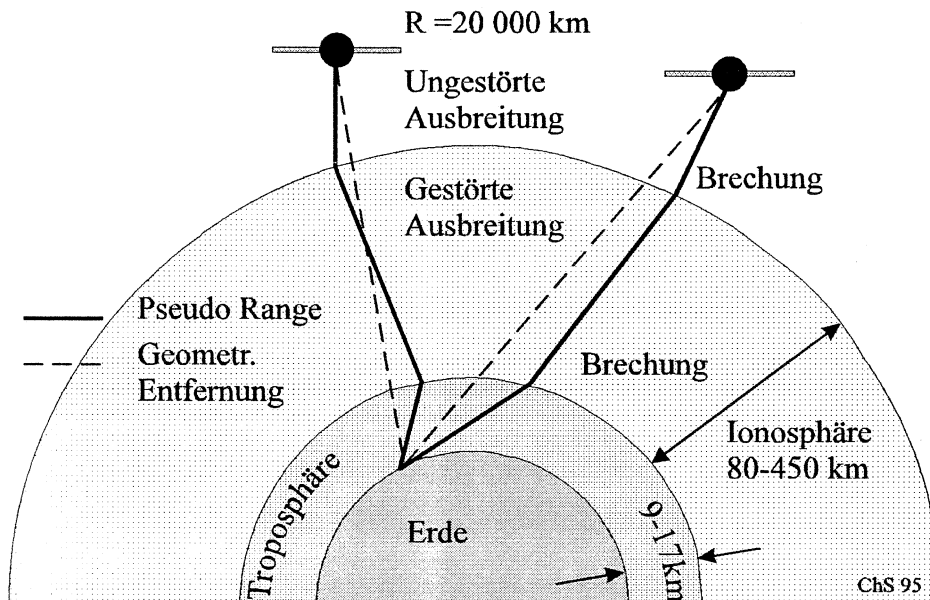


Abbildung 2.5: Laufzeitfehler in der Erdatmosphäre

Zum Signalausbreitungsfehler müssen auch Fehler durch Mehrwegausbreitung gezählt werden. Es ist zu klären, ob Reflexionen an Wäldern und Hügeln bei einer Ortung in der Landtechnik einen Einfluß auf die Meßergebnisse haben.

• Empfängerfehler

Das Meßrauschen ist eine Fehlerquelle, die sich direkt proportional zur Wellenlänge des verwendeten Codes verhält. Dadurch können beim P-Code Fehler von $\pm 1\text{ m}$ und beim C/A-Code Fehler von $\pm 10\text{ m}$ auftreten.

Weitere Unsicherheiten entstehen durch das Meßrauschen. Es ist hauptsächlich abhängig von der Länge des verwendeten Codes. Beim P-Code können nach BAUER [15] Fehler in der Größenordnung von $\pm 0,3\text{ m}$ entstehen, beim C/A-Code $\pm 3\text{ m}$.

Die Berechnungsfehler finden ihre Ursache in den Algorithmen des GPS-Empfängers. Stand der Technik sind nach einer Studie von LACHAPELLE [19] bei guten GPS-Empfängern Fehler für Auflösung und Meßrauschen im Dezimeterbereich.

2.7.2 DOP-Faktoren

Die Genauigkeit bei der Auswertung der Pseudostreckenmessung ist abhängig von der Empfänger-Satelliten-Geometrie. Die Geometrieverhältnisse können durch verschiedene DOP-Faktoren (Tabelle 2.4) ausgedrückt werden.

Tabelle 2.4: Beschreibung der DOP-Faktoren

DOP-Faktoren	Bedeutung	Beschreibung
HDOP	Horizontal Dilution of Precision	Horizontal, zweidimensional
VDOP	Vertical Dilution of Precision	Vertikal, eindimensional
TDOP	Time Dilution of Precision	Zeit, eindimensional
PDOP	Position Dilution of Precision	Position, dreidimensional
GDOP	Geometrical Dilution of Precision	Vollständige Geometrie, vierdimensional

DOP bedeutet **Dilution of Precision**, wörtlich übersetzt „Verschmutzung der Genauigkeit“. Der DOP ist ein Maß für eine bestimmte zeit- und ortsabhängige Empfangssituation. Unterschieden werden fünf DOP-Faktoren.

Die Bedeutung der DOP-Faktoren bzw der geometrischen Verhältnisse wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht. Dieses Beispiel wurde entnommen aus dem Handbuch der Satellitennavigation von PETER BACHMANN [21]. Hier werden als Beispiel drei verschiedene zweidimensionale Satellitengeometrien vorgeschlagen.

Am günstigsten ist die Konstellation A. Dort schneiden sich in der von den Signalen aufgespannten Ebene die Signalstrecken im Winkel $\alpha \approx 90^\circ$.

Die Schnittpunkte der Signalstrecken lassen sich im Bereich eines rechten Winkels optimal bestimmen. Der GPS-Empfänger sollte diese Konstellation bevorzugt auswählen. Als Kriterium wird in der Praxis der PDOP herangezogen.

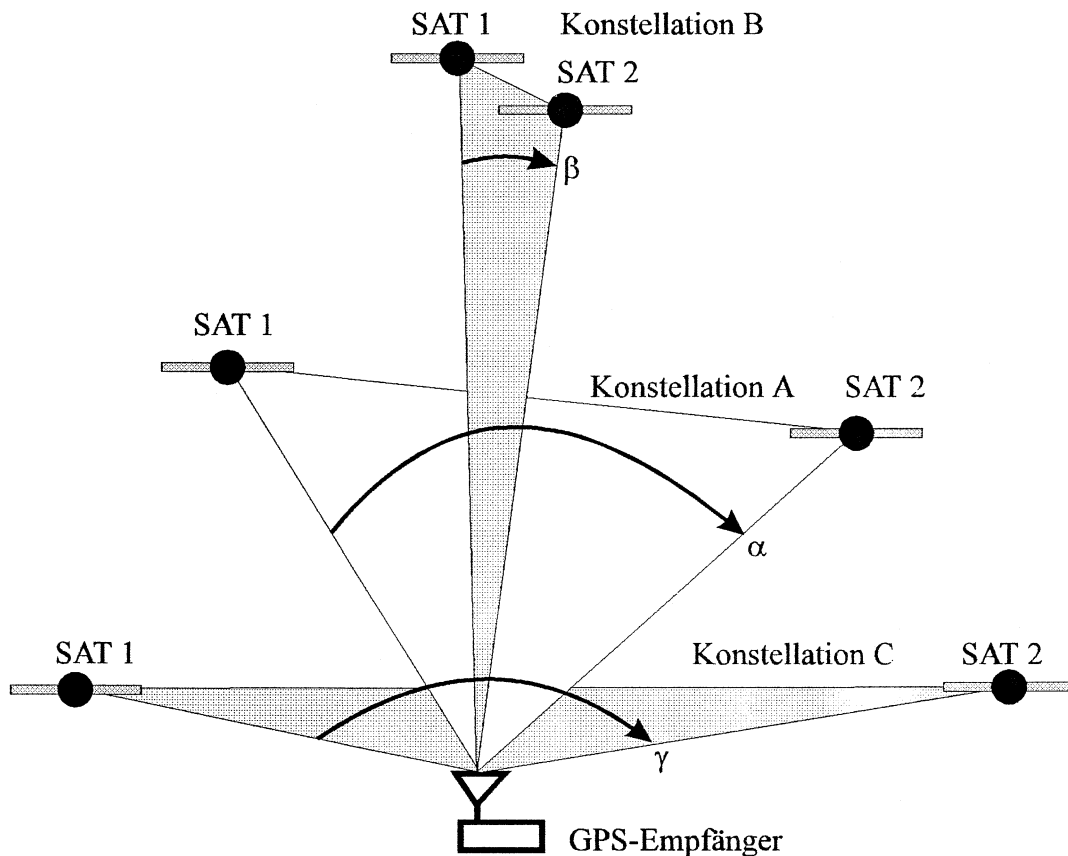


Abbildung 2.6: Bedeckungsgeometrie

Wenn zwei Satelliten wie in Konstellation B einen zu spitzen Winkel (hier: β) bilden, lassen sich die Schnittpunkte nicht mehr scharf bestimmen. Deshalb wird eine Positionsbestimmung ungenau. In diesem Fall soll der Empfänger die Bedeckungsgeometrie mit Hilfe der DOP-Faktoren als ungünstig bewerten können.

Im Fall C (Abbildung 2.6) wird der Winkel γ zu stumpf für eine scharfe Schnittpunktbestimmung. Eine Auswahl dieser Konstellation sollte deshalb auch vermieden werden, wenn bessere Kombinationen zur Wahl stehen.

Mit Abbildung 2.7 soll der PDOP qualitativ definiert werden. Der PDOP ergibt sich durch das reziproke Volumen V , das von den, zu den Satelliten weisenden Einheitsvektoren eingeschlossen wird:

$$PDOP \sim \frac{1}{V} \quad (2.19)$$

Die Konfiguration in Abbildung 2.7 besteht aus 4 Satelliten und zeigt das von den Satelliten gebildete Raumsegment. Das Volumen des Körpers wird zum Maximum und damit der PDOP zum Minimum, wenn ein Satellit im Zenit des Beobachters steht, die anderen drei im Azimuth um 120° voneinander getrennt sind und so tief wie möglich über dem Horizont stehen (SPILKER [20]). Dies ist allerdings eine rein geometrische Betrachtung. Flache Satellitenstellungen werden gerade auf Landwirtschaftsflächen oft abgeschattet. Zusätzlich sind hier die Refraktionsverhältnisse auf Grund des längeren Atmosphären-durchlaufs nicht mehr mit der gewünschten Genauigkeit zu bestimmen.

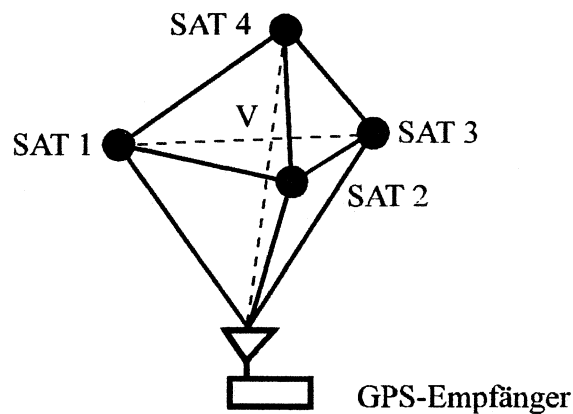


Abbildung 2.7: Raumsegment aus 4 Satelliten

In der Praxis entspricht laut BACHMANN [21] ein PDOP von 1 der idealen Satelliten-geometrie für die dreidimensionale Positionsbestimmung. Werte unter 3 dürfen danach als gut gelten, Werte über 8 als schlecht.

2.7.3 Künstliche Signalverschlechterung

Damit zivile GPS-Nutzer nicht von der vollen Genauigkeit des Systems profitieren können, wird das GPS-Signal vom DoD künstlich verschlechtert (SA) und zusätzlich verschlüsselt (A-S). Das Genauigkeitspotential von GPS wird in zwei Kategorien bereitgestellt:

- **Standart Positioning Service (SPS)**

SPS darf von jedem zivilen GPS-Benutzer uneingeschränkt und gebührenfrei genutzt werden. Bedingt durch die nationalen Sicherheitsinteressen der USA wird die maximal erreichbare Genauigkeit durch SA eingeschränkt. Der SPS umfaßt einen Positionierungs- und Zeitservice. Er ist auf dem L_1 -Band zugänglich und besteht aus dem C/A-Code und der Navigationsnachricht. Der im L_1 -Band enthaltene P-Code ist nicht Bestandteil des SPS. Nach Kloss [6] ist eine horizontale Genauigkeit von 100 m (2 dRMS) bei einer Wahrscheinlichkeit von 95% und 300 m bei einer Wahrscheinlichkeit von 99,99% gegeben.

- **Precise Positioning Service (PPS)**

PPS schöpft das volle Genauigkeitspotential für eine dreidimensionale Positionsbestimmung, eine dreidimensionale Geschwindigkeitsmessung und die Zeit aus. Die Daten für den PPS werden über beide Bänder übertragen. Der Zugang zum PPS wird vom DoD durch die Techniken SA und A-S eingeschränkt. Der Nutzerkreis beschränkt sich deshalb auf speziell autorisierte Teilnehmer. Für den Zugang zum PPS trotz SA und A-S ist das PPS Host Application Equipment, bestehend aus einem PPS Security Module und einem Auxiliary Output Chip erforderlich. Nach BAUER [15] kann beim PPS mit dem C/A-Code eine absolute Navigationsgenauigkeit von 40 m erreicht werden. Beim P- bzw Y-Code steigt die Genauigkeit auf 20 m (2 dRMS).

- **Selective Availability (SA)**

Unter Selective Availability (Ausgewählte Verfügbarkeit) wird die künstliche Verschlechterung der Bahnparameter (Epsilon) und die Manipulation der Satellitenuhrfrequenz (Dithering) verstanden. Der Systembetreiber wählt aus, welcher Anteil des Genauigkeitspotentials von GPS allgemein zur Verfügung gestellt wird. Durch SA wird die potentielle Genauigkeit der absoluten Ortsbestimmung in Echtzeit verschlechtert. Die Möglichkeit, SA einzusetzen ist nur bei den neueren Block II Satelliten gegeben. Das DoD will SA künftig beim C/A-Code und dem P-Code auf beiden Frequenzen anwenden [15]. Die Verschlechterung durch SA kann jedoch durch ein geeignetes Verfahren weitestgehend korrigiert werden (Abschnitt 2.8)

- **Anti-Spoofing (A-S)**

Durch Anti-Spoofing A-S wird der allgemeine Zugang zum PPS ebenfalls eingeschränkt, da bei eingeschaltetem A-S der P-Code durch den Y-Code ersetzt wird (Vgl Abschnitt 2.6.2.5). Anti-Spoofing (To spoof: Beschwindeln, hereinlegen) ist aber in erster Linie eine Maßnahme, um autorisierte GPS-Empfänger unempfindlicher gegenüber Störsendern zu machen. Ein Signal eines Störsenders könnte ohne A-S einem GPS-Empfänger ein falsches Satellitensignal vortäuschen und eine falsche Ortung hervorrufen. A-S kann vom DoD jederzeit eingesetzt werden und ist seit 31. Januar 1994 aktiviert.

2.8 Das differenzielle GPS

Im vorhergehenden Kapitel 2.7 wurden die erreichbaren Genauigkeiten beim GPS diskutiert. Das Genauigkeitspotential ist demnach sowohl durch systematische Störgrößen der Pseudostreckenmessung (2.7.1) als auch durch die künstliche Signalverschlechterung (2.7.3) begrenzt.

Es wurde gezeigt, daß derzeit lediglich eine horizontale Genauigkeit von 100 m (95%) und 300 m (99,99%) bei SPS erreicht werden kann. Der PPS mit einer Genauigkeit zwischen 40 m (C/A-Code) und 20 m (P- u. Y-Code) steht für landtechnische Ortungssysteme nicht zur Verfügung.

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die GPS-Tauglichkeit in der Landtechnik ist aber eine erzielbare Genauigkeit im Meterbereich. Ausschlaggebend für das Genauigkeitsmaß sind die Arbeitsbreiten landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen. Das Auflösungsvermögen eines Ortungssystems soll beispielsweise ausreichen, um aufgezeichnete Fahrspuren „kreuzungsfrei“ darzustellen. Dies kann nur mit einem Auflösungsvermögen von wenigen Metern erreicht werden. Auch bei einer von DEMMEL und MUHR [10] vorgeschlagenen Ertragskartierung wird Präzision gefordert. Flächenerträge sollen einer definierten Rasterung zugeordnet werden können.

Die Genauigkeit, die für eine Echtzeitortung erforderlich ist, läßt sich mit einem einzelnen GPS-Empfänger nicht erreichen. Durch ein geeignetes Verfahren (Differential GPS) ist es jedoch möglich, Störgrößen wie Systemfehler und SA zu korrigieren.

Die Grundlage des differenziellen GPS ist eine zeitgleiche, kontinuierliche GPS-Messung mit einem zweiten GPS-Empfänger, dessen Position genau bekannt ist. Dieser Referenz-Empfänger kann bei gegebener Position das augenblickliche zeitliche Fehlverhalten in einem stationären Punkt ermitteln. Dies geschieht durch einen ständigen Vergleich zwischen dem Ergebnis der GPS-Messung und der bekannten Position. Auf diese Weise läßt sich ein Großteil der Fehlereinflüsse quantifizieren. Die GPS-Abweichungen von der tat-

sächlichen Position ermöglichen dem anderen Empfänger, seine GPS-Daten zu korrigieren.

Die Referenzposition selbst wurde beispielsweise über einen längeren Zeitraum hinweg durch eine Mittelung der gestreuten Positionsangaben gewonnen. Die Referenzstation sollte unter ähnlichen geometrischen Verhältnissen arbeiten. Optimal ist ein Referenzstandort mit freier Sichtverbindung zu allen aktuellen Satelliten. Dann können von dem Referenzsystem alle, für den mobilen Empfänger benötigten Informationen zum Fehlerverhalten gesammelt werden.

Ein von Kumm [5] veröffentlichter Vergleich von GPS mit DGPS zeigt die mögliche Genauigkeitssteigerung.

Abbildung 2.8 stellt die während 24 Stunden von der Firma Magnox mit einem reinen GPS-Empfänger bestimmten Positionen dar. Am wahrscheinlichsten ist dabei die Position im Zentrum. Vereinzelt Ausreißer weichen aber fast 100 m vom vermuteten Standort ab.

Die Daten in Abbildung 2.10 wurden unter gleichen Bedingungen aufgezeichnet, jedoch differential korrigiert. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen hier die Abweichungen unter 10 m. (Die Achsen in beiden Bildern sind in Metern skaliert)

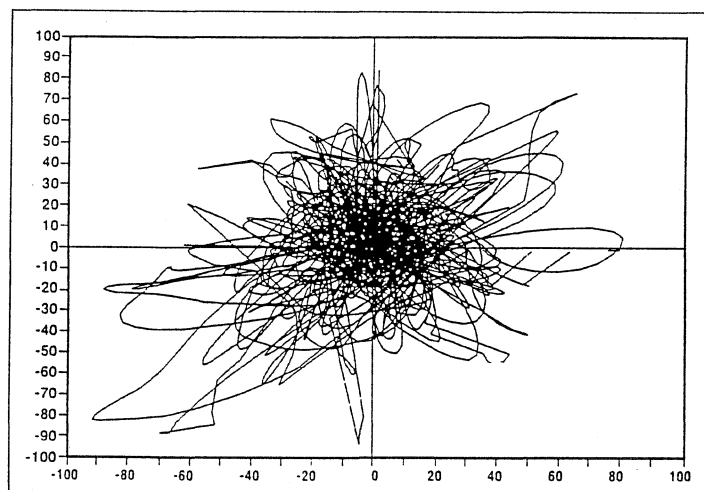


Abbildung 2.9: GPS-Aufzeichnung über 24 Stunden

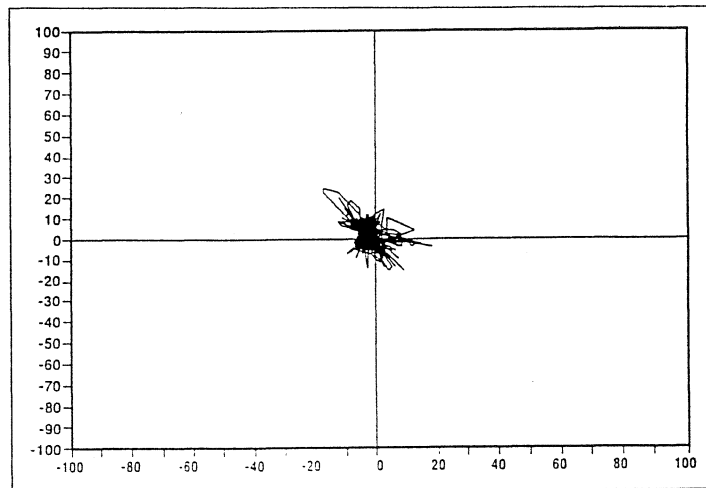


Abbildung 2.10: DGPS-Aufzeichnung über 24 Stunden

Die Korrektur der mobilen GPS-Daten kann entweder im Echtzeit-Betrieb (Realtime oder Online-DGPS) oder nachträglich (Postprocessing DGPS) erfolgen.

- **Realtime DGPS**

Für die Datenaufbereitung der Mobilstation in Echtzeit ist eine Datenübertragung notwendig. Die Referenzstation kann ihre Korrekturdaten zB über eine Funkstrecke an den mobilen Empfänger schicken (siehe Abbildung 2.10). Dort werden dann in Echtzeit Korrekturen vorgenommen.

Realtime-DGPS kann in drei Verfahren untergliedert werden. Das genaueste ist das RTK-DGPS (Real-Time-Kinematic), gefolgt von der Pseudo-Range-Korrektur (Standartverfahren). Die einfache Positionskorrektur ist etwas ungenauer.

Nachteilig ist beim Realtime-Betrieb, daß eine eigene Telemetrie mit Funkmodems zum Datentransfer aufgebaut werden muß. Ein System, daß Korrekturwerte flächendeckend ausstrahlt, hat sich derzeit noch nicht etabliert. Administrative Einschränkungen bezüglich Frequenz und Sendeleistung müssen berücksichtigt werden.

Realtime-DGPS in der Landtechnik ist nicht notwendig, solange Meßwerte nur aufgezeichnet werden sollen. Sind aber kartierte Meßwerte oder positionsabhängige Entscheidungskriterien gegeben, kann nur im Realtime-Betrieb koordinatenabhängig reagiert werden.

Abbildung 2.10 zeigt die Komponenten einer Realtime-DGPS Ortung. Der Schlepper empfängt als Mobilstation die GPS-Daten vom Raumsegment und die Korrekturdaten der Referenzstation. Die Referenzstation besteht hier aus einer Stromversorgung, einem GPS-Empfänger, einem Funkmodem sowie zwei Antennen (GPS und Telemetrie).

• Postprocessing-DGPS

Bei einer passiven Koordinatenaufzeichnung der GPS-Daten können die Positionen auch nachträglich aufbereitet werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein Lohnunternehmer neben der Arbeitszeit die bearbeitete Fläche bestimmen will, oder Meßwerte aufgezeichnet werden, die für eine spätere Auswertung bestimmt sind.

Im Postprocessing-Mode entfallen einerseits telemetrische Einrichtungen. Andererseits werden Datenspeicher in ausreichender Größe benötigt. Um sämtliche GPS-Daten nachträglich mit den Referenzdaten zu vergleichen, müssen diese zusammen mit deren Zeitangabe kontinuierlich abgespeichert werden. Durch die Indizierung der Daten mit der Satellitenzeit können die jeweils passenden Datensätze in Bezug gebracht werden.

Postprocessing-DGPS kann durch Pseudo-Range-Korrektur oder durch Trägerphasenkorrektur betrieben werden.

Mit beiden DGPS-Verfahren können im dynamischen Betrieb nach Kumm [5] Genauigkeiten im Bereich 5-10 m erzielt werden. DGPS erscheint deshalb für den Einsatz in der Landtechnik geeignet.

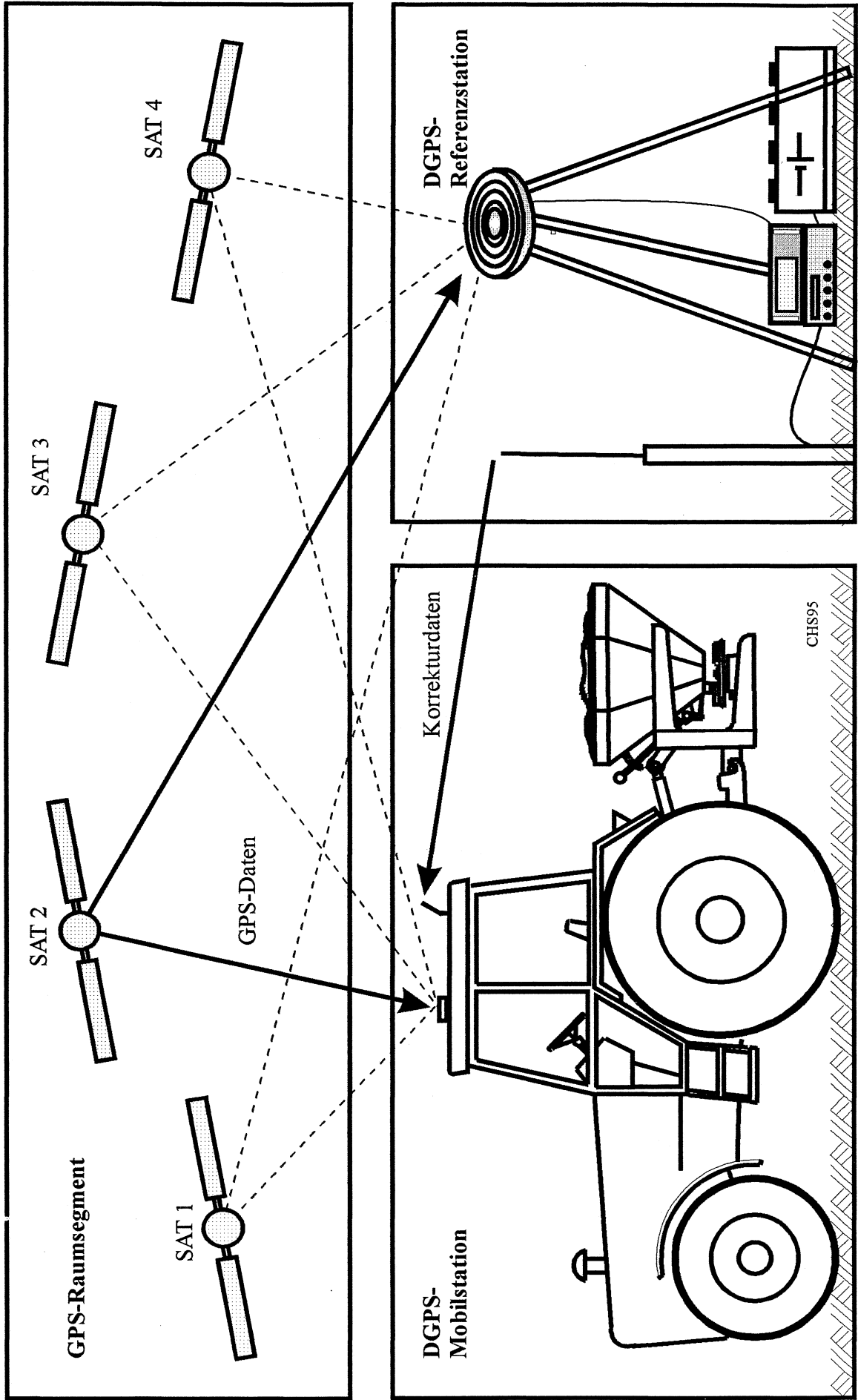


Abbildung 2.11: Blockdiagramm Realtime-DGPS

2.9 Signalabschattung und Multipath beim DGPS

Im offenen Gelände werden mit DGPS mittlerweile Genauigkeiten im Meterbereich erzielt [16]. Im landwirtschaftlichen Bereich treten aber nach AUERNHAMMER [14] Signalausfälle auf, die sich auf geländebedingte Abschattung zurückführen lassen. Abbildung 1.2 zeigt einen solchen Ortungsausfall bei der Ertragskartierung in Scheyern. Vor allem Waldränder oder gruppiertes Gelände lassen Signalstörungen erwarten. Die Gründe von Signalabschattungen und Mehrwegausbreitung sollen deshalb erläutert werden.

Ein GPS-Satellit kann nur zur korrekten Ortung herangezogen werden, wenn er für den Empfänger sichtbar ist. Sichtbarkeit bedeutet dabei ein direkter und ungestörter Empfang des GPS-Signals. Abschattungsprobleme entstehen, wenn die Sichtbarkeit der Satellitenkonstellation beeinträchtigt wird.

GPS-Satelliten bewegen sich auf einer elliptischen Bahn um den Erdmittelpunkt. Ein Umlauf dauert ca. 12 Stunden in einer Bahnhöhe von 20 183 km. Der Punkt auf der Erdoberfläche, in dem der Satellit genau im Zenit steht, wird Subsatellitenpunkt (siehe Abbildung 2.12) genannt. In diesem Punkt S besteht im freien Gelände eine direkte Sichtverbindung zum Satelliten. Nach 2.4 sind die GPS-Satelliten auf 6 Umlaufbahnen verteilt, um eine Ortung weltweit flächendeckend zu ermöglichen. Es kann daher nur ein Teil des Raumsegments über dem eigenen Horizont stehen.

Letztlich muß auch der ungestörte Empfang des Referenzsignals zur Sichtbarkeit gezählt werden. Hier wird deutlich, daß die gleichen Überlegungen auch für die Referenzstation gelten müssen. Die Grenzen der Sichtbarkeit und des direkten Signalempfangs werden demnach von mehreren Parametern bestimmt:

- Dem Ausleuchtungsgebiet des Satelliten
- Der augenblicklichen Satellitenkonstellation
- Dem Horizont des mobilen GPS-Empfängers

- Dem Horizont der Referenzstation
- Der Abschattung des Referenzsignals

2.9.1 Das Ausleuchtungsgebiet eines Satelliten

Wird ein GPS-Satellit mit der Sonne verglichen, entspräche sein Signalkegel der Ausbreitung des Sonnenlichts. Das Ausleuchtungsgebiet ist rein durch die Geometrie vorgegeben. Ausgeleuchtet wird, wie Abbildung 2.12 zeigt, ein kreisförmiger Ausschnitt auf der Erdoberfläche, deren Grenze die Linie darstellt, an dem sich die Tangente vom Satelliten an die Oberfläche der Erde anschmiegt. Dieser Bereich wird durch den Erdradius und die Höhe der Satellitenbahn bestimmt. Nach KUMM [5] beträgt der sphärische, auf der Kugeloberfläche gemessene Ausleuchtungsradius 4568 sm. Dies entspricht etwa einem Drittel der Erdoberfläche.

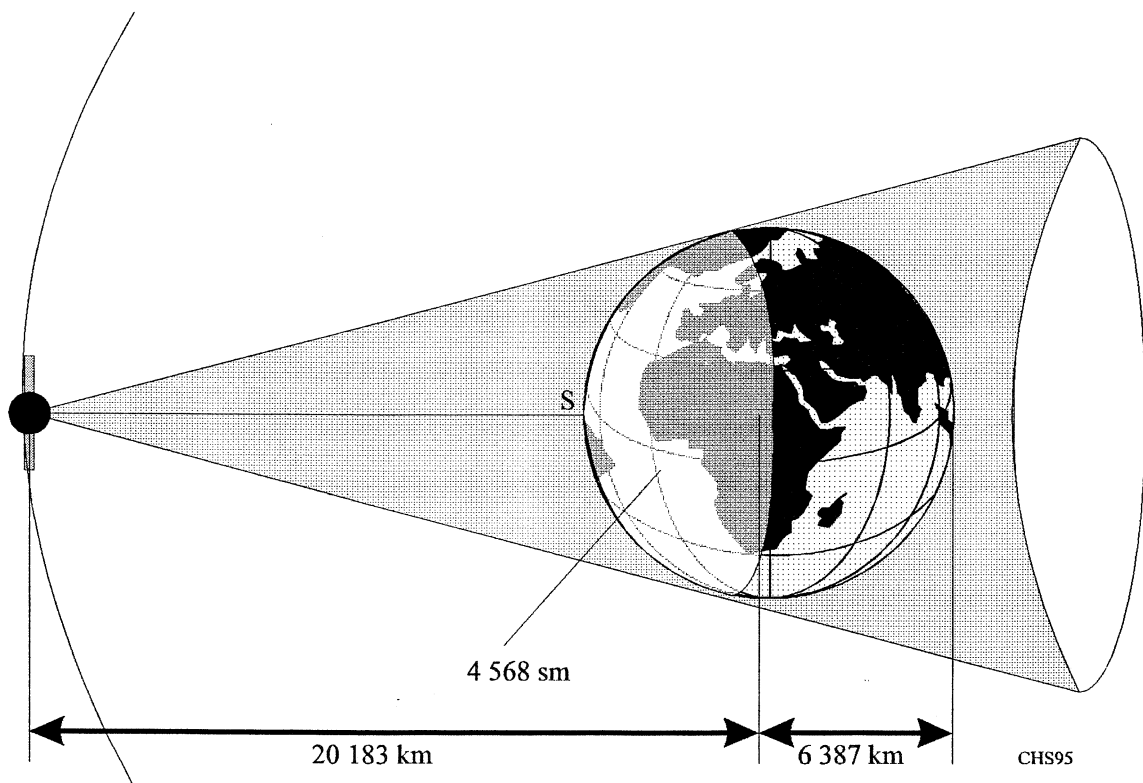


Abbildung 2.12: Ausleuchtungsgebiet eines GPS-Satelliten

Durch die Richtcharakteristik der Signalabstrahlung verschlechtert sich zudem die Empfangsqualität am Rand des Ausleuchtungsgebietes. Hier wird die Signalleistung etwas schlechter. Nach KUMM [5] sollte ein Satellit für eine hinreichende Empfangsqualität mindestens 10° über dem Horizont stehen.

Diese Vorbetrachtung grenzt die Anzahl der verfügbaren Satelliten ein. Bei einer Satellitenzahl von 24 und einer gleichmäßigen geometrischen Verteilung können bei freiem Horizont demnach maximal 8 Satelliten empfangen werden.

2.9.2 Augenblickliche Satellitenkonstellation

Durch die Bahnbewegung der Satelliten ergeben sich häufig auch ungünstige Konstellationen.

Verläßt beispielsweise gerade ein Satellit den Horizont, während ein anderer im sichtbaren Bereich eintrifft, befindet sich der Empfänger am Rand zweier Ausleuchtgebiete. Die Anzahl der verfügbaren Satelliten wird nochmals reduziert.

Eine weitere ungünstige Konstellation ergibt sich, wenn zwei Satelliten sehr nahe beieinander stehen. Hier wird das Gebiet zwar doppelt ausgeleuchtet, aber das zweite Signal kann nicht trigonometrisch ausgewertet werden, weil es keinen Winkel zu dem anderen Signal einschließt (vgl. Abbildung 2.6: Bedeckungsgeometrie). Abermals wird die Anzahl der Satelliten reduziert, die für die Positionsbestimmung herangezogen werden können.

Eine von KUMM [5] vorgestellte Beobachtung der Anzahl verfügbarer Satelliten über 24 Stunden wird in Abbildung 2.13 gezeigt. Die Abbildung demonstriert die zeitliche Abhängigkeit der Ortungsgüte bei freiem Horizont. Am 14.12.93 konnten auf der Position $42^\circ 16' N$ und $12^\circ 50' W$ die Signale von 4 bis maximal 9 Satelliten beobachtet werden. Dabei hatten alle dargestellten Satelliten eine Elevation von mehr als 15° . Die Anzahl verfügbarer GPS-Satelliten kann von dem, in 2.9.1 gewonnenen Ergebnis abweichen.

Hier wurde eine gleichmäßige Verteilung aller Satelliten und ein abgeschätztes Ausleuchtungsgebiet zu Grunde gelegt.

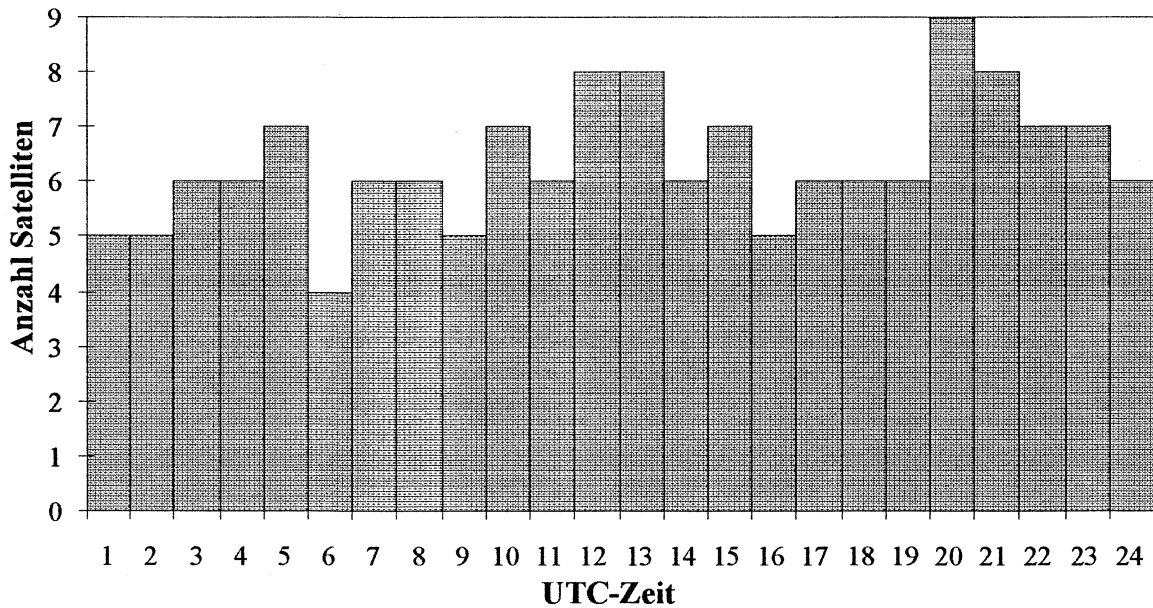


Abbildung 2.13: Anzahl verfügbarer Satelliten mit mehr als 15° Elevation

2.9.3 Der Horizont des mobilen GPS-Empfängers

Hiermit ist vor allem der „harte“ Horizont gemeint. Genauso, wie die Sonne in einem Bergtal schon sehr früh hinter den Bergen verschwindet, werden auch GPS-Satelliten von Hügeln und Bergen, dichten Wäldern und Bebauungen verdeckt (siehe Abbildung 2.14). Die direkte Sichtverbindung ist dann gestört.

Im Schatten von Bergen oder Bebauungen kann dennoch oftmals ein Signal empfangen werden. GPS-Signale können sich ähnlich wie Tageslicht über Umwege durch Brechung und Reflexion ausbreiten. Diese Form der Signalausbreitung ist aber unerwünscht. Sie führt auf Grund der längeren Signallaufzeiten zu Positionsfehlern. Fehler durch Mehrwegeausbreitung (multi-path-effect) werden in Abbildung 2.14 gezeigt. Aus diesem Beispiel lassen sich zwei Aussagen ableiten:

- Eine Abschattung kann das Signal soweit schwächen, daß es nicht mehr zu empfangen ist.
- Im Signalschatten können Multipath-Effekte zu einer fehlerhaften Positionsbestimmung beitragen.

In Abbildung 2.14 ist für den Schlepper kein direkter Empfang der GPS-Signale 1 und 2 möglich. Signal 1 kommt jedoch durch Reflexion beim Fahrzeug an und verursacht eine falsche Positionsauswertung.

2.9.4 Der Horizont der Mobilstation

Die Überlegungen aus 2.9.3 haben auch für die Referenzstation ihre Gültigkeit. Die Referenzstation sollte daher eine ungestörte Sichtverbindung zu den GPS-Satelliten haben. Um zu gewährleisten, daß alle notwendigen Korrekturdaten berechnet werden können, sollten die Empfangsbedingungen hier stets besser sein, als die der Mobilstation.

Die Abbildung 2.14 zeigt Signalabschattung und Mehrwegausbreitung für die Referenzstation. Zugleich wird der ungünstigste Fall demonstriert. Die Referenzstation kann durch die Signalabschattung des Signals 1 keine Korrekturdaten für diesen Satelliten berechnen. Die Mobilstation betreibt aber augenblicklich mit diesem Signal eine Ortung.

Die Korrekturdaten des Signals 2 sind für den Schlepper nutzlos, da sich das Fahrzeug im Signalschatten 2 befindet.

Könnte das Fahrzeug mit Signal 2 orten, wäre die Korrektur jedoch fehlerhaft, weil die Referenzstation das Signal 2 über einen Umweg empfängt.

2.9.5 Abschattung des Referenzsignals

Signalabschattung kann auch bei der telemetrischen Übertragung des Referenzsignals auftreten (Abbildung 2.14). Bei einer geringen Sendeleistung der DGPS-Referenzstation kann bei größeren Entfernungen und einer ungünstigen Übertragungstrecke ein Korrekturausfall entstehen. Eine Mehrwegausbreitung des Korrektursignals ist in diesem Fall positiv zu bewerten. Diese Form der Abschattung führt aber nicht zu einem totalen Ortungsausfall, sondern zu einer Positionsverschlechterung. Der mobile DGPS-Empfänger kann dann im reinen GPS-Modus weiter orten.

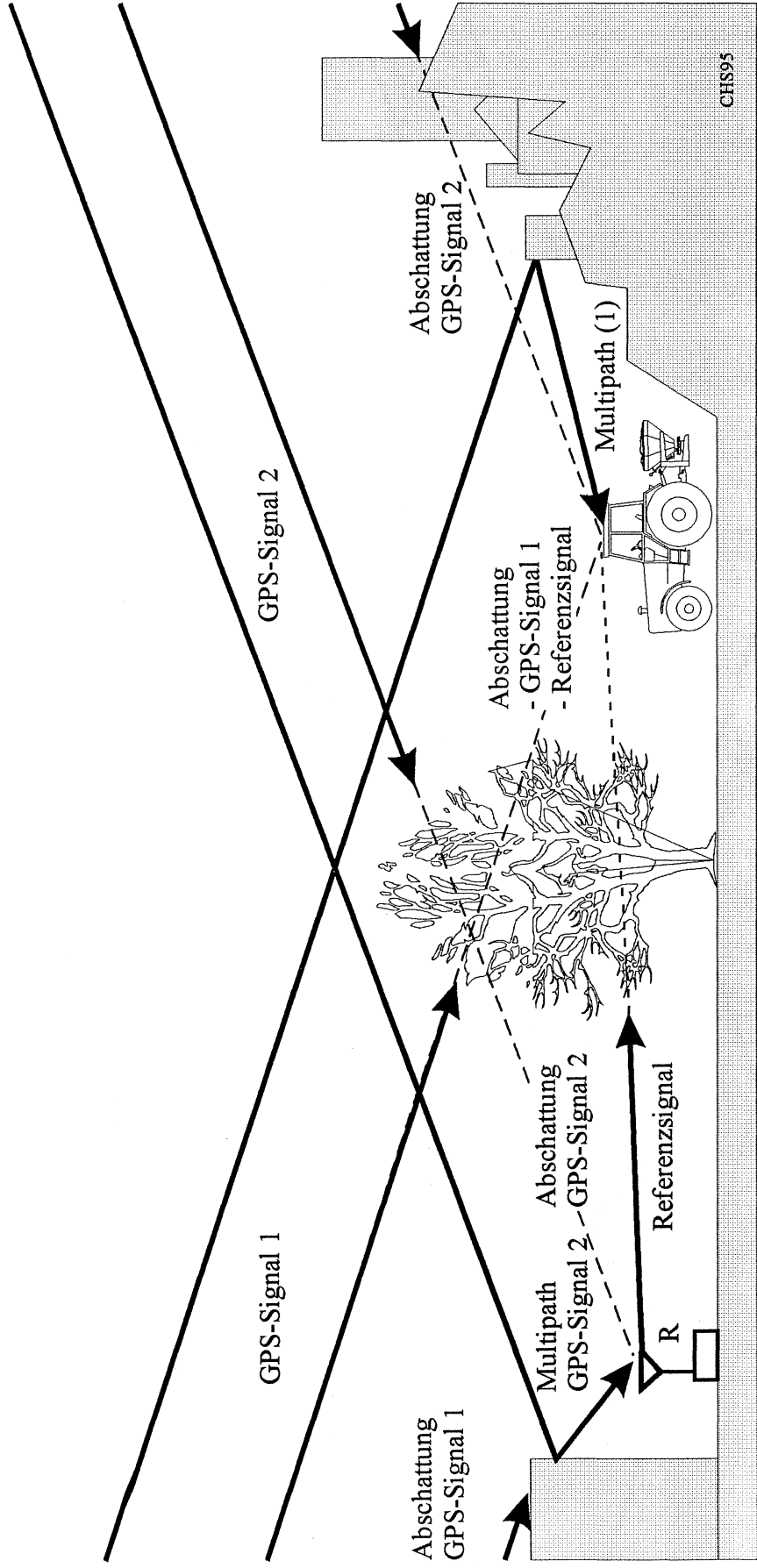


Abbildung 2.14: Signalabschattung und Multipath-Effekte

3 Zielsetzung der Diplomarbeit

In der modernen Landwirtschaft sollen zukünftig die Flächen koordinatengestützt bearbeitet werden können. Dies setzt ein zuverlässiges und präzises Ortungssystem voraus. In den vorhergehenden Kapiteln wurden die theoretischen Grundlagen des Navigationssystems DGPS erläutert.

Bisher wurden Untersuchungen mit verschiedenen DGPS-Systemen gemacht [16]. Hier interessierte vor allem die Positionsgenauigkeit. Das Ziel, während des Einsatzes auf den Meter genau zu orten, scheint erreicht zu sein.

Offen blieb aber bis jetzt vor allem die Frage, wie sich die Systeme an Waldrändern, in hügeligem Gelände und bei schlechten Witterungsbedingungen verhalten. Bei dem großflächigen Erfassen der Messwerte zeigten sich häufig Ortungsausfälle. Es ist anzunehmen, daß sich diese Störungen auf Signalabschattung zurückführen lassen [16]. In Randgebieten wurden, wie Abbildung 1.2 zeigt, die Empfangsbedingungen so beeinträchtigt, daß eine Positionsbestimmung nicht möglich war.

Ziel dieser Studie soll es sein, Auswirkungen der Signalabschattung näher zu untersuchen.

Dabei soll qualitativ untersucht werden, wann Abschattungseffekte zu erwarten sind. Herausgearbeitet werden sollen die Bereiche einer, an Mischwald grenzenden landwirtschaftlichen Fläche, in denen eine zuverlässige Ortung möglich bzw nicht möglich ist.

Untersucht werden soll auch, wie hoch die zu erwartenden Abweichungen sind. Von Interesse ist dabei, ob ein Wald als homogenes Gebilde darzustellen ist, oder ob vielmehr mit statistischen Abweichungen zu rechnen ist.

Des weiteren soll eine mögliche Abhängigkeit der Ortungsgüte vom Abstand zum Waldrand qualitativ beurteilt werden.

Ein wichtiger Parameter, dessen Auswirkung es zu untersuchen gilt, sind die Witterungsverhältnisse. Dabei soll in mehreren Versuchen mit sonst gleichen Rahmenbedingungen festgestellt werden, wie sich Feuchtigkeit, Bewölkung usw auf das Versuchsergebnis niederschlagen.

Mit Hilfe von geeigneten Aufzeichnungsverfahren und Datenspeichern sollen alle Messungen im dynamischen Betrieb erfolgen. Dabei sollen die Versuche bei landwirtschaftlich relevanten Geschwindigkeiten und Wendezeiten stattfinden, um Positionsabweichungen realistisch beurteilen zu können.

Die Ergebnisse der Arbeit sollen den Einfluß der Signalabschattung auf die DGPS-Ortung charakterisieren. Diese Ergebnisse sollen geeignet sein als Basis für eine Verbesserung bestehender DGPS-Ortungsverfahren. Folgerungen aus der Systemcharakteristik sollen Ausblicke dazu geben.

4 Versuche zur Abschattung

Im Oktober 1994 wurden in Adelschlag bei Eichstätt erste Vorversuche angestellt, um zu ermitteln, in welchen Bereichen am Waldrand deutliche Fehler bei der DGPS-Ortung auftreten und wie sich diese auswirken.

4.1 Stationäre Messungen

Der erste Versuchsaufbau hatte zum Ziel, den stationären Positionsfehler in Abhängigkeit von der Entfernung zum Waldrand darzustellen. Es zeigte sich jedoch, daß diese stationäre Messung keine brauchbaren Ergebnisse für eine zuverlässige Beurteilung liefern kann.

Die Gründe dafür liegen in der geringen Homogenität des Baumbestandes. Schon ein kleines Fenster in den Baumkronen genügte, um ein Satellitensignal durchkommen zu lassen. Bereits wenige Sekunden später konnte der Empfang dieses Signals deshalb gestört sein, weil beispielsweise die Bewegung der Baumkronen durch den Wind den Satelliten wieder ausblendete. Ebenso verhielt sich die Anzahl der verfügbaren Satelliten, wenn der Versuchsaufbau nur um wenige Meter parallel zum Waldrand verschoben wurde.

Es lag also nahe, mehrere Meßreihen aufzunehmen und diese dann zu mitteln. Gute Ergebnisse ließen sich aber nur über einen Beobachtungszeitraum von vielen Stunden erzielen. Dies wiederum hätte den Nachteil, daß sich in dem notwendigerweise langen Zeitintervall die gesamte Satellitengeometrie drastisch ändert. Eine stationäre Messung zur Beurteilung des Einflusses von Waldrändern ist deshalb wenig aussagekräftig.

4.2 Versuche im dynamischen Betrieb

Am 26.10.94 wurde in Adelschlag eine erste dynamische Meßreihe aufgezeichnet. Dabei orientierte sich der Versuch an den Arbeitsgeschwindigkeiten unter realen Bedingungen. Die Meßwerte wurden bei einer Geschwindigkeit von etwa 12 km/h kontinuierlich aufgenommen. Als Testgebiet wurde eine Stilllegungsfläche gewählt, deren drei Seiten von Mischwald umgeben ist. Der Horizont im Norden war bei dieser Fläche frei.

(Abbildung 4.2)

Ziel der Meßreihe ist es, daß charakteristische Verhalten der DGPS-Ortung im dynamischen Betrieb zu beurteilen.

4.3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand im wesentlichen aus zwei Komponenten (Abbildung 4.1):

- Einer mobilen Empfangsstation:

Die mobile DGPS-Station wurde durch ein sechsrädriges All-Terrain-Vehicle (ATV) von John Deere realisiert. Dieses Geländefahrzeug wurde für den Versuch mit zwei zusätzlichen Stromversorgungen ausgestattet. Das ATV trug für die gleichzeitige Aufzeichnung der „mobilen“ Daten zwei entkoppelte GPS-Systeme sowie die Telemetrie zum Empfang der DGPS-Korrekturdaten mit sich.

Die Abbildung 4.1 zeigt die Aufzeichnung der Satellitendaten mit einem Ashtech LM XII - (GPS-Empfänger und externe Antenne) im GPS-Modus und die spätere Postprocessing-Korrektur der Daten am PC.

Zum anderen wurden die gleichen Satellitendaten über ein zweites System - bestehend aus dem NovAtel 2151 Empfänger, einer eigenen GPS-Antenne, einer Funkantenne, einem Funkmodem und einem Notebook in Echtzeit durch die Daten der Referenzstation

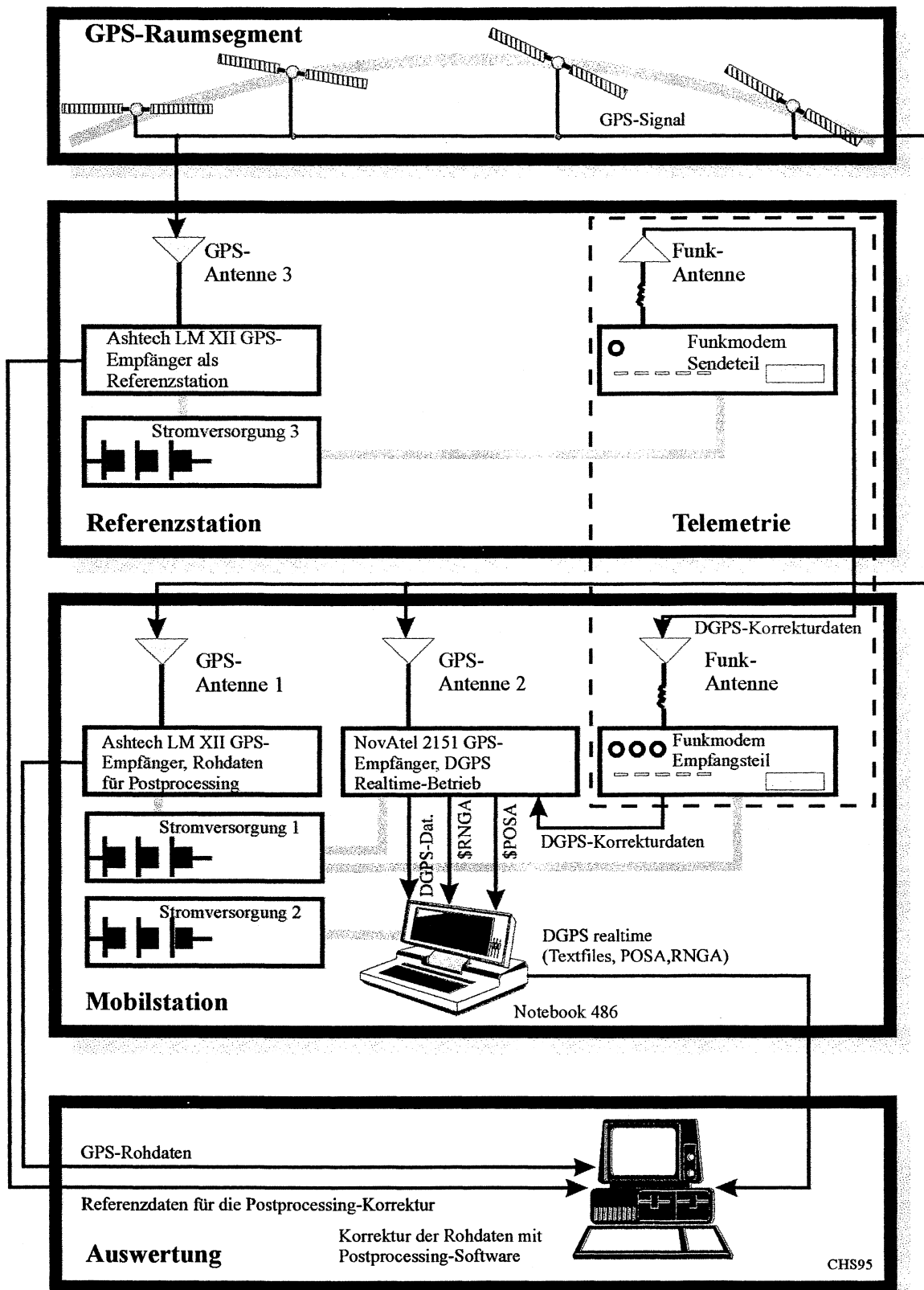


Abbildung 4.1: Messungen im dynamischen Betrieb,
Versuchsaufbau in Adelschlag vom 26.10.1994

korrigiert. Die Daten wurden, gem. Abbildung 4.1 in verschiedenen Formaten protokolliert (DGPS-Daten, \$RNGA-Strings, \$POSA-Strings).

Einige Standarddaten (x, y, lat, lon, hgt etc) ließen sich in Echtzeit mit einer Software der Firma Geokonzept weiterverarbeiten zu einem Textfile. Satellitenspezifische Daten hingegen fielen unregelmäßig und mit variabler Länge in Form von Strings an, die in einem Logfile vom Rechner aufgezeichnet wurden.

- Einer stationären Referenzstation:

Da mit dem NovAtel-Empfänger eine Realtime-DGPS-Korrektur durchgeführt wurde, benötigte das ATV ständig die Korrekturdaten (Abbildung 4.1) einer ortsfesten Referenzstation.

Aus fernmeldetechnischen Gründen konnte eine größere Funkstrecke zu dem Landgut Adelschlag, dem Ort der Auswertung nicht bereitgestellt werden. Die Referenzstation wurde deshalb etwa 800 m nordseitig der Versuchsfläche im freien Gelände positioniert.

Die Bestandteile der Referenzstation waren gem. Abbildung 4.1 eine eigene Stromversorgung, eine GPS-Antenne, eine Funkantenne, ein Ashtech LM XII Empfänger und für den Echtzeitbetrieb ein Funkmodem. Das Funkmodem übertrug dabei kontinuierlich die Korrekturdaten an das mobile System für den Realtime-Betrieb. Eine optische Anzeige und ein Statusflag im Datenstrom garantierten die fehlerfreie Datenübertragung.

Beim Aufbau des Versuches wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

Entscheidend für die Qualität der Messung ist die optimale Positionierung aller GPS-Antennen. Für die Einbeziehung aller verfügbarer Satelliten sollte bestmöglicher Sichtkontakt bestehen. Dies konnte durch die Anbringung der Antennen am höchsten Punkt

des Fahrzeuges sichergestellt werden. Im Versuch wurden die Antennen in der Fahrzeugmitte angebracht, um den Einfluß der Achsbewegung zu minimieren.

Um Multipath-Effekte (Kapitel 2.9) zu vermeiden, wurden die Antennen zusätzlich auf einer Metallplatte befestigt.

Damit ein einwandfreier Betrieb der GPS-Empfänger, des Funkmodems und des Notebooks sichergestellt ist, wurde eine eigene, vom Fahrzeug unabhängige Stromversorgung auf der Ladefläche des ATV aufgebaut.

Bei den Versuchsvorbereitungen zeigte sich, daß der Ashtech-Empfänger durch den Betrieb zusammen mit dem IBM-Notebook gestört wurde. Der Empfänger konnte sein Betriebssystem nicht mehr hochfahren. Auch ein erneutes Programmieren seiner Flash-Eproms am PC brachte das gleiche Ergebnis. Erst das Durchmessen des Versuchsaufbaus konnte mehr Klarheit bringen. Das IBM-Notebook prägte der 12 V Stromversorgung hochfrequente Spannungsspitzen von bis zu 150 Vpp auf. Im Versuchsaufbau wurde der Rechner deshalb von den Empfängern durch eine eigene Stromversorgung entkoppelt

4.4 Versuchsdurchführung

Da für die Versuchsreihen kein zusätzliches Referenzsystem zur Ermittlung der tatsächlichen, exakten Positionen zur Verfügung stand, wurden in die Stilllegungsfläche zunächst einige Fahrspuren im Abstand von ca. 10 m eingefahren. Dies war wichtig, damit bei allen Fahrten grundsätzlich die gleichen Spuren und der gleiche Ablauf der Spurfolgen eingehalten werden konnte. Durch dieses Prinzip war es möglich, in weiten Bereichen der Fläche die Meßwerte über drei Fahrten zu mitteln und relativ genau die tatsächliche Position zu erfassen.

Die Positionsangaben bilden dann umgerechnet in ein lokales kartesisches Koordinatensystem die Basis für die Darstellung. Aber auch die einzelnen Durchläufe der Fahrspuren können nun über der tatsächlichen Fahrspur dargestellt werden. Die Versuchsreihe soll zeigen, ob DGPS-Ortungfehler abhängig von den geometrischen Gegebenheiten sind. Die augenblicklich gemessene Position wird deshalb nicht grundsätzlich deckungsgleich mit der tatsächlichen Fahrspur sein.

Aufgezeichnet wurden auch Zusatzdaten, wie die Anzahl der verfügbaren Satelliten, das jeweilige Signal/ Rauschverhältnis und vor allem die charakteristische Fehlergröße für GPS-Systeme, der DOP-Faktor (Dilution of Precision). Entscheidend ist, daß bei allen aufgenommenen Meßwerten Schlüsselsignale wie zB die Satellitenzeit oder Längen- und Breitenangaben enthalten sind, damit sich in der Auswertung die verschiedenen strukturierten Datensätze zuordnen lassen.

Eingefahren wurden, wie Abbildung 4.2 zeigt, sechs Fahrspuren, die jeweils bis zum Waldrand gehen und deren Wendepunkte im Bereich der letzten zwei Meter teilweise bereits von den Baumkronen überdeckt wurden. Desweiteren wurden parallel zum Waldrand vier Fahrspuren in den Abständen von 0 m, 5m, 10 m und 15 m angelegt, die sich aufgrund der Flächenform hufeisenförmig darstellen. Lediglich in einem kleinen Teilbereich von etwa 25 x 25 m konnte diese Einteilung nicht durchgehalten werden. In Abbildung 4.6 liegt dieser Ausschnitt bei $x=125...150$ m, $y=0...25$ m.

Während der ersten drei Durchläufe für die Fahrspuren im Feld wechselte das Wetter innerhalb kürzester Zeit. Zusammengefaßt sind die Witterungsverhältnisse in der nachfolgenden Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Meteorologische Randbedingungen des Versuchs vom 26.10.94

Lfd-Nr	Versuchsbeschreibung	Randbedingungen
1	Sechs Schleifen über die Fläche	Einsetzender starker Regenschauer, jedoch noch trockene Blätter und trockener Untergrund, mäßiger Wind und langsame Bewegung der Baumkronen
2	Erste Wiederholung nach ca. 15 Minuten	Starker Regenschauer, aufkommender Wind und nasser Untergrund. Bäume beginnen verzögert, Wasser abzutropfen.
3	Zweite Wiederholung nach weiteren 15 Minuten	Kleine Wolkenfetzen, sonst blauer Himmel. Kein Niederschlag. Nasses Laub und nasser Untergrund.
4	Spuren entlang des Waldrandes in den Abständen 0 m, 10 m	Nieselregen, nasses Laub, nasser Untergrund
5	Wiederholung von 4	Nieselregen, nasses Laub, nasser Untergrund
6	Spuren entlang des Waldrandes in den Abständen 5 m, 15 m	Nieselregen, nasses Laub, nasser Untergrund
7	Wiederholung von 6	Nieselregen, nasses Laub, nasser Untergrund

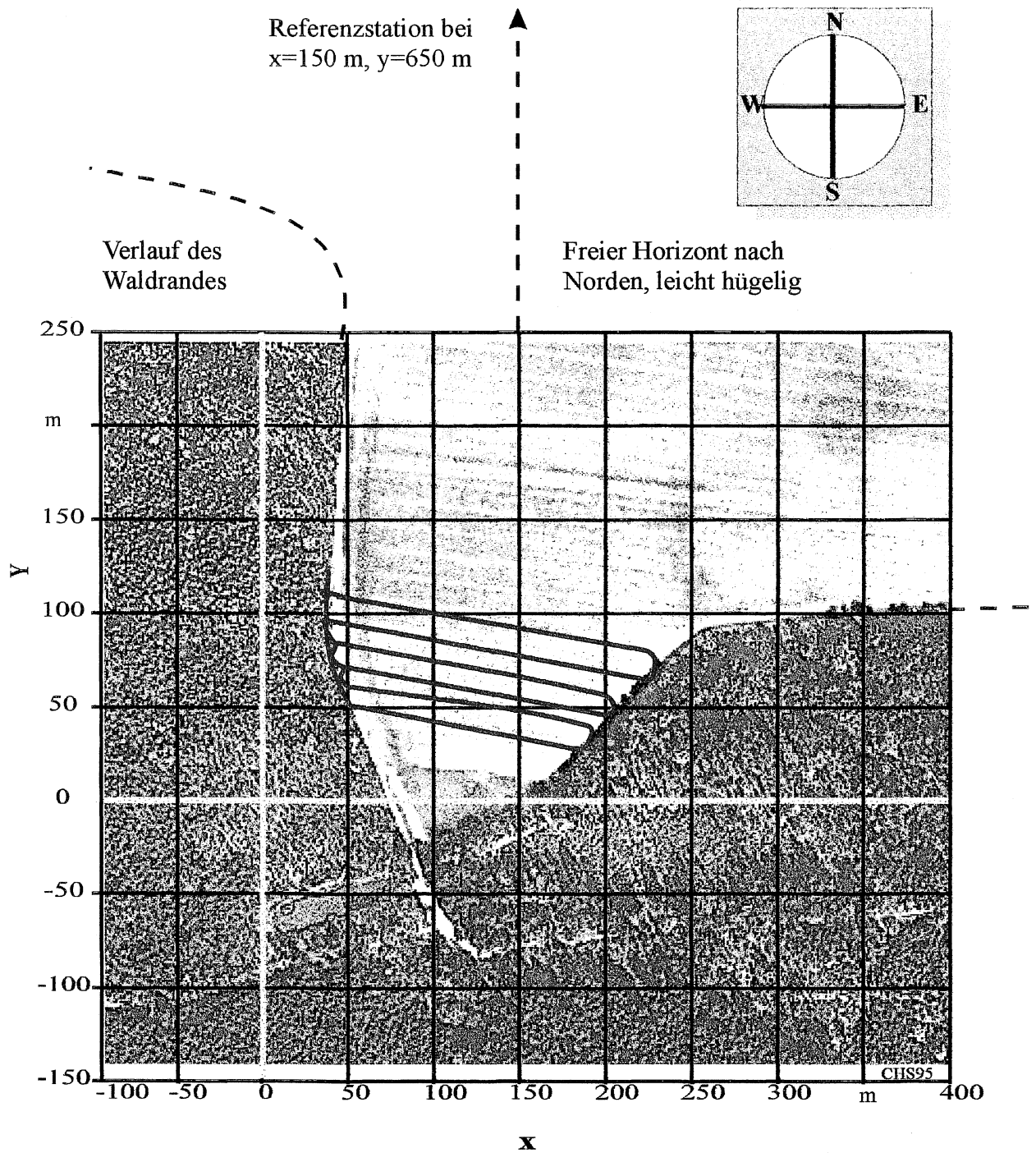
Zu Anfang der Versuche wurden sämtliche GPS-Empfänger neu initialisiert. Dieser Prozeß - auch Aquisition genannt, dauert eine gewisse Zeit (siehe Abschnitt 2.6.3.4: Information von Subframe 5), um die vollständigen Almanachdaten der Satelliten zu empfangen. Dies ist die Voraussetzung dafür, daß die Empfänger die Satelliten verfolgen kön-




nen und schnell auf günstigere Satellitenkonstellationen wechseln können. Hochwertige Empfänger wie der NovAtel 2151 und der Ashtech LM XII nutzen diese Technik. Sie ziehen zur Positionsberechnung nicht automatisch alle verfügbaren Satelliten heran, sondern die am besten geeigneten. Ungünstige Satelliten werden ausmaskiert. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn ein Satellit sehr flach am Horizont steht, oder wenn sich zwei Satelliten fast an der gleichen Position befinden aber genügend andere zur Verfügung stehen.

Der Ashtech-GPS-Empfänger der Referenzstation wurde so eingestellt, daß er sämtliche, für die Realtime-Korrektur erforderlichen Daten über seine Schnittstelle an das Funkmodem ausgibt und gleichzeitig die Korrekturdaten für die Postprocessing-Bearbeitung des mobilen Ashtech in seinem Speicher ablegt. Diese Doppelfunktion wurde kontinuierlich ausgeführt.

Der mobile Ashtech-Empfänger zeichnete ebenfalls während der gesamten Versuchsdauer ständig alle GPS-Rohdaten auf.

Der mobile NovAtel-Empfänger war über seine Schnittstelle mit dem IBM-Notebook verbunden und gleichzeitig über das Funkmodem mit der Referenzstation. Der NovAtel berechnete mit Hilfe der DGPS-Korrekturdaten in Echtzeit die DGPS-Daten und gab diese in verschiedenen Formaten an den Rechner weiter. Mit einem Konvertierungsprogramm der Firma Geokonzept wurden einige Standarddaten schon im Versuch aufbereitet und als Textfiles im Rechenspeicher abgelegt. Von Interesse waren aber auch weitere Daten, die Aufschluß über die Qualität des Signals geben. Hier bietet der NovAtel 2151 den großen Vorteil, daß über die Schnittstelle auf umfangreiche Zusatzdaten zurückgegriffen werden kann. Als Zusatzinformation wurden die beiden Datenstrings \$RNGA und \$POSA in einem Logfile gespeichert. Allerdings liegen die Zusatzinformationen in sehr verschiedenen Formaten vor und sind zudem noch von variabler Länge. Entscheidend für die Wahl dieser Strings sind Datensätze wie die Anzahl der gültigen Kanäle und Satellitennummer. Wichtig ist ferner, daß in diesen Datensätzen die Satellitenzeit integriert ist, damit sich die Meßwerte später den anderen zuordnen lassen.



-  Landwirtschaftliche Nutzfläche
-  Mischwald
-  Fahrspuren

**Abbildung 4.2: Darstellung der geografischen Randbedingungen,
Luftbild vom Versuchsfeld Adelschlag**

Während aller Versuchsdurchgänge konnte am Notebook die gemessene Position mit der Geokonzept-Software in Echtzeit visualisiert werden. Dadurch gelang es, auftretende Fehler, wie ein gelockertes Schnittstellenkabel sofort zu erkennen und zu beheben.

Schon während der Versuche war qualitativ zu erkennen, daß Entfernungen zum Waldrand von etwa 20 m keine größeren Genauigkeitsverluste mit sich bringen, geringere Entfernungen hingegen drastische Positionsversätze haben können. Auffallend war auch, daß der Waldrand sich in diesem Bereich auf zwei völlig unterschiedliche Weisen verhält. Bei stationärem Empfang lieferten beide Empfänger hervorragende Genauigkeiten am Waldrand. Bei dynamischem Betrieb (12 km/h) traten jedoch sehr große Abweichungen plötzlich und sprunghaft auf.

Ferner konnte schon während des Versuchs beobachtet werden, daß sich die drastisch veränderten Witterungsverhältnisse scheinbar nicht auf die Meßergebnisse auswirken. In der Auswertung konnte dies durch ein Übereinanderlegen der einzelnen Durchläufe gezeigt werden.

4.5 Versuchsauswertung / Fahrspuren quer über das Feld

Zuerst wurden die Ortungsdaten des Ashtech LM VII aufbereitet, die im Postprocessing-Verfahren korrigiert wurden. Zunächst sollen die Versuchsdurchläufe 1 bis 3 untersucht werden, die die vordefinierten Spuren quer über das Feld darstellen. Visualisiert werden sollen dabei die gemessenen Positionsabweichungen zur tatsächlichen Spur und die Unabhängigkeit der Witterungseinflüsse.

Die Datensätze liegen als Textfiles vor, die bereits mit TAB und RETURN getrennt sind und sich daher einfach mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 5.0 auswerten lassen.

Die Meßwerte wurden mit einer Taktrate $f_{TAKT} = 0,5$ Hz aufgezeichnet. In der Randzone gibt es einige Zeitsprünge über bis zu drei Intervalle, in denen keine gültigen Datensätze aufgezeichnet werden konnten. Das ist dann der Fall, wenn der DGPS-Empfänger im Randbereich weniger als vier Satelliten empfängt. Hier spielt die Aquisitionszeit eine entscheidende Rolle. Wenn der Empfänger von sechs Satelliten drei verliert und einen neuen erreicht, hätte er zwar im stationären Betrieb vier Satelliten für eine erfolgreiche Positionsbestimmung, im dynamischen Modus kann das neue Signal jedoch erst nach der Aquisitionszeit ausgewertet werden. Diese Eigenschaft hängt stark von der Qualität des Empfängers ab.

Das Format der DGPS-Daten und einen charakteristischen Zeitsprung im Abschattungsbereich zeigt die Tabelle 4.2:

Tabelle 4.2: Format der Textfiles spur1.txt - spur3.txt

x	y	stat	lat	lon	Höhe	DOP	Anz. SV	Zeit	PRG	Kenn
4440544	5411941	2	48.842.083	11.188.708	458	5	4	103636	30	fff
4440547	5411929	2	48.841.976	11.188.754	457	5	4	103638	30	fff
4440550	5411921	2	48.841.908	11.188.794	457	5	4	103640	30	fff
4440555	5411912	2	48.841.824	11.188.869	452	2	5	*103644	30	fff
4440556	5411915	2	48.841.850	11.188.887	452	3	4	103646	30	fff
4440573	5411915	2	48.841.854	11.189.112	456	5	4	103650	30	fff
4440582	5411916	2	48.841.862	11.189.236	460	5	4	103652	30	fff
4440589	5411914	2	usw...							

*) Zeitsprung im Randbereich

Wird den x-y-Koordinaten ein Offsetwert abgezogen, ergibt sich ein lokales Koordinatensystem. Für die Auswertung interessieren zunächst nur die Positionsangaben. Überlagert werden in Abbildung 4.3 die Versuchsdurchgänge 1 bis 3. Gleichzeitig wird die tatsächlich angenommene Fahrspur (grau) eingetragen. Hellgrau schraffiert ist der Verlauf des Waldes. Die x-Koordinate wurde zur besseren Anschauung um etwa 30% gestaucht. Die Himmelsrichtungen entsprechen den allgemeinen Konventionen (Norden: Oben, Westen: Links).

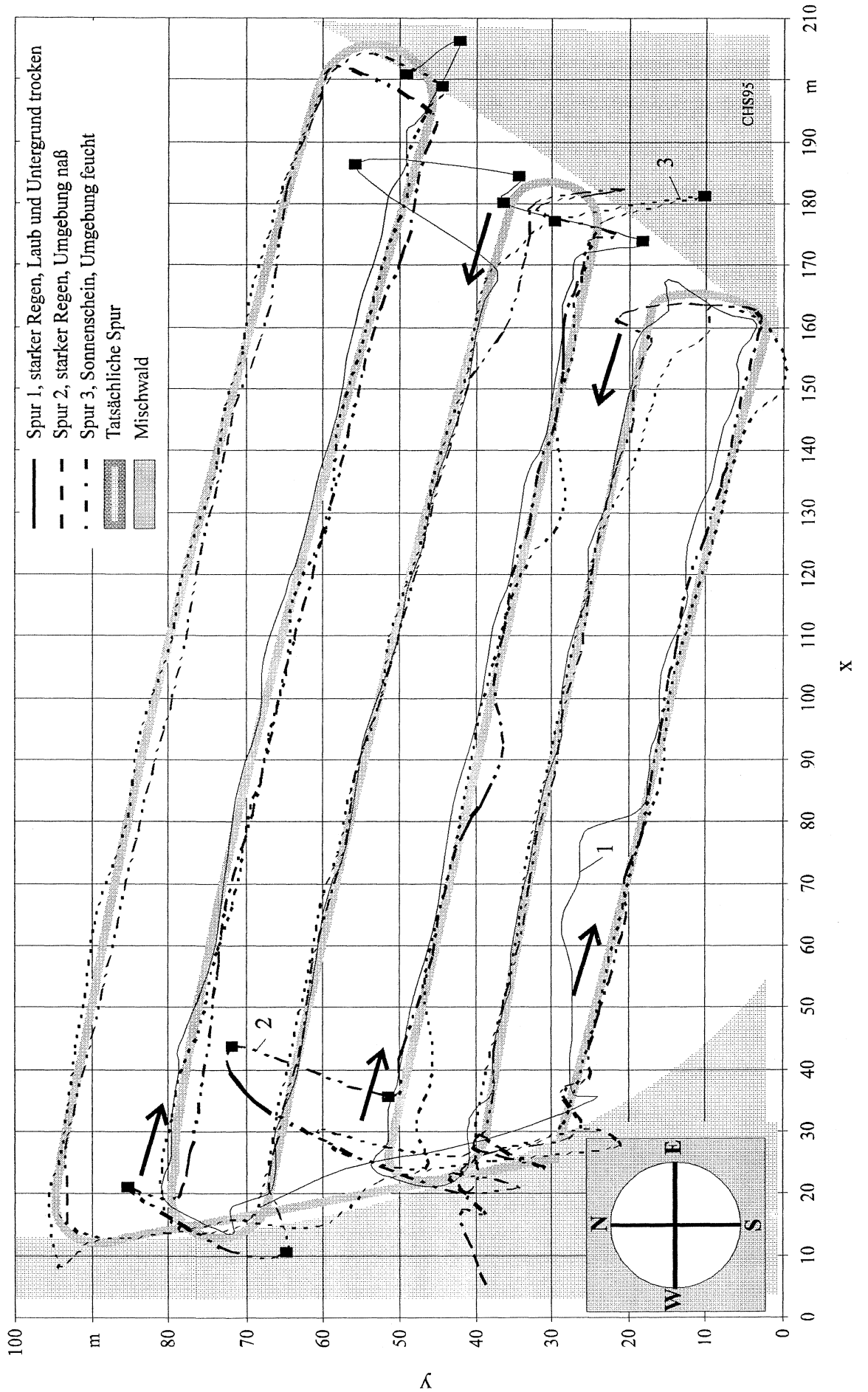


Abbildung 4.3: Abschattungseffekte, Versuch vom 26.10.94 in Adelschlag

Nachdem ein reines Punktediagramm zu unübersichtlich erschien, wurden in Abbildung 4.3 nur besonders interessante Meßwerte hervorgehoben. Die restliche Darstellung ergibt sich aus einer Kurveninterpolation dritten Grades durch die Meßwerte. Ein reiner Polygonzug von Punkt zu Punkt wäre zwar mathematisch gesehen korrekt, weil hier die Abstrakte und somit die Auflösung besser sichtbar wird, interessant sind aber vielmehr die Positionssprünge. Diese würden bei dem Polygonzugverfahren nur als spitze Zacken dargestellt werden und wären in der Grafik nicht deutlich genug sichtbar. Zudem werden bei vielen Softwarelösungen zur Satellitenortung oftmals mehrere Meßwerte gemittelt, um ein signifikanteres Ergebnis zu bekommen. Ausreißer können zwar aufgrund der bekannten Fahrgeschwindigkeit und der letzten gemittelten Positionsangaben erkannt und ausmaskiert werden, weniger starke Abweichungen werden jedoch nicht erkannt und verfälschen in der Praxis die Spur auf ähnliche Weise wie Abbildung 4.3 zeigt.

Gut sichtbar wird in der Grafik, daß alle drei gemessenen Positionsdaten auf der längsten Spur in weiten Bereichen eine sehr hohe Präzision ergeben. Die Abweichungen liegen in der Größenordnung eines Meters. Wird die letzte, dem Wald zugewandte Spur betrachtet, gibt es besonders im nordwestlichen Eck vereinzelte Abweichungen bis zu fünf Metern.

Am Waldrand selbst treten dann sehr große Abweichungen auf. Zu beachten ist aber, daß selbst bei teilweiser Überdeckung durch Baumkronen immer wieder eine plausible Ortung erzielt wurde.

Um zu zeigen, daß die Ausreißer nur vereinzelt, dafür aber äußerst schwerwiegend auftreten, sind in der Grafik einige benachbarte Punkte markiert. Es liegen zwischen diesen hervorgehobenen Punkten keine weiteren Meßwerte. Um einen Vergleich zu haben, können die drei markierten Werte links im Bild betrachtet werden. Die eng beieinander liegenden Punkte sind stellvertretend für den durchschnittlichen Abstand s aller Meßwerte.

$$v \approx 12 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 3,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad f_{\text{TAKT}} = 0,5 \text{ Hz} \Rightarrow t = 2 \text{ s} \quad s = v \cdot t = \underline{6,6 \text{ m}} \quad (4.1)$$

Der nächste Meßpunkt müßte nach der Abschätzung 4.1 noch etwa den gleichen Abstand s haben, da bis zu den Wendepunkten mit der vollen Geschwindigkeit v gefahren wurde. Er liegt aber um das 5,7-fache des zu erwartenden Abstandes entfernt. Dieser Positionsfehler ist auf die Abschätzung durch den Wald zurückzuführen.

Im Bild 4.3 zeigt sich zudem aber noch eine weitere Auffälligkeit. Abschattungseffekte scheinen nicht nur von der Geometrie bestimmt zu sein, sondern auch von den Filteralgorithmen der GPS-Empfänger. Diese reagieren mit unterschiedlichen Aquisitionsequenzen und Nachschwingvorgängen auf Signalabschattung.

Wenn der Spurverlauf betrachtet wird, treten die größten Genauigkeitsverluste beim Entfernen vom Waldrand auf, wenn der Empfänger in den zurückliegenden Sekunden schon ein Empfangsdefizit hatte. Offensichtlich müssen sich die Filter des Empfängers erst wieder einschwingen. Aus diesem Grund ergibt sich beim Schleifenausgang eine hohe Positionsunsicherheit, obwohl die stationären Empfangsbedingungen zu diesem Zeitpunkt schon wieder gestiegen sind.

Beim Annähern an den Waldrand kann die Position wesentlich besser gehalten werden. Die Abbildungen 4.4 und 4.5 „Dynamisches Verhalten des GPS-Empfängers bei Signalabschattung“ verdeutlichen dies.

In Abbildung 4.4 wird die Ostseite der Versuchsfläche gezeigt. Grau aufgezeichnet ist der tatsächliche Spurverlauf. Die gemessenen Positionen und deren zeitlicher Verlauf sind schwarz durchgezogen. Beim Hineinfahren in den Signalschatten zeigt sich ein Ausreißer mit ca 7 m Abweichung. Beim Herausfahren hingegen treten nacheinander zwei Fehlpositionen in der Größenordnung 5 m und 18 m auf.

Die vom NovAtel-Empfänger ausgegebene Anzahl verfügbarer Satelliten ist im Echtzeit-DGPS-Betrieb bei Abschattung nicht realistisch. Zur Beurteilung der Positionszuverlässigkeit ist sie in diesem Einsatzbereich nicht geeignet. Es ist anzunehmen, daß dieser Wert zeitlich verzögert ausgegeben wird oder begrenzt ist. Für spätere Versuche werden deshalb zusätzliche Datenstrings aufgenommen, um diese Annahme zu verifizieren. Begründen läßt sich diese Annahme mit Abbildung 4.5. Beim Annähern sind stets sechs

Satelliten verfügbar. Während der Schleifendurchfahrt variieren die Werte zwischen fünf und sechs. Bei einer Entfernung von 14 m tritt dann aber eine Anzeige von vier Satelliten auf. Auch der nächste Punkt (20 m) zeigt 4 Satelliten an. Selbst in einer Entfernung von 27 m sind laut NovAtel erst fünf Satelliten auswertbar.

Ähnlich verhält es sich mit der Meßgröße DOP-Faktor. Der DOP-Faktor sollte zur Beurteilung der Positionssicherheit ein Kriterium bilden. Hier soll der Parameter jedoch nur qualitativ betrachtet werden. Im ersten Bild läßt sich keine Änderung des Wertes eins erkennen, obwohl der Empfänger sichtliche Probleme im Bereich der Schleife hat. Im zweiten Bild ist der Dop-Faktor wiederum fast überall eins, steigt dann in der Schleife auf vier an, fällt kurz auf eins und zwei, um wiederum beim Verlassen zweimal auf 21 zu steigen. Auch der 27 m-Wert ist noch zwei. Interessant, aber vermutlich gerätespezifisch ist, daß die Zweierfolge (DOP = 21, Anzahl SAT = 4) exakt ein Intervall verzögert zu den Fehlpositionen auftritt.

Alle drei Versuchsdurchgänge bestätigen noch einmal die Feststellung, daß sich extrem unterschiedliche Witterungsverhältnisse nicht wie erwartet, auf diesen Versuch auswirken.

Abschattungseffekte treten besonders stark beim Entfernen vom Waldrand in einer Zone von 15 m auf. Dabei spielt die Dauer der permanenten Empfangsverschlechterung und die Einschwingzeit des Empfängers eine entscheidende Rolle. Beim Annähern an die Signalbarriere Wald kann der NovAtel noch etwa 5 s von den zurückliegenden Daten profitieren. Starke Fehlpositionen treten in diesem Fall in einer 5 m-Zone auf.

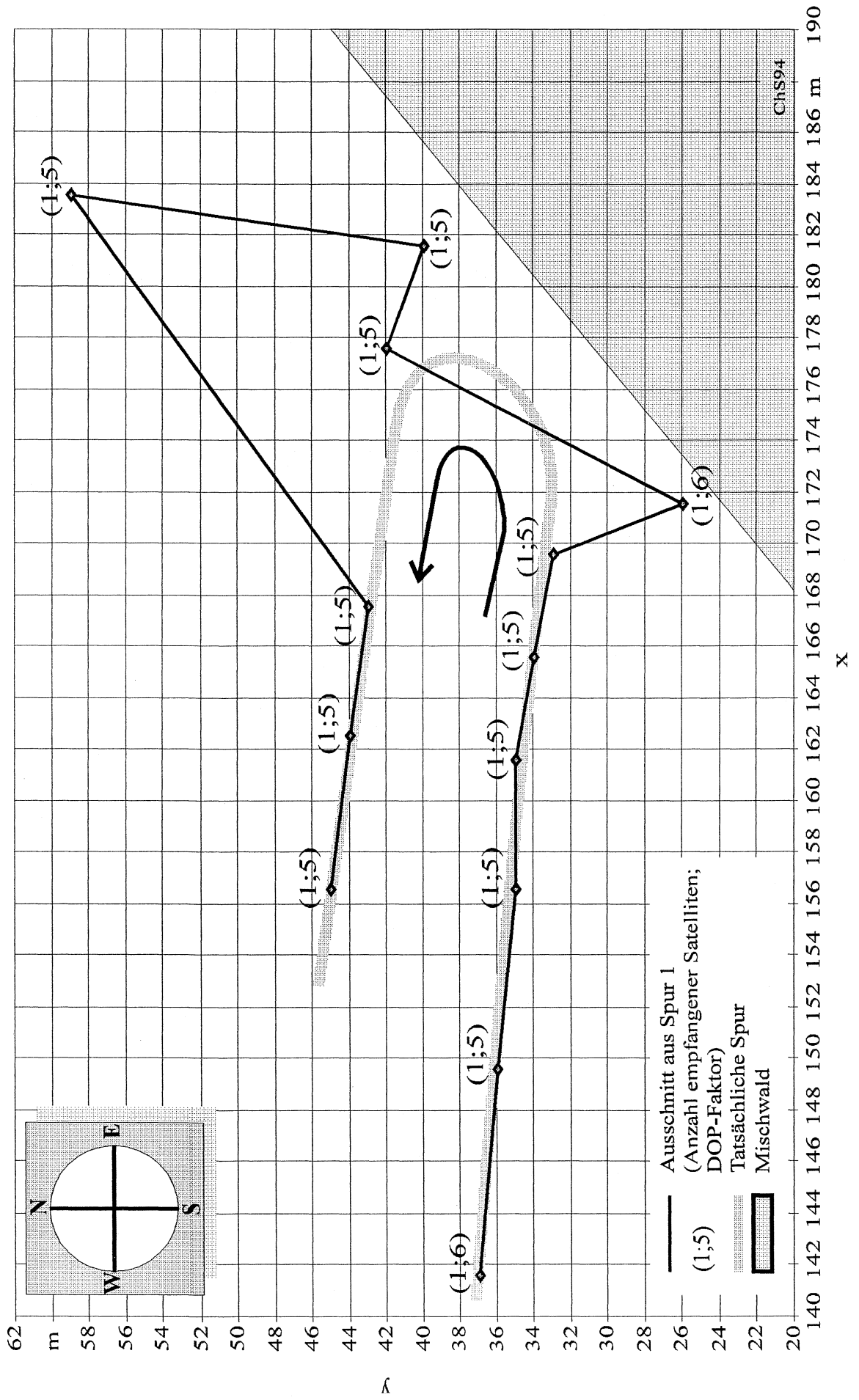


Abbildung 4 4• Dynamisches Verhalten (2) des NovAtel 2151-Empfängers

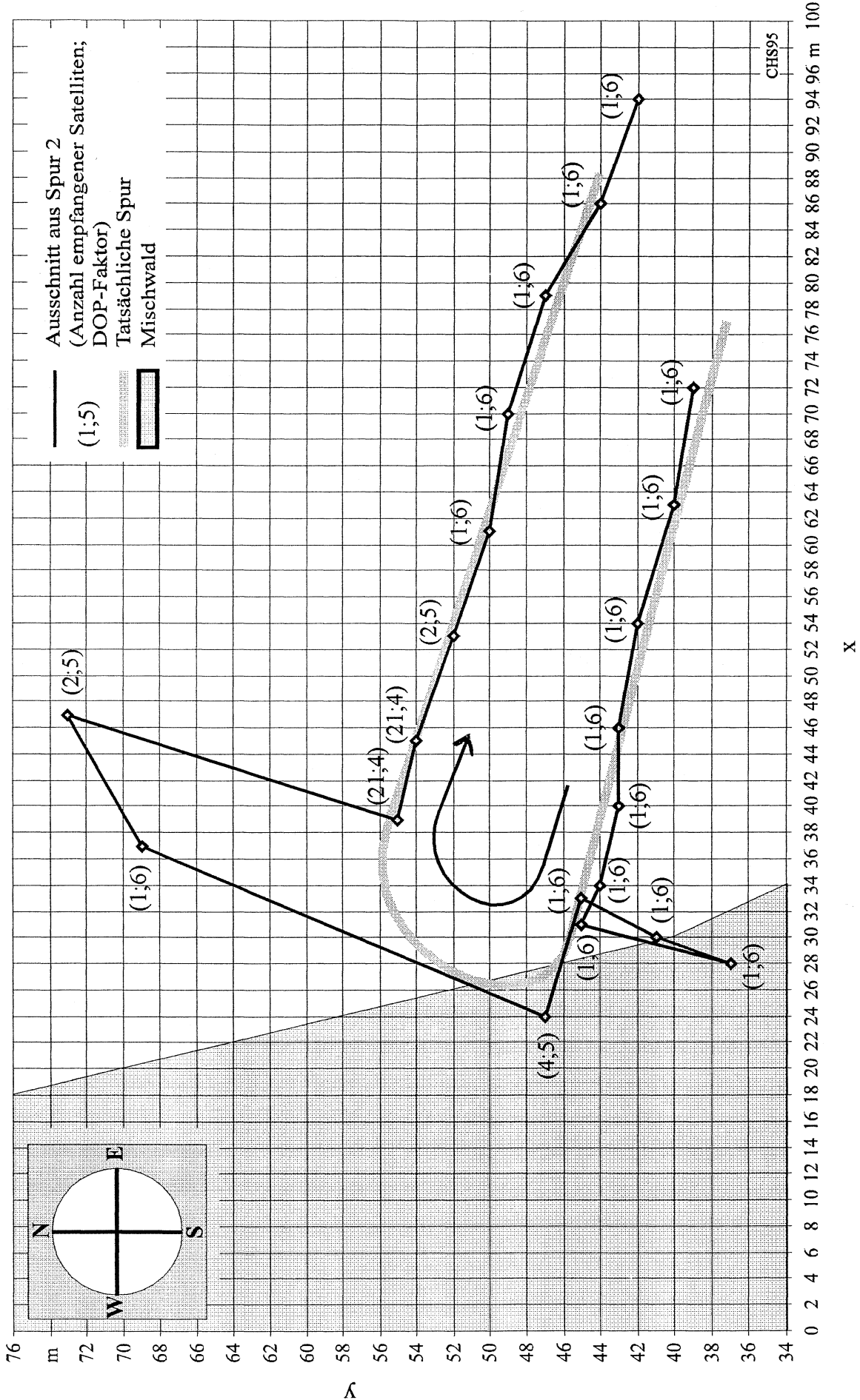


Abbildung 4.5: Dynamisches Verhalten (2) des NovAtel 2151-Empfängers bei Signalabschattung im Realtime-Betrieb

4.6 Versuchsauswertung / Fahrspuren parallel zum Waldrand

Die Daten für die Spuren parallel zum Waldrand stammen aus dem NovAtel 2151 und wurden im Realtime-Betrieb (Echtzeit) DGPS-korrigiert. Aufgezeichnet wurden zwei verschiedene Datenstrings mit den Bezeichnungen \$POSA und \$RNGA. Beide Meßwertketten fallen zu verschiedenen Zeiten und unregelmäßig an. Ihre Längen sind zudem verschieden und variabel. Beide Strings wurden kontinuierlich aufgezeichnet und müssen deshalb sinnvoll getrennt und später einander zugeordnet werden. Ein kurzer Ausschnitt der Rohdaten verdeutlicht dies (Die Formatierung „fett“ ist in den Rohdaten nicht enthalten. Sie wurde hier zur besseren Übersicht gewählt):

4.6.1 Aufgezeichnete Rohdaten

\$RNGA,772,300534.00,5,000000FF,15,21637523.854,0.084,-275771.639,0.025,-
 2876.394,0.451,0.006,60692.828,117.527,114,25,23268853.088,0.075,604042.519,0.019,-
 235.053,0.348,0.002,75908.742,63.123,134,29,20931235.547,0.599,1860343.915,0.039,1808.530,0.705
 ,0.039,3400.266,7.130,154,7,22051741.175,0.624,-877013.460,0.051,-
 389.565,0.925,0.056,5356.998,4.166,164,14,20240468.995,0.668,-811230.734,0.029,-158.134,0.516,-
 0.007,3126.469,6.253,184*0D

\$POSA,772,300534.00,48.84188097,11.18878445,462.340,46.789,61,1.224,1.059,2.336,0*1E

\$POSA,772,300535.00,48.84187599,11.18877503,460.487,46.789,61,1.221,1.052,2.250,0*16

\$RNGA,772,300536.00,5,000000FF,15,21638618.726,0.084,-281525.610,0.023,-
 2877.580,0.411,0.014,60926.289,119.527,114,25,23268943.032,0.072,603570.507,0.018,-
 236.838,0.317,0.011,82014.422,65.123,134,29,20930548.960,0.658,1863960.065,0.039,1808.038,0.694
 ,-0.026,2218.236,9.130,154,7,22051888.278,0.562,-877793.107,0.047,-390.325,0.850,-
 0.014,4469.926,6.166,164,14,20240531.184,0.439,-811548.512,0.028,-
 159.670,0.500,0.026,5456.403,8.253,184*28

\$POSA,772,300536.00,48.84187795,11.18877219,457.577,46.789,61,1.171,1.041,2.049,0*13

\$POSA,772,300537.00,48.84187634,11.18876704,455.075,46.789,61,1.123,1.027,1.994,0*18

Das User-Manual GPSCard OEM, Performance Series [7] erklärt die einzelnen Datenpunkte wie folgt:

Tabelle 4.3: POSA - Computed Position

Structure	Description	Example
\$POSA		\$POSA
week	GPS week number	637
seconds	GPS seconds into the week	511251.00
lat	Latitude of position in current datum, in degrees. A negative sign implies South latitude	51.11161847
lon	Longitude of position in current datum, in degrees. A negative sign implies West longitude.	-114.03922149
hgt	Height of position in current datum, in meters with respect to mean sealevel (MSL)	1072.436
undulation	Geoid undulation, in meters, where ellipsoid height (h) is derived from the expression $h=H+N$. H is the MSL height. N is the undulation.	-16.198
datum	Current datum	61
lat_std	Standard deviation of latitude solution element, in meters	26.636
long_std	Standard deviation of longitude solution element, in meters	6.758
hgt_std	Standard deviation of height solution element, in meters	78.459
sol_status	Solution status	0
*XX[CR][LF]	Checksum digits and the line termination characters	*12[CR][LF]

Tabelle 4.4: RNGA - Channel Range Measurements

Structure	Description	Example
\$RNGA		\$RNGA
week	GPS week number	663
seconds	GPS seconds into the week	247893.30
num_chans	Number of valid channels with information to follow	7
rec_stautus	Receiver self-test status	000040F6
svprn	Satellite PRN number (1-32)	3
psr	Pseudorange measurement, in meters	20297138.869
psr_std	Estimated code tracking standard deviation, in meters	0.068
adr	Accumulated carrier phase standard deviation, in cycles	25673103.500
adr_std	Estimated carrier phase standard deviation, in cycles	0.003
dop	Instantaneous Doppler rate, in Hz	-1487.229
dop_std	Estimated Doppler frequency standard deviation, in Hz	0.051
dacc	Instantaneous Doppler rate, in Hz per second	-0.005
s/no	Signal to noise ratio	47003.184
locktime	Number of seconds of continuous tracking (no cycle slipping)	14619.613
cstatus	status flags	114
...		
...	Next PRN	
...		
*XX[CR][LF]		

4.6.2 Datenaufbereitung

Mit Hilfe des C-Programms `datei.cpp` (siehe Anhang) wird der Datenstrom in \$POSA und \$RNGA-Anteile aufgespalten und anschließend mit der C-Routine `trennfor.cpp` Trennzeichen und Dezimalpunkt konvertiert. Dies ermöglicht den Datenimport in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Beide Teile stellen sich dann folgendermaßen dar:

• Positionsanteil

1	POSA	772	300534,00	48,84188097	11,18878445	462,340	46,789	61
			1,224	1,059	2,336	0*1E		
2	POSA	772	300535,00	48,84187599	11,18877503	460,487	46,789	61
			1,221	1,052	2,250	0*16		
3	POSA	772	300536,00	48,84187795	11,18877219	457,577	46,789	61
			1,171	1,041	2,049	0*13		
4	POSA	772	300537,00	48,84187634	11,18876704	455,075	46,789	61
			1,123	1,027	1,994	0*18	...	

• Zusatzdaten

1	RNGA	772	300534,00	5	000000FF	15	21637523,854	0,084
			-275771,639	0,025	-2876,394	0,451	0,006	60692,828
			117,527	114				
	25		23268853,088	0,075	604042,519	0,019	-235,053	0,348
			0,002					
			75908,742	63,123	134	29	20931235,547	0,599
			1860343,915	0,039				
			1808,530	0,705	0,039	3400,266	7,130	154
			7					22051741,175
			0,624	-877013,460	0,051	-389,565	0,925	0,056
			5356,998	4,166				
	164	14	20240468,995	0,668	-811230,734	0,029	-158,134	0,516
			-0,007	3126,469	6,253	184*0D		
2	RNGA	772	300536,00	5	000000FF	15	21638618,726	0,084
			-281525,610	0,023	-2877,580	0,411	0,014	60926,289
			119,527	114				
	25		23268943,032	0,072	603570,507	0,018	-236,838	0,317
			0,011					
			82014,422	65,123	134	29	20930548,960	0,658
			1863960,065	0,039				
			1808,038	0,694	-0,026	2218,236	9,130	154
			7					22051888,278
			0,562	-877793,107	0,047	-390,325	0,850	-0,014
			4469,926	6,166				
	164	14	20240531,184	0,439	-811548,512	0,028	-159,670	0,500
			0,026	5456,403	8,253	184*28	...	

Beide Anteile zusammen haben in diesem Vorversuch etwa 244 KB. Für die Fahrspuren parallel zum Waldrand werden am Anfang nur die POSA-Strings betrachtet. Diese Vektoren enthalten im Wesentlichen die Positionsangaben in geografischer Länge und Breite. Um diese Parameter in einem kartesischen lokalen Koordinatensystem darstellen zu können wurde zur Umrechnung eine, von Willi Kahl [9] vorgeschlagene Näherung verwendet.

Das World Geographic System 1984 stellt die Erde als Ellipsoid dar.

Tabelle 4.5: Darstellung der Erde als Ellipsoid im WGS 84

Radius	R= 6378,388 km	r = 6356,912 km
Durchmesser	D= 12756,776 km	d= 12713,824 km
Umfang	U= 40076,594 km	u= 39941,656 km

Als brauchbare Näherung für die Auswertung in allen folgenden Kapiteln kann die Erde aber auch als Kugel dargestellt werden.

Dabei gelten nach Kahl [9] folgende Größen:

Tabelle 4.6: Darstellung der Erde als Kugel

Radius	R= 6367 km
Durchmesser	D= 12733 km
Umfang U	U= 40003 km

Die Längen- und Breitengrade am Versuchsort Adelschlag zeigt Tabelle 4.7:

Tabelle 4.7: Position des Versuchsfeldes in Adelschlag

Breite b, Adelschlag	48,50°
Länge l, Adelschlag	11,05°

- **Die geographische Breite**

Die Breitenkreise verlaufen parallel zum Äquator. Von hier ausgehend werden die Breitenkreise nach Norden und Süden immer kleiner. Die Breitenkreise an den Polen sind Punkte. Bezugskreis ist der Äquator mit 0° . Bis zum Nordpol werden 90° nördliche Breite aufgespannt, bis zum Südpol 90° südliche Breite.

Abstand db zweier Breitenkreise (Näherung nach Tabelle 4.6):

$$db = \frac{U}{360^\circ} = \frac{40003 \text{ km}}{360^\circ} = \underline{\underline{111,119 \text{ km}}} \quad (4.2)$$

- **Die Abweitung**

Je näher ein Breitenkreis an den Pol rückt, um so kleiner wird er. Am Äquator entspricht 1° geographische Länge etwa 111,119 km, am Pol dagegen 0 km.

Diese Distanzänderung wird allgemein als Abweitung bezeichnet.

Distanz dl für 1° geographische Länge:

$$dl = \frac{U}{360^\circ} \cos b \quad (4.3)$$

Für den Versuch gilt deshalb als Näherung:

$$dl = \frac{40003 \text{ km}}{360^\circ} \cos(48,50^\circ) = \frac{40003 \text{ km}}{360^\circ} \cdot 0,66 = \underline{\underline{73,63 \text{ km}}} \quad (4.4)$$

Umrechnung in ein lokales kartesisches Koordinatensystem

Die Umrechnung von Länge und Breite in ein lokales kartesisches Koordinatensystem erfolgt durch die Transformation:

$$\begin{aligned}x[\text{m}] &= (l - \text{loffset})dl \cdot 1000 \\y[\text{m}] &= (b - \text{boffset})db \cdot 1000\end{aligned}\tag{4.5}$$

Sowohl die Länge l , als auch die Breite b werden in Formel 4.5 mit einem Offset beaufschlagt, um die Spuren besser darstellen zu können:

$$\begin{aligned}\text{loffset} &= 11,1885 \\ \text{boffset} &= 48,842\end{aligned}\tag{4.6}$$

4.6.3 Abschattungseffekte am Waldrand

Mit den aufbereiteten Daten und deren Transformation in ein lokales kartesisches Koordinatensystem konnten die Abschattungseffekte in Abbildung 4.6 visualisiert werden.

Das hier verwendete Bezugssystem ist nicht identisch mit dem der Abbildungen 4.3-4.5. Dies ist aber für die Auswertung unerheblich. Die Waldrandlinie wurde auch in der Abbildung 4.6 gesondert dargestellt.

In weiten Bereichen konnte ein definierter Abstand zum Waldrand eingehalten werden. Die Fahrspuren parallel zum Rand waren 0 m, 5 m, 10...15 m und 15...25 m.

In Abbildung 4.6 läßt sich tendenziell eine Abhängigkeit der Positioniergenauigkeit zum Abstand des Waldes erkennen. Die Fahrspur direkt am Waldrand weist erhebliche Ausreißer vor allem im linken, oberen Bereich auf. Zurückzuführen ist das vermutlich auf die augenblickliche Satellitenkonfiguration.

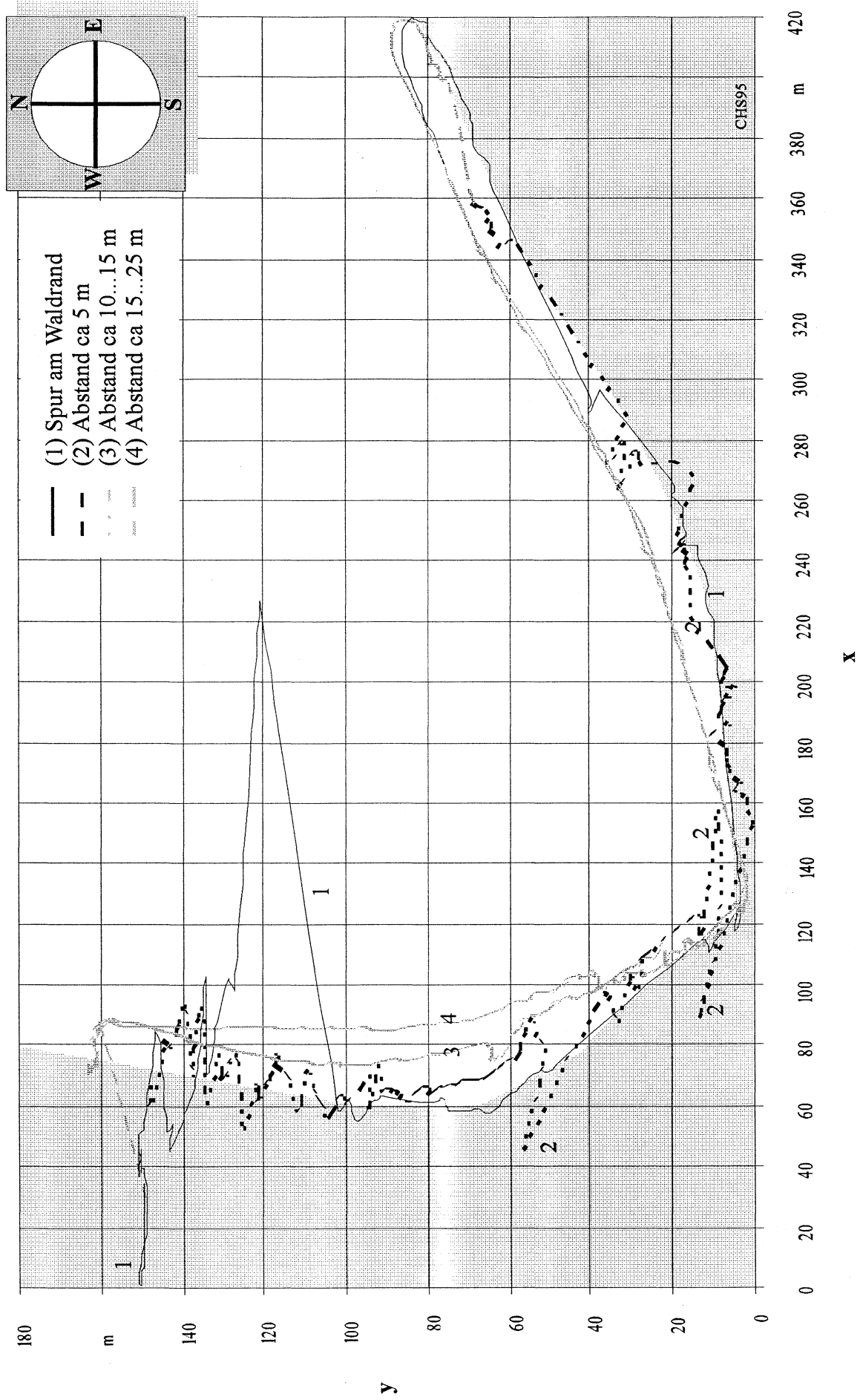


Abbildung 4.6: Abschattungseffekte am Waldrand

Besser definieren lassen sich die zu erwartenden Abweichungen bei einer Distanz von etwa 5 m. Die extremeren Positionsfehler haben dabei eine durchschnittliche Abweichung von 20 m.

Im Abstand von etwa 10-15 m kann die Position dagegen präzise und mit einer hohen Signifikanz bestimmt werden. Vereinzelt Fehlpositionen lagen immerhin ständig im 8 m-Bereich.

Die Linie mit einem Versatz von 15-25 m weist nur noch die statistischen Ausreißer auf. Fehlpositionen aufgrund der Abschattung sind hier nicht mehr zu erwarten. Die Spitze links oben im Bild ist keine Fehlposition sondern deutet den Übergang zur äußersten Fahrspur an.

5 Versuch mit Referenzsystem

5.1 Versuchsaufbau

Am 25.11.94 wurde in Adelschlag der Hauptversuch gefahren. Dazu wurde ein Mercedes-Unimog mit den notwendigen Meßgeräten als Mobilstation aufgerüstet (Abbildung 5.1). Die DGPS-Daten wurden wie in Kapitel 4 mit einem NovAtel 2151-Empfänger aufgezeichnet. Als Speichermedium diente wiederum ein PC, der ebenfalls an Board installiert wurde. Um den Versuchsablauf zu kontrollieren, wurde der DGPS-Kurs auch in Echtzeit im Cockpit visualisiert.

Die DGPS-Korrekturdaten stammen aus einem zweiten NovAtel 2151-Empfänger, der als Teil der Referenzstation etwa 600 m nördlich der Versuchsfläche positioniert war. Die Telemetrie entspricht der aus Abschnitt 4.

Zusätzlich zu dem DGPS-Ortungsverfahren wurden im Unimog weitere Kursdaten aufgezeichnet. Dies waren insbesondere Kursdaten zweier Magnetkompaßsysteme und Impulsrate zweier Radsensoren. Die Radsensoren waren, wie Abbildung 5.1 zeigt, an den beiden hinteren Rädern angebracht und lieferten für eine Umdrehung eine bestimmte Impulsrate. Dabei konnte mit den Radsensoren Vorwärts- und Rückwärtsbetrieb unterschieden werden.

Eine Reihe weiterer Versuchsaufbauten wie verschiedene Trägheitsplattformen der Firmen LITEF GmbH, IGI und eine Lasertriangulation der Deutschen Flugsicherung DFS GmbH diente einem Systemvergleich, der in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wird.

Abbildung 5.1 zeigt, daß alle GPS-Antennen, sowie die Kompaßsysteme in der Fahrzeugmitte angebracht wurden. Die GPS-Antennen für diese Auswertung waren beide mit Absorbern bestückt, um Multipatheffekte zu minimieren. Abbildung 5.1 demonstriert einen spiralförmigen Absorber mit ca 30 cm Durchmesser und ca 5 cm Stegtiefe.

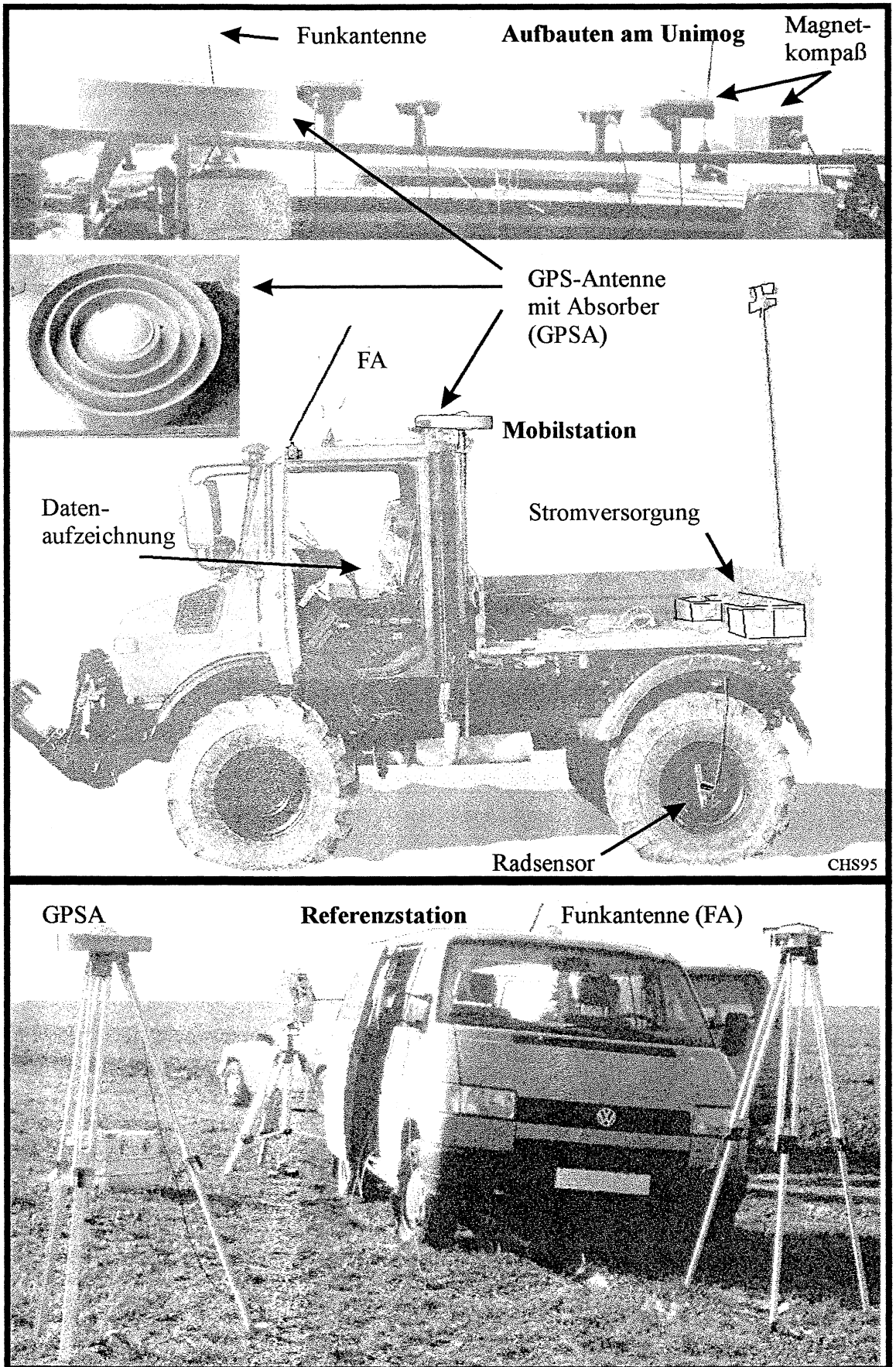


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau in Adelschlag vom 25.11.1994

5.2 Datenaufbereitung

Die Daten zur Koppelrechnung liegen in Form verschiedener Strings vor, die chronologisch aufgezeichnet wurden. Bevor die Daten ausgewertet werden konnten, war es erforderlich, sie in einer einheitlicheren Form darzustellen.

Aufgezeichnet wurden im Versuch folgende Daten:

- GPS-Daten, realtime differential corrected, NovAtel 2105
- Kurswinkel zweier Magnetkompaßsysteme (Bezeichnung KVH: Firmenname)
- Radimpulse aus zwei Radsensoren
- Winkel um die Fahrzeugachsen

Zunächst soll ein Ausschnitt aus den ursprünglichen Meßdaten eines Durchgangs in der Größe 899 MB gezeigt werden:

5.2.1 Ausschnitt aus den Rohdaten

```

Kompass_ fehlt!L,107,R,106,%-28,-3,2303
$237.6,D,OK*6EL,118,R,114,%-28,-3,2302
Kompass_ fehlt!L,138,R,136,%-29,-1,2302
$237.6,D,OK*6EL,173,R,170,%-29,0,2300
Kompass_ fehlt!L,181,R,178,%-30,1,2299
$233.3,D,OK*6FL,204,R,200,%-30,3,2299
Com1>Com1>Com1>Com1>$GPGGA,113149.50,4850.6262675,N,01111.3181290,E,1,06,1.6,430.259,
M,46.790,M,0.0,0000*41
Kompass_ fehlt!L,222,R,219,%-31,4,2298
$228.1,D,OK*67L,251,R,249,%-31,5,2296
Com1>$GPVTG,212.746,T,212.746,M,1.6738607,N,3.099990,K*77
$GPGGA,113150.00,4850.6260924,N,01111.3178630,E,1,06,1.6,430.283,M,46.790,M,0.0,0000*4A
Kompass_ fehlt!L,273,R,273,%-32,5,2296
Kompass_ fehlt!L,284,R,285,%-31,6,2296
Kompass_ fehlt!L,323,R,326,%-31,6,2295

```

Der erste Schritt zur Auswertung war wiederum Datenaufbereitung. Alle Datensätze sollten zeilenweise vorliegen. Dies ist in der Ursprungsdatei nicht der Fall. Die Kompaßdaten sind zwar zwischen den einzelnen GPS-Datensätzen zeilenweise vorhanden (RETURN-getrennt), wurden aber zu den Zeitpunkten, an denen gleichzeitig andere Daten anfielen, ohne Trennzeichen als Strings hinten angehängt.

Da die einzelnen Datenstrings jeweils eine definierte Struktur aufweisen, kann mit Hilfe eines kurzen Hilfsprogrammes (trennfor.cpp) der Beginn eines neuen Datensatzes gefunden werden. Danach wird entschieden, ob die Sätze bereits getrennt sind, oder noch zu trennen sind.

Anschließend werden die Datenpunkte der einzelnen Strings auf eine einheitliche und gut weiterzuverarbeitende Form gebracht. Ziel ist es, die Datenpunkte durch ein Tabulatorzeichen zu trennen, und die verschiedenen Daten durch Codenummern zu spezifizieren. Dies geschieht durch eine weitere Hilfsroutine.

Ferner ist es erforderlich, die Daten auf Kontinuität zu überprüfen und einen geeigneten Ausschnitt zu wählen. Geräteabhängige Ausgabestrings wie zB: COM1> sollen erkannt und entfernt werden, solange sie sich nicht auf Fehler in der Meßwertkontinuität beziehen. Die Ursprungsdatei wird zur weiteren Auswertung als Text-File gem. Abschnitt 5.4 dargestellt.

5.2.2 Format der aufbereiteten Datensätze

Das folgende Listing zeigt das Format der aufbereiteten Datensätze:

```

2      $GPGGA      113150.50      4850.6066533  N      01111.3442546  E      2
      06      1.6      509.456 M      46.789  M      10.3      1002*70
4      $NoK!! 0      NO*00L      542      R      580      %-29  2      2288
3      $234.2  D      OK*69L      565      R      607      %-30  2      2286
4      $NoK!! 0      NO*00L      590      R      632      %-30  2      2286
3      $231.1  D      OK*6FL      609      R      654      %-30  2      2284
4      $NoK!! 0      NO*00L      626      R      676      %-30  3      2283
4      $NoK!! 0      NO*00L      645      R      694      %-30  3      2283

```

4	\$NoK!! 0	NO*00L	665	R	715	%-30	3	2283
3	\$222.6 D	OK*6AL	702	R	759	%-29	3	2281
4	\$NoK!! 0	NO*00L	707	R	765	%-29	2	2280
4	\$NoK!! 0	NO*00L	731	R	788	%-28	2	2281
3	\$227.6 D	OK*6FL	752	R	809	%-28	1	2279
4	\$NoK!! 0	NO*00L	774	R	836	%-28	1	2280
4	\$NoK!! 0	NO*00L	813	R	873	%-29	-1	2279
4	\$NoK!! 0	NO*00L	819	R	884	%-29	-2	2279
4	\$NoK!! 0	NO*00L	848	R	915	%-29	-3	2279
4	\$NoK!! 0	NO*00L	864	R	929	%-31	-3	2279
3	\$229.3 D	OK*64L	884	R	954	%-32	-4	2279
4	\$NoK!! 0	NO*00L	898	R	966	%-34	-5	2279
3	\$226.6 D	OK*6EL	929	R	1003	%-34	-5	2278
1	\$GPVTG	223.823 T	223.823 M		2.1180320		N	3.922595
		K*76						
2	\$GPGGA	113151.50	4850.6073892	N	01111.3434788	E		2
	06 1.6	508.853 M	46.789 M		7.1	1002*4E		

Ein Vergleich in Tabelle 5.1 zwischen den Rohdaten und den aufbereiteten Daten läßt die Umstrukturierung erkennen:

Tabelle 5.1: Statistik zur Datenpunkt-Darstellung

Statistik	Ursprungsdatei	Modifizierte Datei
Anzahl der Wörter:	157105	171144
Anzahl der Zeichen:	876139	653057
Anzahl der Datensätze:	17103	17610

• **Referenzdaten, Strings \$3 und \$4**

Am häufigsten fallen die Datensätze an, in denen der KVH-Kompaß und die Daten der Radsensorik stehen. Dies geschieht überwiegend mit einer Taktrate von 10 Hz.

Mit einer Taktrate von 5 Hz kommt der Magnetkompaß an. Beide Strings haben ein ähnliches Format. Wenn der Magnetkompaß zur Verfügung steht, wird der Datensatz mit 3 nummeriert, sonst mit 4:

```
3    $234.2 D    OK*69L    565    R    607    %-30    2    2286
4    $NoK!! 0    NO*00L    590    R    632    %-30    2    2286
```

Tabelle 5.2: Struktur der GPS-unabhängigen Ortungsdaten

Struktur	Beschreibung	Beispiel
strnr	String Nummer 3 (Magnetkompaß verfügbar) oder 4 (Magnetkompaß nicht verfügbar)	3 bzw 4
mkstring	Kurswinkel Magnetkompaß in Grad gegenüber Nord Taktrate 5 Hz. (Nicht verfügbar ca jedes 2. Inter- vall)	\$234.2 bzw \$NoK!!
X	Flag	D
XX*XXL	Flag und Anzeige Radimpulse links	OK*69L
sumlinks	Summe der Radimpulse links, fortlaufend	565
X	Anzeige Radimpulse rechts	R
sumrechts	Summe der Radimpulse rechts, fortlaufend	607
%XXX	Pitch, Winkel um Fahrzeugquerachse	%-30
XX	Rollwinkel um Fahrzeuglängsachse	2
kvhwinkel	KVH-Magnetkompaßwinkel in $1/10^\circ$	2286
[LF]	Newline (ASCII: 0x0A)	\n

Das Hauptintervall wird von den, mit ca 1 Hz anfallenden DGPS-Daten gebildet. Dieser Rahmen bildet eine geeignete Grundlage für die statistische und grafische Aufbereitung. Die höherfrequenten Datensätze werden innerhalb dieses Hauptintervalles durch Summen- und Mittelwertbildung aufgearbeitet.

Die DGPS-Daten werden in zwei verschiedenen Strings ausgewertet, die stets in der Reihenfolge \$GPVTG (\$1) und \$GPGGA (\$2) anfallen.

• GPVTG- Track and Ground Speed

Die Datenstruktur \$GPVTG enthält in erster Linie Vergleichsdaten, die für eine Skalierung des Sensorsystems notwendig sind. Die Originalstruktur des NovAtel-Empfängers wurde dabei wie oben modifiziert. In der Spalte Struktur stehen für benutzte Daten nicht die Herstellerangaben (User Manual NovAtel, 2100 Series), sondern die im C-Programm `kopp_nav.cpp` (Anhang) verwendeten Bezeichnungen. Unbenutzte Datenpunkte werden in diesem Programm mit einem, als Einlesepuffer dimensionierten Array mit dem Namen `buf` abgefangen. Der Bezeichner für den \$GPVTG ist 1:

```
1 $GPVTG 223.823 T 223.823 M 2.1180320 N 3.922595
K*76
```

Tabelle 5.3: Struktur des GPVTG-Strings

Struktur	Beschreibung	Beispiel
strnr	Stringnummer	1
\$GPVTG		\$GPVTG
gpswinkel	DGPS-Winkel gegen N [Grad]	24.168
T	True track indicator	T
Track_mag	Track degrees magnetic	24.168
M	Magnetic track indicator	M
speed_Kn	speed [knots]	0.4220347
N	Nautical speed indicator	N
gpsv	DGPS Geschwindigkeit [km/h]	0.781608
K	km/h speed indicator	K
*XX[LF]	[CR] nicht mehr enthalten	*7A\n

• **GPGGA - Global Positioning System Fix Data**

Die Datensätze \$GPGGA mit der Stringnummer 2 enthalten die, für die Positionierung notwendigen DGPS-Werte. Sie werden grundsätzlich für alle Berechnungen herangezogen, da sie neben den Koordinaten auch die UTC-Zeit enthalten. Dadurch kann über die Bestimmung der Dauer eines Hauptintervalls auch die Geschwindigkeit des Referenzsystems verifiziert werden.

```
2    $GPGGA    113150.50    4850.6066533    N    01111.3442546    E    2
      06    1.6    509.456    M    46.789    M    10.3    1002*70
```

Tabelle 5.4: Struktur des GPGGA-Strings

Struktur	Beschreibung	Beispiel
strnr	Stringnummer	1
zeit	UTC of position, Systemzeit [hhmmss.ss]	220147.50
lat	Latitude - N/S	5106.7194489
lat_dir	Latitude direction	N
lon	Longitude - E/W	11402.3589020
lon_dir	Longitude direction	W
GPS_qual	GPS Quality indicator, flag 0...2, 2=DGPS	2
sat	Anzahl der augenblicklich ausgewerteten Satelliten 00...12,	08
hdop	HDOP-Faktor Horizontal dilution of precision	0.9
ant_alt	Antenna altitude above/ below mean-sea-level (geoid)	1080.406
unt_ant_alt	Units of antenna altitude, meters	M
geo_sep	Geoidal separation	-16.198
unt_geo_sep	Units of antenna altitude, meters	M
corr	Alter der letzten gültigen DGPS-Korrektur	0.0
dif_ref_stn_jd	Differential reference station ID, 0000-1023	0000
*XX[LF]	[CR] nicht mehr enthalten	*37\n

5.3 Koordinatentransformation

In den Prozeduren `xconvert` und `yconvert` des Programmes `kopp_nav.cpp` werden die Längen- und Breitenangaben in ein lokales kartesisches Koordinatensystem transformiert (x_{dgps} , y_{dgps}). Dieses KS ist aufgrund unterschiedlicher Offsetwerte nicht mit denen der Vorversuche identisch. Es wird jedoch mit den Parametern aus Tabelle 4.6 gerechnet.

Längen und Breiten liegen in dem Format GGMM.M (GradMinuten.Minuten dezimal) vor. Durch geeignete Offsetwerte *loffset* bzw. *boffset* wird garantiert, daß der Vorkommateil zu Null wird. Hierdurch entfällt eine Umrechnung vom HMS-Format (hours, minutes, secons) in ein fortlaufendes Dezimalformat. Die kartesischen Koordinaten entstehen durch die Zuordnung

$$x_{dgps} = (laenge - loffset) \cdot mprominl + x_{fein} \quad (5.1)$$

mit Formel 4.4 und:

$$mprominl = \frac{dl}{60} = \frac{40003 \cdot 10^3 \text{ m}}{60 \cdot 360^\circ} \cos(48,50^\circ) \quad (5.2)$$

Ebenso gilt für die zweite Koordinate:

$$y_{dgps} = (breite - boffset) \cdot mprominb + y_{fein}, \quad (5.2)$$

wobei der Parameter für die Distanz zweier Breitenkreise hier

$$mprominb = \frac{db}{60} = \frac{40003 \cdot 10^3 \text{ m}}{60 \cdot 360^\circ} \text{ beträgt.} \quad (5.3)$$

Die Variable `mpromin` (im Programm ohne Zusatz *l*, *b*) gibt hier an, wieviel Meter einer Winkelminute entsprechen.

Die Distanz, die einem Grad geografischer Länge/ Breite entspricht, ist mit dl/ db bezeichnet. Für die grafische Auswertung wird noch ein weiterer Offsetwert (x_{fein} , y_{fein}) zur Feinabstimmung eingeführt. Alle Berechnungen ab hier stützen sich auf diese Werte:

Tabelle 5.5: Parameter der Koordinatentransformation

Variable	Länge in x	Breite in y
<i>loffset</i>	1111,34 [Grad]	-
<i>mprominl</i>	1227,1660 [m/Grad]	-
<i>xfein</i>	36,0 [m]	-
<i>boffset</i>	-	4850,60 [Grad]
<i>mprominb</i>	-	1851,9833 [m/Grad]
<i>yfein</i>	-	177,0 [m]

5.4 Auswertung des DGPS-Kurses

Aus den Meßdaten wurde mit dem Programm `kopp_nav.cpp` ein Ausschnitt mit 812 Datensätzen bestehend aus GPGGA-Strings \$2 in einem Fenster mit 10000 Datensätzen gewählt. Der zeitliche Rahmen beträgt 550 Sekunden.

Die Abbildung 5.2 „DGPS-Kurs, Versuch vom 25.11.94 in Adelschlag“ zeigt DGPS als unabhängiges Ortungsverfahren. Im Waldrandbereich treten Fehlpositionen mit einer durchschnittlich zu erwartenden Größe von 8 m auf, während die Spur im Feld nur vereinzelt statistische Fehler aufweist. Diese liegen häufig in der tolerierbaren Größenordnung von 2 m. Einzelne Ausreißer sind zu beobachten, liegen aber immer noch unter 5 m Abweichung.

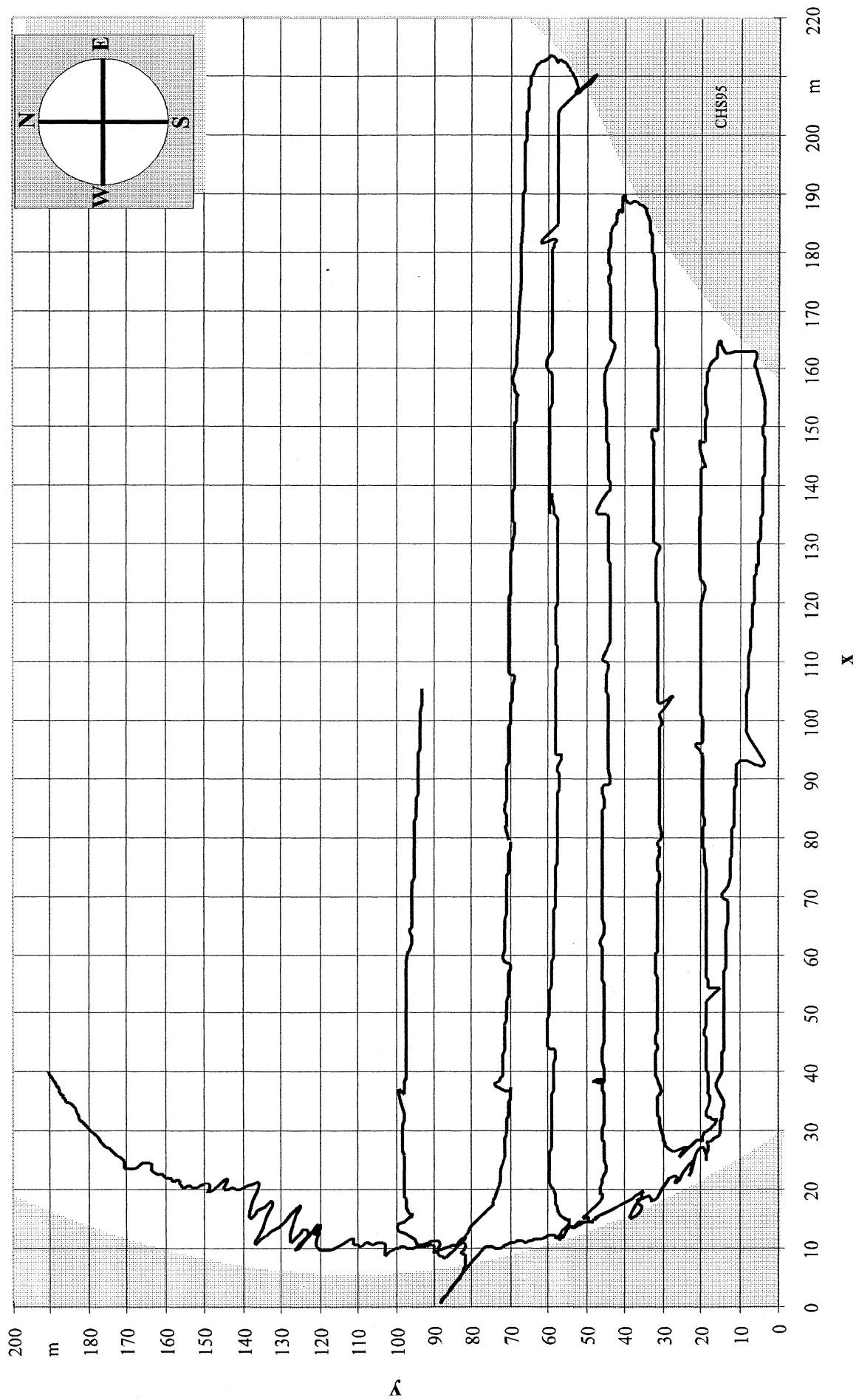


Abbildung 5.2: DGPS-Kurs, Versuch vom 25.11.94 in Adelschlag

5.5 Signalverhalten bei Abschattung

Zu untersuchen ist, ob der HDOP, die Anzahl ausgewerteter Satelliten oder das Alter der letzten gültigen DGPS-Korrektur als Kriterien für die Signifikanz der Positionen geeignet sind.

Da die UTC-Zeit der Datensätze im hhhmmss.s-Format angezeigt wird, muß sie zuerst in eine kontinuierliche, dezimale Zeitzahl umgewandelt werden. Die Differenz der aktuellen Zeitzahl zu der ersten ergibt dann eine äquidistante Zeitskala. Diese Berechnung wird in der Tabellenkalkulation wie folgt vorgenommen:

Tabelle 5.6: Ausschnitt einer Tabellenkalkulation für die Zeitumwandlung

	A	B	C
0	UTC-Zeit	Zeitzahl	Sekunden
1	113151,5	41511,5	0
...			
...			
136	113259	41579	67,5
137	113259,5	41579,5	68
138	113300	41580	68,5

In Spalte A stehen die UTC-Zeiten. Die Zellen in Spalte B sind hinterlegt mit einer Formel, die mit Textfunktionen die Anteile der Stunden, Minuten und Sekunden.dez gewichtet. Als Beispiel dient die Zelle B136.

Sie enthält den Bezug

$$B136=LINKS(A136;2)*3600+TEIL(A136;3;2)*60+TEIL(A136;5;4) \quad (5.4)$$

Die abgelaufenen Sekunden in Spalte C ergeben sich aus der Differenz der aktuellen Zeitzahl und der ersten Zeitzahl in Zelle B1.

Die Zelle C136 ist hinterlegt mit

$$C136=B136-\$B\$1. \quad (5.5)$$

Alle drei oben genannten Parameter sind im GPGLA-String enthalten. Herangezogen wird der gleiche Datenausschnitt wie in der Fahrspurauswertung von Abschnitt 5.4 mit einer Dauer von 550 s. Dargestellt wird in der Abbildung 5.3 zweckmäßigerweise der Verlauf der DGPS-x/y-Position über der Zeitachse.

Darüber aufgetragen werden die weiteren Parameter. Die Positionen sind in erster Linie durch die x-Koordinaten charakterisiert. Die x-Werte über der Zeit stellen den Kurs als Zickzacklinie dar, deren Amplitude langsam abnimmt. Dieses Verhalten gibt unmittelbar die Verjüngung der Fahrspuren im Waldzwickel wieder. Die Wendepunkte der Schleifen sind bei der gewählten Darstellung durch die Spitzen exakt festgelegt. Die Richtungsumkehr am Waldrand in Abbildung 5.3 wird zudem durch gestrichelte Linien hervorgehoben. Schon Abbildung 5.2 ist zu entnehmen, daß am Waldrand die Ortungsstörungen besonders groß sind.

Die y-Koordinate über der Zeitachse in Bild 5.3 gleicht einer Treppenfunktion. Der DGPS-Kurs beginnt danach bei einer y-Position (y nach oben entspricht Norden) von $y=190$ m. Der Startwert der x-Koordinate liegt am östlichen Rand der Versuchsfläche bei $x=40$ m. Am y-Verlauf kann beobachtet werden, daß die Fahrspurreihenfolge in Richtung Süden verläuft.

In Abbildung 5.2 bedeutet dies, daß die Fahrgassen von oben nach unten durchlaufen werden und erst am Schluß die oberste halb dargestellte Spur entsteht. Der Kreuzungspunkt bei $x=10$ m, $y=85$ m wird durch die Darstellung 5.3 eindeutig.

5.5.1 Anzahl ausgewerteter Satelliten bei Signalabschattung

Die Abbildung 5.3 „Verhalten von Signalparametern bei Abschattung“ zeigt die Parameter HDOP und die Anzahl verfügbarer Satelliten, sowie das Alter der letzten gültigen DGPS-Korrektur. Zu berücksichtigen ist, daß der Parameter „verfügbare Satelliten“ laut Herstellerangaben [7] nicht mit der tatsächlichen Konfiguration übereinstimmen muß. Es ist die Summe der, vom Gerät NovAtel 2151 augenblicklich im Mehrkanalbetrieb ausgewerteten Satelliten. Einem Empfangsdefizit wird demnach erst durch eine veränderte Selektion der Satelliten Rechnung getragen, bevor die Zahl der ausgewerteten Satelliten sinkt. Diese Tatsache erklärt den sehr konstanten Verlauf. Dennoch wird bei den Schleifenwendepunkten im Waldzwickel eine Korrelation der Anzahl mit Signalabschattung deutlich.

Im Bereich der Zeitpunkte 300 s, 420 s und 490 s sinkt die Satellitenzahl von 6 auf 5 bzw von 7 auf 5 ab. Diese Zeitbereiche stimmen exakt mit den Wendebereichen überein, die jeweils am Waldrand liegen.

Die Anzahl der ausgewerteten Satelliten kann grundsätzlich nur ein ganzzahliger Parameter sein. Das Auflösungsvermögen ist deshalb nicht hoch. Im Versuch waren stets mindestens 5 und maximal 7 Satelliten zu verzeichnen. Das Verhalten dieses Parameters korreliert zwar grundsätzlich mit den veränderten Empfangsbedingungen am Waldrand. Er ist aber als Kriterium für das Auftreten von Abschattungseffekten schlecht geeignet.

5.5.2 Verhalten des HDOP bei Signalabschattung

Der HDOP-Faktor - hier nur qualitativ betrachtet, zeigt gem Formel 2.19 ein reziprokes Verhalten gegenüber der Satellitenzahl (bzw deren aufgespannten Volumen). Er könnte als Kriterium für die Genauigkeit eher geeignet sein, weil er eine höhere Auflösung hat, als die Satellitenzahl-Skala.

So zeigt Bild 5.3 beispielsweise einen Sprung des HDOP von 1,7 auf 2,2 bei $t=300$ s. Bei $t=300$ s befindet sich die Spur zwar am Waldrand bei $x=180$ m, $y=38$ m, in Abbildung

5.2 sind hier aber keine Fehlpositionen zu erkennen. Bei $t=510$ s, $x=10$ m und $y=80$ m tritt in Bild 5.2 jedoch ein starker Ausreißer auf. Sein Positionsversatz beträgt 11 m. Bild 5.3 zeigt hier einen Sprung des HDOP von 1,2 auf 1,5.

Kurz danach tritt abermals eine Fehlposition in der Fahrspur auf. Im Bild 5.2 bei $x=12$ m und $y=96$ m zu erkennen. Der HDOP stellt sich auch hier wieder in Abbildung 5.3 als Pin im zugehörigen Zeitbereich dar.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, daß der HDOP als Indikator für Problembereiche gelten darf. Ortungsstörungen wie jene in der Mitte der Fahrspuren haben, wie diese Auswertung zeigt, eine statistische Charakteristik, denen der HDOP nicht Rechnung tragen kann. Der HDOP deutet jedoch verschlechterte Empfangsbedingungen am Waldrand an. Hier hat sich gezeigt, daß Abschattungseffekte bevorzugt dort auftreten, wo sich der DOP-Faktor sprunghaft erhöht.

5.5.3 Verhalten weiterer Parameter bei Signalabschattung

Im Bild 5.3 oben ist das Alter der letzten gültigen DGPS- Korrektur über dem zeitlichen Spurverlauf aufgetragen. Auffallend viele Spitzen treffen mit den Wendepunkten zusammen.

Auch die beiden Pins bei $t= 50$ s und $t= 70$ s könnten das schlechte Anfangsverhalten in der Positionierung darstellen. Als geeignetes Bewertungskriterium scheidet diese Größe aus, weil die Spitzen zu wenig aussagekräftig sind. Überdies stellt das Korrekturalter nur ein Bewertungskriterium für das Zusammenspiel Referenzstation/ Mobilstation dar.

Auch andere, in den Strings enthaltene, hier aber nicht näher beschriebene Parameter haben keinen eindeutigen Bezug zu den Positionsabweichungen im Signalschatten ergeben. Zu untersuchen wäre ev. noch die Häufigkeit des Wechsels einbezogener Satelliten.

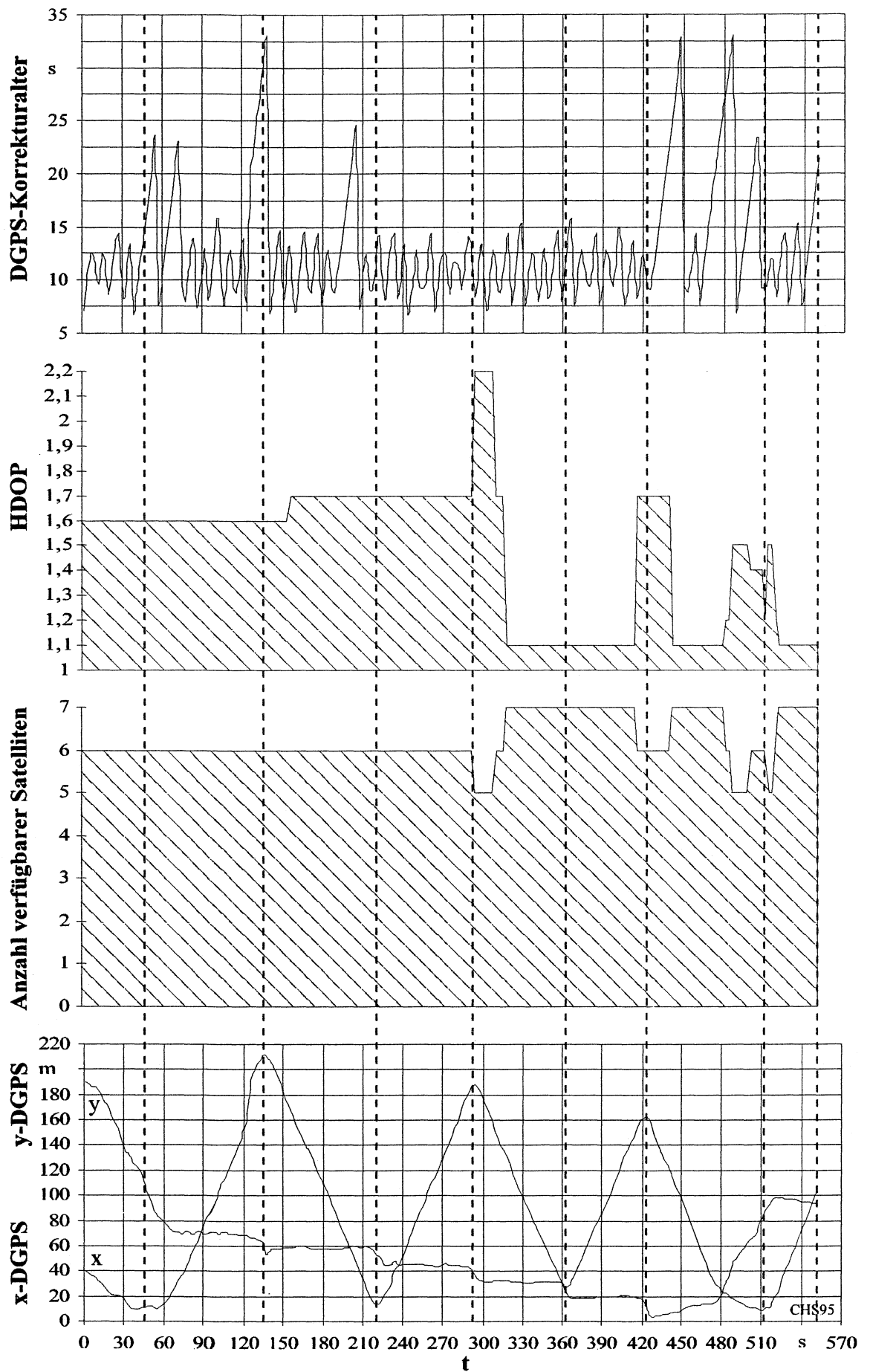


Abbildung 5.3: Verhalten von Signalparametern bei Abschattung

5.6 Vergleich DGPS mit bordautonomer Navigation

In diesem Kapitel werden zwei völlig verschiedene Systeme miteinander verglichen, um die jeweiligen Vor- und Nachteile zu überprüfen, die MUHR und AUERNHAMMER [13] genannt haben (siehe Tabellen 1.1 und 1.2). Parallel zur DGPS-Ortung wurden Signale aus zwei Radsensoren und Daten zweier bordautonomer Kompaßsysteme aufgezeichnet.

5.6.1 Kompaßvergleich

Der erste Schritt zum Vergleich ist eine Zusammenführung der verschiedenen Datensätze. Anschließend soll die Qualität zweier Kompaßsysteme beurteilt werden. Die Qualität ist dabei entscheidend, denn die differentiellen Wegstücke aus der Radsensorik müssen mit ihrer jeweiligen Richtung beaufschlagt werden.

Die im String \$GPVTG enthaltene Information *gpswinkel* fällt bei dem ausgewählten Datenfenster von 14003 Sätzen 1063 mal in 812 s an. Zu diesen Intervallen soll nun jeweils der augenblicklich gültige Wert der zwei unabhängigen Magnetkompaßsysteme (MK und KVH) ausgewertet werden. Die zwischen den Intervallgrenzen liegenden MK-Kompaßdaten werden zusätzlich in der unabhängigen Variablen *mkmittel* über ein DGPS-Intervall gemittelt. Diese Mittelwertbildung ist sinnvoll, da die Daten mit einer höheren Taktrate anfallen, als die Vergleichswerte aus dem DGPS-String. In Abbildung 5.4 werden sowohl die höherfrequenten Werte des MK-Systems, als auch deren geglätteter Verlauf über der Zeit aufgetragen.

Im Programm `kopp_nav.cpp` geschieht die Summierung der höherfrequenten Datenpunkte im Hauptteil falls \$3 oder \$4 innerhalb eines Hauptintervalls auftaucht. Wenn das Hauptintervall abgeschlossen wird, können die Mittelwerte berechnet werden und die Variablen neu initialisiert werden.

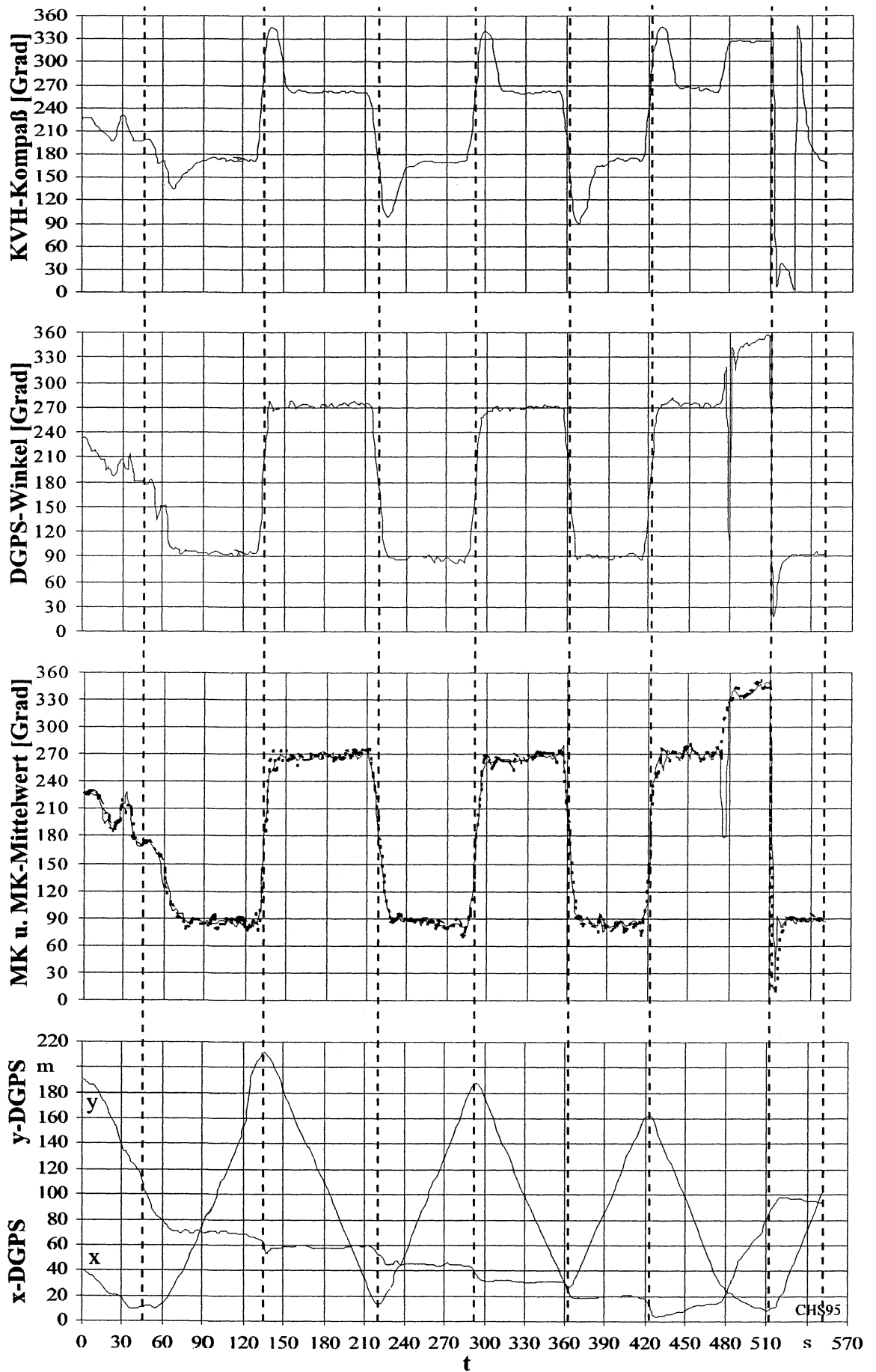


Abbildung 5.4: Vergleich der Kurswinkel verschiedener Systeme

Die Abbildung 5.4 „Vergleich der Kompaßdaten verschiedener Systeme“ zeigt die Werte DGPS-Winkel, KVH-Kompaß, Magnetkompaß und dessen Mittelwert über ein DGPS-Intervall. Aufgetragen sind die Kurswinkel über der Zeitachse. Zur besseren Zuordnung wurde die selbe Darstellungsform wie in Abbildung 5.3 gewählt. Das untere Bild zeigt wieder die x- bzw y-Koordinate über der Zeitskala.

Alle Winkel bewegen sich in dem Bereich $0...360^\circ$. Aus diesem Grunde ist bei $t=510$ s ein Bereichsüberlauf als steile Flanke mit der Höhe der Gradskala dargestellt.

Gut erkennbar sind die Wendepunkte der Fahrspuren. Die Kurswinkel ändern sich hier in wenigen Sekunden um 180° . Die Wendepunkte werden wie in Abbildung 5.3 durch gestrichelte Linien über alle Bildbereiche betont.

Das zweite Bild in Abb. 5.4 zeigt den Kurswinkelverlauf des DGPS-Kompaßsystems. Der NovAtel 2151-Empfänger gibt diesen Wert gem. Tabelle 5.3 und [7] im GPVTG-String aus. Die Winkelangaben aus der DGPS-Ortung können durch die bekannten Abschattungseffekte beeinträchtigt werden. Sie dürfen jedoch als zuverlässig für den Vergleich mit den anderen Kompaßdaten gelten.

Das dritte Bild in Abbildung 5.4 stellt den Kurswinkelverlauf des Magnetkompaßsystems MK dar. Hierbei werden durch die gestrichelte Linie alle, mit 5 Hz anfallenden Werte repräsentiert. Die durchgezogene Linie symbolisiert die Mittelwerte der Winkel innerhalb eines DGPS-Intervalles.

Beide Kurven zeigen ein leichtes Grundrauschen. Die Ursache dafür könnten Motorschwingungen des Fahrzeuges sein, die sich über die Karosserie auf den mechanischen Kompaß übertragen. Die Mittelwertbildung reduziert dieses Rauschen um etwa 5%.

Ein Vergleich dieser Kurswinkel mit dem DGPS-Winkel bestätigt eine gute Übereinstimmung. Ein statistischer Datenvergleich in einer Tabellenkalkulation belegt die grafische Auswertung. Anzumerken ist, daß der Magnetkompaß in diesem Versuch im Durchschnitt $3,29^\circ$ dem DGPS-Winkel hinterherlief ($\phi_{\text{DGPSWinkel}}=185,55^\circ$; $\phi_{\text{MKWinkel}}=182,26^\circ$). Dieser Effekt kann deshalb auftreten, weil nach [7] das DGPS-

System den geografischen Norden anzeigt. Der Magnetkompaß hingegen gibt den magnetischen Norden an. Bei einer genauen Betrachtung wird diese Besonderheit trotz des kleinen Maßstabes zB bei $t=390$ s sichtbar. Bei einer Koppelnavigation kann die konstante Abweichung aber rechnerisch berücksichtigt werden.

Als Winkelgeber läßt sich das MK Magnetkompaßsystem hervorragend einsetzen. Das System erweist sich als sehr stabil und präzise.

Die Grafik 5.4 verdeutlicht anschaulich, daß der KVH-Kompaß nicht vernünftig gearbeitet hat. Dieses Kompaßsystem arbeitet zu träge und zeigt in den Wendepunkten große Überschwinger. Eine weitere Verwendung des KVH-Kurswinkels scheidet aus.

5.6.2 Abgleich der Radsensorik

Der nächste Schritt, ein bordautonomes Stützsystem zu etablieren ist der Abgleich der Radsensorik. Der Einfachheit halber wird für Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich der Mittelwert aus den Impulsen der Radsensoren links und rechts verwendet.

Zu ermitteln ist dabei vor der Auswertung die Impulskonstante der Radsensorik. Zwar gibt der Hersteller der Sensoren die Anzahl der Impulse pro Umdrehung an und dies würde bei einem bekannten Radumfang auch den gesuchten Parameter rechnerisch ergeben. Die Praxis zeigt aber, daß dieser Wert im Gelände ganz erheblich (bis zu 30%) von dem theoretischen Wert abweicht (siehe Abschätzung aus Formel 5.8).

Unbekannt im landtechnischen Einsatz ist der Radumfang. Der Abrollumfang U_{Abroll} verringert sich bei einem Einsinken ins Erdreich deutlich. Bei einem Raddurchmesser D_{Rad} von 1,5 m und einer Spurtiefe h von 20 cm ergibt sich die eine Differenz dU von:

$$U_{Rad} = \pi D_{Rad} = 3,14 \cdot 1,5 \text{ m} = 4,71 \text{ m} \quad (5.6)$$

$$U_{Abroll} = \pi(D_{Rad} - 2h) = 3,14(1,5 \text{ m} - 2 \cdot 0,2 \text{ m}) = 3,45 \text{ m} \quad (5.7)$$

$$dU[\%] = \frac{U_{Rad} - U_{Abroll}}{U_{Rad}} \cdot 100 = \frac{2h}{D_{Rad}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 0,2 \text{ m}}{1,5 \text{ m}} \cdot 100 \approx \underline{\underline{26\%}} \quad (5.8)$$

Eine Beziehung zwischen Radimpulsen und der zurückgelegten Strecke wird deshalb sinnvollerweise für diesen Versuch experimentiell ermittelt.

Hierfür wird aus 1064 aufeinanderfolgenden GPVTG-Strings die Durchschnittsgeschwindigkeit

$$\overline{gpsv} = \frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} gpsv_i \quad (5.9)$$

berechnet. Eine, aus den Radsensoren berechnete Durchschnittsgeschwindigkeit muß nun den gleichen Wert ergeben.

Beide Radimpulse (*sumlinks* und *sumrechts*) liegen als fortlaufende Summe in den Strings \$3 und \$4 vor. Eine Geschwindigkeit kann aber nur über einen zeitlichen Bezug errechnet werden. Deshalb wird jeweils ein DGPS-Intervall für die zeitliche Stützung herangezogen. Beim Intervallstart i werden die Zählerstände *sumlinks* und *sumrechts* festgehalten und am Intervallende $i+1$ von den neuen Werten abgezogen. Anschließend wird aus den beiden Differenzen der Mittelwert *dimp* eines Intervalls gebildet:

$$dimp_{i+1} = \frac{(sumlinks_{i+1} - sumlinks_i + sumrechts_{i+1} - sumrechts_i)}{2} \quad (5.10)$$

Das Wegstück ds des i -ten Intervalls ergibt sich zu:

$$ds_i = dimp_i \cdot imprometer \quad (5.11)$$

Die Konstante *imprometer* [m/Impulse] ist die gesuchte Unbekannte und gibt an, wieviele Impuls pro Meter anfallen.

Durch die Transformation der UTC-Zeit aus dem \$GPGGA in eine Zeitzahl und in Zeitdifferenzen dt pro Intervall, kann den drei anderen Datensätzen ein dt zugewiesen werden.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}_{Rad} ergibt sich dann durch den Zusammenhang:

$$\bar{v}_{Rad} = \frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} \frac{ds_i}{dt_i} = \text{imprometer} \cdot \frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} \frac{dimp_i}{dt_i}. \quad (5.12)$$

Wenn die beiden Durchschnittsgeschwindigkeiten gleichgesetzt werden, kann nach der Konstanten *imprometer* aufgelöst werden.

$$\bar{v}_{Rad} := \overline{gpsv} \quad (5.13)$$

$$\text{imprometer} \cdot \frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} \frac{dimp_i}{dt_i} = \frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} gpsv_i \quad (5.14)$$

$$\text{imprometer} = \frac{\frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} gpsv_i}{\frac{1}{1064} \sum_{i=1}^{1064} \frac{dimp_i}{dt_i}} = \frac{2,37 \frac{m}{s}}{0,0053 \frac{1}{s}} \approx \underline{\underline{447m}}. \quad (5.15)$$

Die Abbildung 5.5 „Systemabgleich DGPS und Radsensorik“ zeigt die Verläufe der Teilgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit den DGPS-Koordinaten über der Zeit. In großen Bereichen ist ein guter Abgleich gelungen.

Die Geschwindigkeiten der Radsensorik unterliegen systembedingt einer etwas größeren Schwankung. Hier muß auch der Radschlupf mitberücksichtigt werden. Im Wesentlichen korrelieren die Geschwindigkeitsverläufe gut miteinander. Die Durchschnittsgeschwindigkeit von 8,53 km/h, mit der dieser Versuch gefahren wurde, ist im Bild gestrichelt eingezeichnet.

In den Wendepunkten der Fahrspuren läßt sich eine Reduzierung der Geschwindigkeiten erkennen. Die Abbildung 5.5 zeigt auch, daß eine Modellierung über die Mittelwertbil-

dung hinreichende Genauigkeiten bietet. Eine komplexere Sensorrechnung würde hier nur unwesentliche Verbesserungen mit sich bringen.

Um die Ermittlung der Radsensor-Konstante *imprometer* zu verifizieren, soll eine Abschätzung vorgenommen werden. Dabei wird aus der sechsten Spur (von unten) ein Anfangspunkt (Index: A) und ein Endpunkt (E) bestimmt. Gleichzeitig wird der Mittelwert der Radsensor-Zählerstände *impmw* an diesen Punkten festgehalten.

Die zurückgelegte Strecke *s* auf Spur 6 ergibt sich aus den DGPS-Koordinaten zu:

$$s = \sqrt{(x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2} \quad (5.16)$$

Mit den Koordinaten $x_A = 24,48 \text{ m}$; $y_A = 71,98 \text{ m}$ zur Zeit $t_A = 11:32:58,50$ und $x_E = 156,20 \text{ m}$; $y_E = 68,19 \text{ m}$ bei $t_E = 11:33:51,5$ ergibt sich für die zurückgelegte Strecke:

$$s = \sqrt{(156,20 - 24,48)^2 + (68,19 - 71,98)^2} \text{ m} = 131,77 \text{ m} \quad (5.17)$$

Der arithmetische Mittelwert aus linkem und rechtem Radsensor beträgt zu diesen Zeitpunkten $impmw_A = 58515$; $impmw_E = 117419$. Die Differenz Δimp daraus sind 58904 Impulse für eine Strecke von 131,77 m.

Die Konstante *imprometer* wird also verifiziert durch den Ausdruck:

$$imprometer \approx \frac{\Delta imp}{s} = \frac{58904}{131,77 \text{ m}} = 447 \text{ m} \quad (5.18)$$

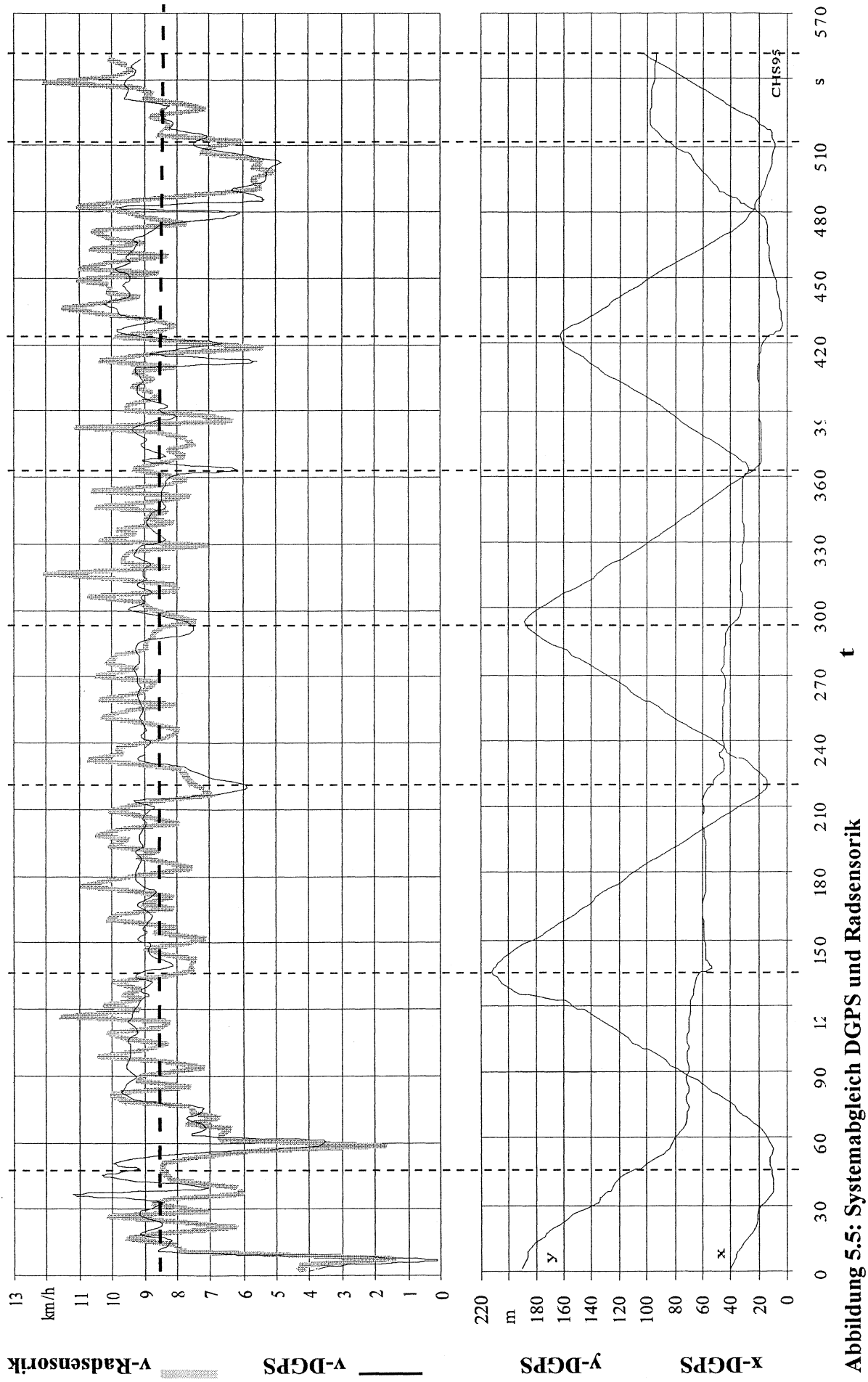


Abbildung 5.5: Systemabgleich DGPS und Radsensorik

Systemvergleich

Mit den Ergebnissen aus den vorherigen Abschnitten soll nun das bordautonome System mit der DGPS-Ortung verglichen werden.

Dazu wird als Rahmen wiederum das DGPS-Intervall gewählt. Die Wegstrecken ds müssen nun mit der Richtung aus dem Magnetkompaß als Vektoren behandelt werden.

Dann ergeben sich die Koordinaten (Radsensoren + Magnetkompaß, Index mkr) zu

$$x_{i+1} = x_i + ds_i \sin(mkwinkel) \quad (5.19)$$

$$y_{i+1} = y_i + ds_i \cos(mkwinkel) \quad (5.20)$$

Im Programm `kopp_nav.cpp` (Anhang) geschieht dies in den Routinen `xmkrsum` und `ymkrsum`:

```
void xmkrsum(void)
{
    xmkr=xmkr+(dlinks+drechts)/2.0/imprometer*sin(mkwinkel*radiant);
}

void ymkrsum(void)
{
    ymkr=ymkr+(dlinks+drechts)/2.0/imprometer*cos(mkwinkel*radiant);
}
```

Die erste Sensorposition wird durch die erste gültige DGPS-Position initialisiert. Untersucht werden 395 Intervalle, die einer Dauer von 210 s entsprechen.

Das Bild 5.6 „Systemstabilität unabhängiger Ortungsverfahren“ zeigt diesen dreieinhalb minütigen Ausschnitt. Hier laufen beide Systeme - nur durch den Startwert initialisiert, unabhängig voneinander.

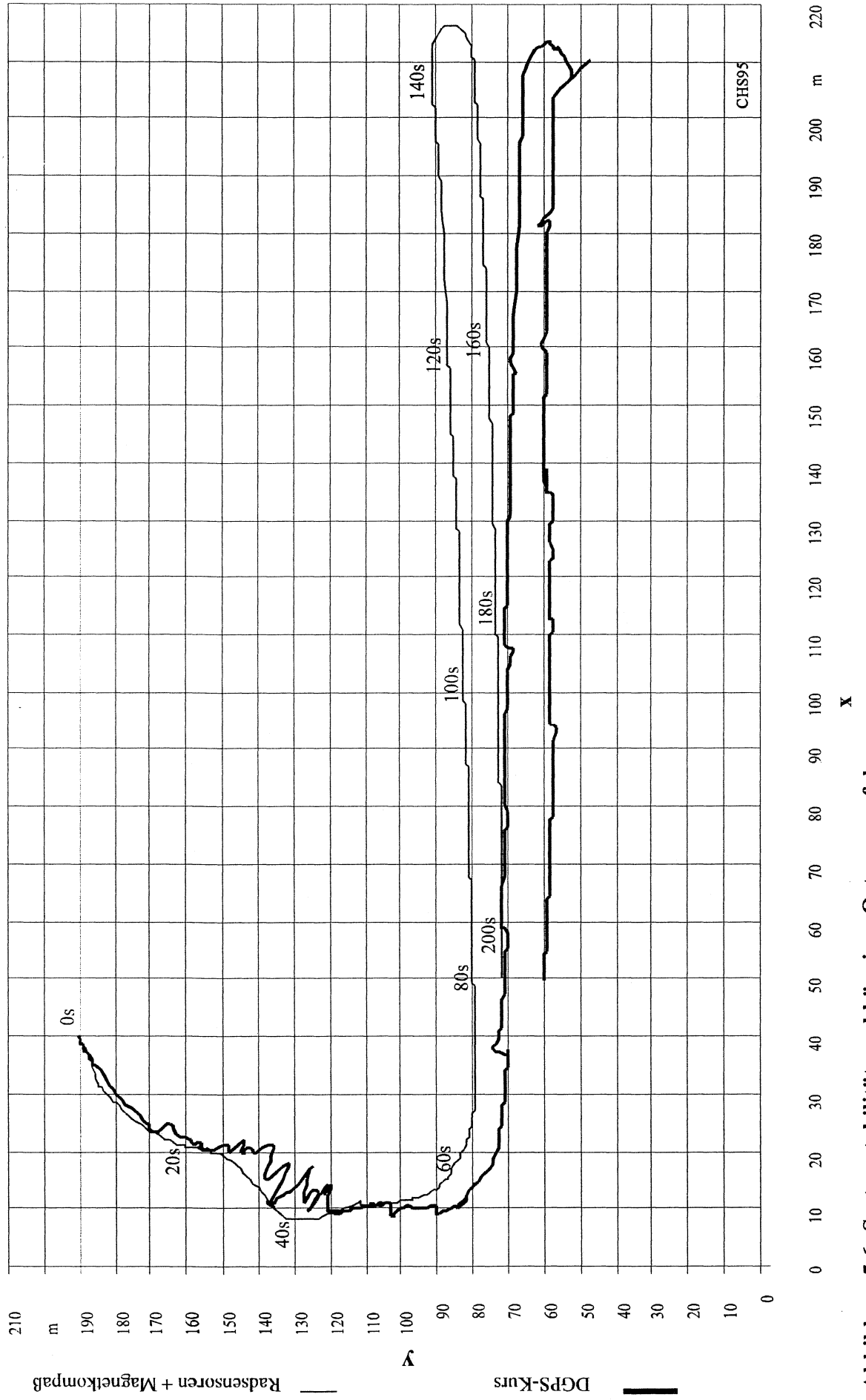


Abbildung 5.6: Systemstabilität unabhängiger Ortungsverfahren

Die DGPS-Spur in Abbildung 5.6 weißt die bekannten Nachteile auf. Im Abschattungsbereich liefert das DGPS Fehlpositionen. Auch im freien Feld treten statistische Fehlpositionen auf. Der Vorteil von DGPS ist die Ermittlung der absoluten Koordinaten.

Das Sensorsystem verhält sich gerade umgekehrt. Statistische Schwankungen gibt es hier nicht. Die bordautonome Ortung zeichnet sich aus durch eine glatte Fahrspur ohne Ausreißer. Berücksichtigt werden muß aber hier der Nachteil, daß dieses Ortungsverfahren nur relative Koordinaten berechnet. Diese resultieren aus der differenziellen Wegstückelung. Eine Bordautonome Ortung unterliegt deshalb einer gewissen Drift, wenn sie nicht neu initialisiert wird.

In diesem Versuch bringt dieses Ortungsverfahren im Single-Mode-Betrieb jedoch hervorragende Ergebnisse.

Die ersten 10 s stimmt dieses Verfahren im 1 m -Bereich mit der DGPS-Ortung überein. Auch danach sind die Abweichungen klein. Im Kurvenbereich driftet die Spur etwa 10 m zu früh ab. Das geschieht nach 50 s. Durch eine getrennte Auswertung der beiden Radimpulse könnte dieses Verhalten noch verbessert werden.

Abgesehen von der Drift im Kurvenbereich, hält das bordautonome System danach wieder sehr gut die Position.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, daß beide Systeme sich mit ihren Vor- und Nachteilen hervorragend ergänzen könnten. Das Sensorsystem scheint geeignet, die Unregelmäßigkeiten der DGPS-Ortung im Abschattungsbereich über einige Minuten hinweg wettzumachen. Ferner bietet sich ein Ortungsverfahren dieser Art an, da in Zukunft die Radimpulse von den Impulsgebern bestehender ABS-Einrichtungen abgenommen werden könnten. So könnte ein gekoppeltes System ohne großen finanziellen Aufwand realisiert werden.

6 Ausblicke / Koppelnavigation

Im Kapitel 5 wurden zwei, voneinander unabhängige Verfahren zur Ortung auf Ihre jeweiligen Vor- und Nachteile untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß sich DGPS in Abschattungsbereichen am Waldrand durch ein Kompaß-gestütztes Radsensorsystem ergänzen läßt. Auch bei statistischen Ortungsfehlern ließe sich das DGPS-Ortungsverfahren durch die Vorteile des Sensorsystems aufwerten. In diesem Abschnitt sollen nun beide, in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren auf einfache Weise miteinander kombiniert werden. Ziel ist es, einen Ansatz für eine Koppelortung aufzuzeigen. Die Annahme, daß sich mit einfachen Schritten eine Koppelortung realisieren läßt, die der reinen DGPS-Ortung überlegen ist, soll bestätigt werden.

Der Grundgedanke einer Koppelortung ist die Ortung nach einem System, das von weiteren Komponenten gestützt wird.

Dieser Vorgang kann auf einfachste Weise durch ein „Hin- und Herschalten“ zwischen den einzelnen Verfahren verwirklicht werden. Hierfür ist lediglich eine Plausibilitätsprüfung des Primärortungsverfahrens erforderlich. Wenn die Kriterien für eine zuverlässige Ortung nicht erfüllt werden, übernimmt ein zweites Verfahren die Ortung.

Nachteilig wäre bei dieser Alternativtechnik, daß die jeweiligen Nachteile der gerade ortenden Verfahren voll zur Geltung kommen.

Eine geeignetere Möglichkeit zum Aufbau einer Koppelortung ist die parallele Verarbeitung mehrerer Größen. Diese Eingangsgrößen müssen dann nach verschiedenen Kriterien gewichtet werden, um den Einfluß auf den Koppelkurs zu bestimmen. Der Koppelkurs nähert sich dabei durch eine Intervallschachtelung ständig der am besten geeigneten Größe an.

Um eine Koppelortung mit den Größen DGPS-Position, Radsensorik und Magnetkompaß zu realisieren kann folgende Überlegung herangezogen werden:

- Das Sensorsystem zeigt kaum statistische Ausreißer. Es liefert mit hoher Wahrscheinlichkeit einen glatten Kursverlauf. Eine Ortung nach diesem System ist jedoch nur in kur-

zen Abschnitten zuverlässig, da dieses Verfahren Drifterscheinungen unterliegt. Eine Ortung ist nur relativ zu einem festen Bezugspunkt möglich.

- DGPS liefert absolute Positionen, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit hinreichend genau sind. Mit diesen DGPS-Positionen kann deshalb das Sensorsystem ständig neu initialisiert werden

Diese Punkte legen nahe, eine Ortung nach dem Sensorsystem zu betreiben und die Positionen jeweils dann durch DGPS zu aktualisieren, wenn eine DGPS-Position signifikant ist. Dies kann durch den Koppelkurs selbst und durch eine Plausibilitätsprüfung bestimmt werden.

Abbildung 6.1 zeigt eine einfache Form der Koppelortung als Ablaufdiagramm. Auf komplexere Plausibilitätsprüfungen und Koppelalgorithmen wurde vollständig verzichtet.

Der aktuelle Kurs wird bei dem Programm `kopp_nav.cpp` (Anhang) durch die Koordinaten x_{KOPP} ; y_{KOPP} bestimmt. In der Prozedur `koppel` wird zuerst geprüft, ob die aktuelle DGPS-Position x_{DGPS} ; y_{DGPS} weniger als 2 m von der Koppelposition entfernt ist.

Ist dies der Fall, können sowohl die Koordinaten x_{MKR} ; y_{MKR} des Radsensorsystems, als auch die Koppelkoordinaten neu nach den DGPS-Werten initialisiert werden. Der Koppelkurs ist in diesem Fall identisch mit DGPS und dem Radsensorsystem.

Ist die Bedingung

$$\sqrt{(x_{DGPS} - x_{KOPP})^2 + (y_{DGPS} - y_{KOPP})^2} < 2 \quad (6.1)$$

erfüllt, kann das Sensorsystem neu auf die DGPS-Position initialisiert werden. Der Koppelkurs ist in diesem Fall identisch mit dieser Position.

Ist Bedingung 6.1 nicht erfüllt, ist es wahrscheinlich, daß die DGPS-Position einen Fehler aufweist. (Fehler wie Schlupf des Radsensor-Systems wurden hier nicht berücksichtigt)

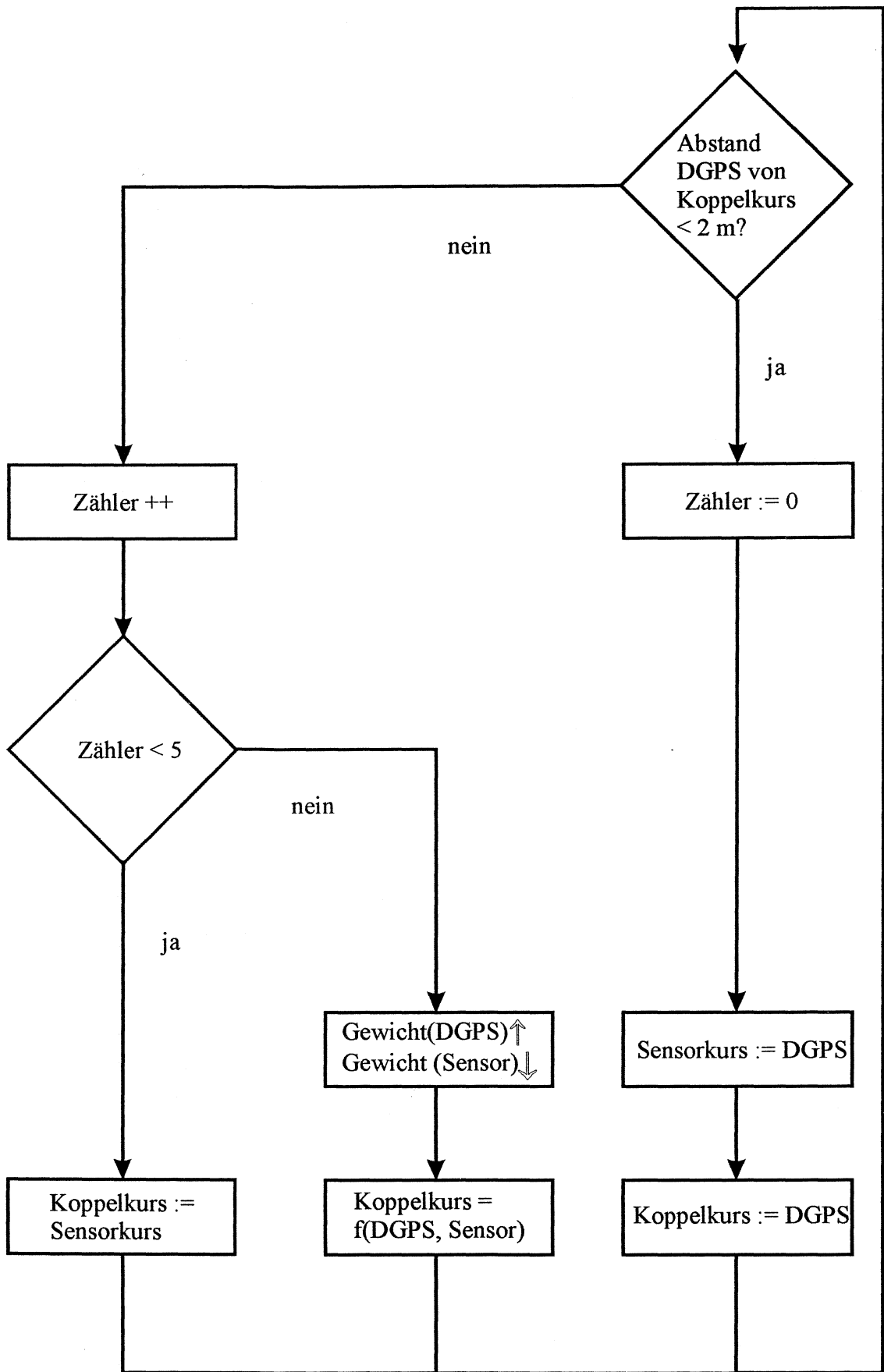


Abbildung 6.1: Ablaufdiagramm einer einfachen Koppelortung

In diesem Fall sollen die nächsten 5 DGPS-Intervalle ausschließlich nach dem Sensorsystem geortet werden, wenn in der Zwischenzeit die Bedingung 6.1 nicht erfüllt wird. 5 Sensorintervalle wurden deshalb gewählt, weil die Auswertung in Kapitel 5 zeigt, daß bei DGPS-Fehlpositionen oftmals mehrere ungültige Werte aufeinander folgen.

Ist Bedingung 6.1 nach 5 Intervallen immer noch nicht erfüllt, müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Das Sensorsystem kann langsam von der tatsächlichen Position abdriften. Eine alleinige Ortung nach dem Sensorsystem muß deshalb zeitlich begrenzt werden.
- Eine automatische Initialisierung nach einer starren Zeitspanne sollte aber vermieden werden, da sonst Positionssprünge unvermeidbar sind.
- Beide Systeme entfernen sich voneinander und die Bedingung 6.1 wird ständig schwerer erfüllbar. Eine Neuinitialisierung soll aber nicht von DGPS-Ausreißern getätigt werden, weil reguläre Werte die Bedingung 6.1 nicht mehr erfüllen.

Wenn 6.1 nach 5 Intervallen noch nicht erfüllt ist, wird deshalb der Koppelkurs an den DGPS-Kurs angenähert. Dies geschieht durch eine zeitlich gewichtete Iteration in `kopp_nav.cpp`. Je länger die Bedingung 6.1 nicht mehr erfüllt wurde, umso stärker wird das Gewicht des DGPS-Kurses gegenüber dem Sensorkurs. Der Koppelkurs berechnet sich dabei durch eine gewichtete Mittelwertbildung:

$$x_{KOPP} = gewicht_1 \cdot x_{DGPS} + gewicht_2 \cdot x_{MKR} \quad (6.2)$$

$$y_{KOPP} = gewicht_1 \cdot y_{DGPS} + gewicht_2 \cdot y_{MKR} \quad (6.3)$$

Dabei bestimmt der Zähler `mkrzaehler`, seit wievielen Intervallen nicht mehr komplett neu initialisiert wurde. Eine Iterationstabelle weist den Gewichten ihren aktuellen Wert zu. Die Summe beider Gewichte ergibt hier immer 1. Deshalb wird in den Formeln 6.2 und 6.3 ein Teiler für den gewichteten Mittelwert überflüssig.

Tabelle 6.1 zeigt die Iterationsvorschriften, die im Programm kopp_nav.cpp verwendet wurden.

Tabelle 6.1: Iterationsvorschriften für die Gewichtung der Ortungsgrößen

Anzahl der Intervalle ohne DGPS-Neuinitialisierung	Gewicht 1 für DGPS-Ortung	Gewicht 2 für Rad- und MK-Sensorik
0	0,00	1,00
1	0,00	1,00
2	0,00	1,00
3	0,00	1,00
4	0,00	1,00
5	0,10	0,90
6	0,15	0,85
7	0,20	0,80
8	0,25	0,75
9	0,30	0,70
10	0,35	0,65
11	0,40	0,60
12	0,45	0,55
13	0,50	0,50
14	0,55	0,45
15	0,60	0,40
16	0,65	0,35
17	0,70	0,30
18	0,75	0,25
19	0,80	0,20
20	0,85	0,15
21	0,90	0,10
22	0,95	0,05
23	1,00	0,00
...		

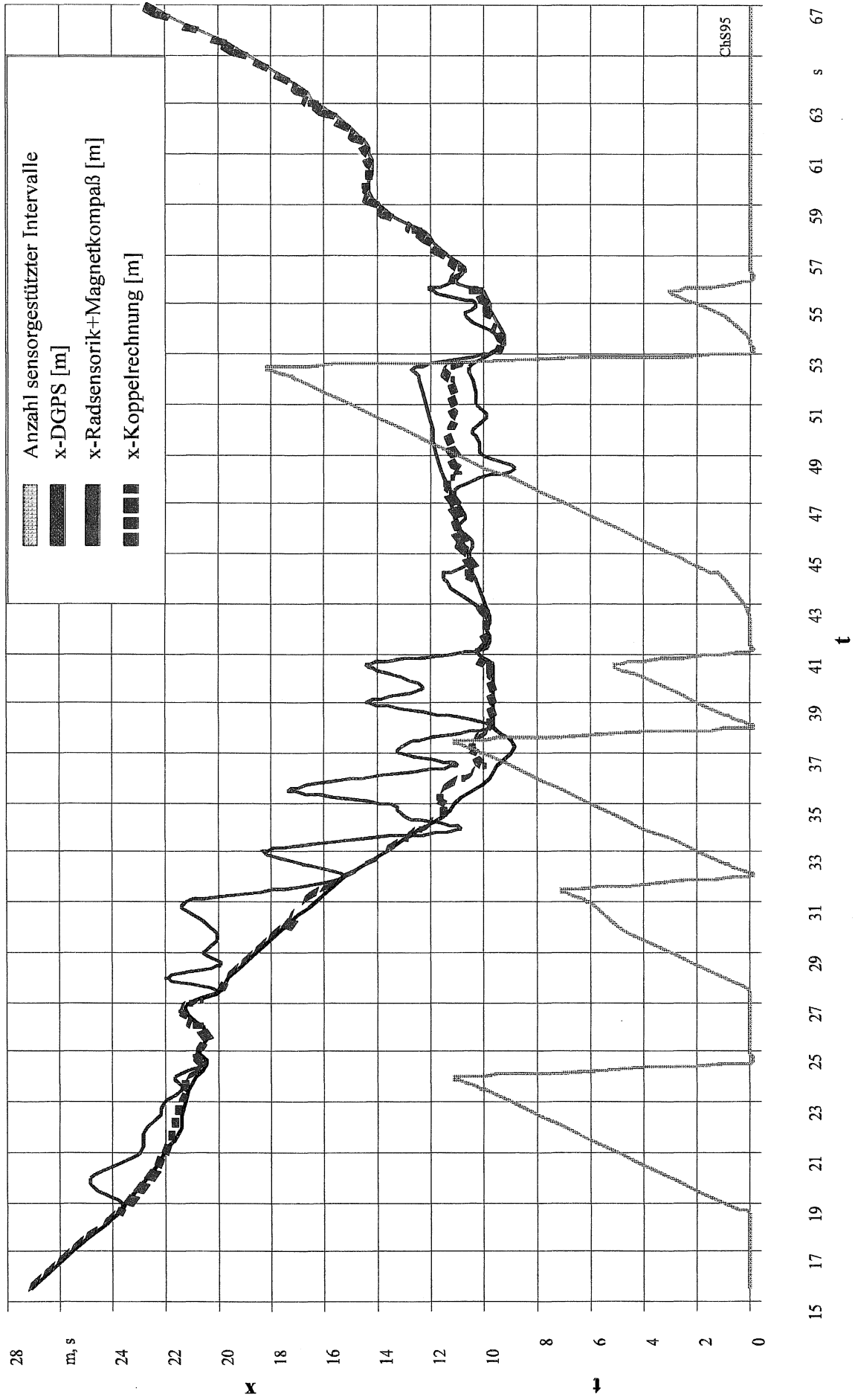


Abbildung 6.2: Koppelstabilisierung bei Signalabschattung

Die Abbildung 6.2 zeigt einen Ausschnitt aus dem DGPS-Kurs von Kapitel 5 mit einer Länge von 52 s. Aufgetragen sind die verschiedenen x-Koordinaten über der Zeit.

Der Koppelkurs sowie der Sensorkurs wurden zu Beginn (hier: $t=15$ s) auf die DGPS-Koordinaten initialisiert. Ab $t=19$ s liefert das DGPS-System aufgrund der Signalabschattung eine Serie von schlechten Positionsangaben. Die Bedingung 6.1 ist nicht mehr erfüllt.

Der Koppelkurs (gestrichelt) richtet sich die ersten 5 Intervalle nach der Maßgabe der Sensorik, weil keine DGPS-Positionen im Schlauch von 2 m liegen. Ab dem 6. Intervall ist zu beobachten, daß der Koppelkurs sich langsam dem DGPS-Kurs annähert. Zu einer stark gewichteten Iteration kommt es in diesem Fall aber nicht, da bei $t=25$ s eine DGPS-Position die Bedingung 6.1 erfüllt. Alle Koordinaten werden hier durch DGPS neu gesetzt.

Unten im Bild ist zugleich die Anzahl sensorgestützter Intervalle aufgetragen. Anhand dieser Linie kann qualitativ verfolgt werden, wann und wie lange eine Iteration durchgeführt wurde.

Bei $t=45$ s weichen die DGPS-Werte ebenfalls vom Koppelkurs ab. Eine Ortung erfolgt am Anfang wieder nach der Sensorik. Etwa 2 s später trennen sich die beiden Kurse und laufen in verschiedene Richtungen davon. Plausibel scheint hier der Sensorkurs zu sein, an dem sich die Koppelortung zunächst stark orientiert. Die Iteration zeigt, daß der Koppelkurs einen Mittelweg wählt und sich langsam auf die absoluten Positionen der DGPS-Ortung zubewegt. Das Iterationsziel ist nach 18 Intervallen erreicht.

Die Abbildung 6.2 zeigt, wie in einfacher Weise eine erhebliche Verbesserung des DGPS-Ortungsverfahrens in Bereichen einer Signalabschattung erzielt werden kann.

Abschließend soll mit diesem Verfahren der DGPS-Kurs aus Kapitel 5 überarbeitet werden. Abbildung 6.3 zeigt das oben vorgestellte Verfahren zur Koppelnavigation. Es wird deutlich sichtbar, daß sich Ortungsgenauigkeit und Stabilität drastisch steigern lassen. So werden schon von diesem einfachen Verfahren ein großer Teil der DGPS-Schwächen

zuverlässig erkannt und korrigiert. Ausreißer wirken sich nur noch unwesentlich auf den Kurs aus.

Ein Nachteil des hier verwendeten Verfahrens ist, daß in drei Bereichen der parallel zum Koppelkurs verlaufende DGPS-Kurs nicht schnell genug erkannt wird. Eine Verbesserung kann dadurch erreicht werden, indem die letzten Kurswinkel in ein Schieberegister eingelesen werden und das Winkelregister des Koppelkurses mit dem der DGPS-Ortung verglichen wird. Liegen beispielsweise die letzten 5 Richtungsangaben beider Kurse eng zusammen kann ein Parallelkurs erkannt werden.

Ferner wird in diesem Verfahren das Sensorsystem nicht auf Plausibilität geprüft. Eine Auswertung der Daten bei $x=20$ m; $y=20$ m zeigt hier nur kleine Positionierfehler von DGPS. Die Radsensorik hingegen zeigt hier ein unplausibles Verhalten, daß ev. auf Radschlupf zurückzuführen sein könnte.

Eine kostengünstige Realisierung der vorgeschlagenen Koppelortung bietet sich an, wenn eine bestehende ABS-Bremsanlage zusätzlich als Signalgeber für Radimpulse dient. Die zweite Komponente wäre ein Magnetkompaßsystem.

Bei der Auswertung der Koppelrechnung hat sich zudem gezeigt, daß auf einen unabhängigen Kompaß sogar verzichtet werden kann, wenn die Fahrtrichtung durch eine Mittelung der letzten zuverlässigen DGPS-Richtungswerte gewonnen wird. Ein solche Minimallösung ist in der Lage, die Positionsstabilität erheblich zu verbessern.

Die letzten Kapitel haben erläutert, daß in Zukunft mit einer Positioniergenauigkeit im 2 m -Bereich zu rechnen ist. Diese Ortung ist im dynamischen Betrieb mit der, für die Landtechnik üblichen Geschwindigkeiten möglich.

Signalabschattung ist in der Landtechnik bei DGPS-Einsatz in Randbereichen ein ernstzunehmender Störfaktor. Die Methoden der Koppelortung zeigen aber hier einen Ausweg, um auch über einige Minuten hinweg in unzugänglichen Gebieten eine gute Ortung zu erreichen.

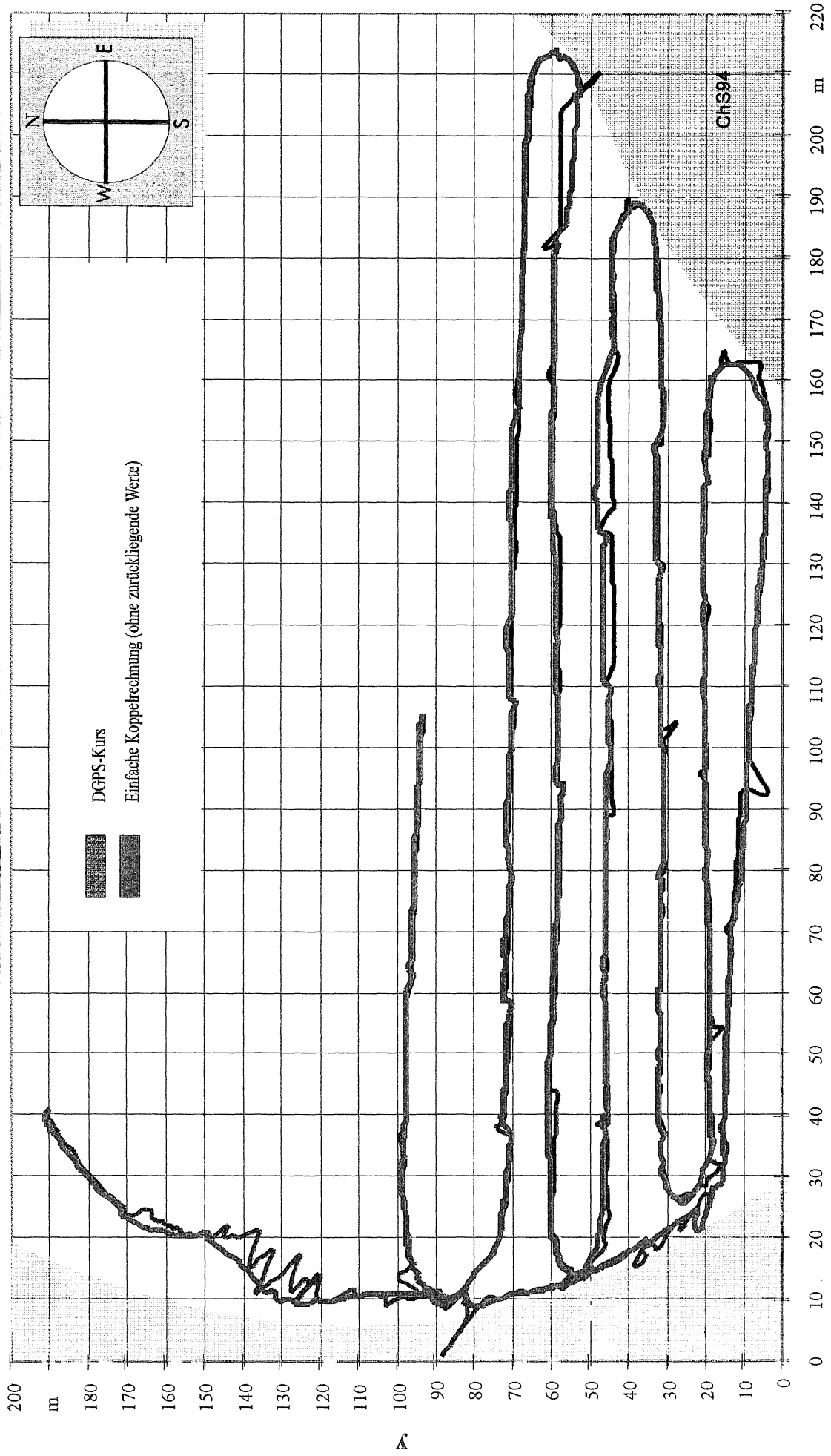


Abbildung 6.3: Koppelnavigation mit Radsensoren, Magnetkompaß und DGPS

7 Anhang

7.1 Quellcode kopp_nav.cpp

```

/*****
/**          Anhang Diplomarbeit Christian Seebauer 01.95          ***
/**          Quellcode kopp_nav.cpp                               ***
/*****

//kopp_nav.cpp

//Das Programm kopp_nav soll Daten zur Koppelnavigation weiter aufbereiten

//Aufgezeichnet wurden im Versuch folgende Daten:
//- GPS-Daten
//- Kurswinkel Magnetkompaß u. KVH-Kompaß
//- Radimpulse
//- Winkel um Fahrzeugachsen

//Die Daten liegen in Form eines txt-Files vor. Dabei fallen die
//verschiedenartigen Datensätze mit unterschiedlichen Taktraten an:
//- KVH-Daten:      10 Hz
//- Magnetkompaß:   5 Hz
//- GPS-Daten:      1 Hz

//Ausschnitt aus dem txt-File:
//Dabei bedeutet \t TAB
//1\t$GPVTG\t231,408\tI\t231,408\tM\t1,6659080\tN\t3,085262\tK*73
//2\t$GPGGA\t113150,50\t4850,6066533\tN\t01111,3442546\tE\t2\t06\t...
//...1,6\t509,456\tM\t46,789\tM\t10,3\t1002*70
//4\t$NoK!!\t0\tNO*00L\t542\tR\t580\t%-29\t2\t2288
//3\t$234,2\tD\tOK*69L\t565\tR\t607\t%-30\t2\t2286
//4\t$NoK!!\t0\tNO*00L\t590\tR\t632\t%-30\t2\t2286
//3\t$231,1\tD\tOK*6FL\t609\tR\t654\t%-30\t2\t2284
//4\t$NoK!!\t0\tNO*00L\t626\tR\t676\t%-30\t3\t2283

//KVH-Daten / Struktur:
//4\t$NoK!!\t0\tNO*00L\t542\tR\t580\t%-29\t2\t2288
//3\t$231,1\tD\tOK*6FL\t609\tR\t654\t%-30\t2\t2284
//-Kurswinkel vom Magnetkompaß
//-Radimpulse links (366 I/m)
//-Radimpulse rechts (366 I/m)
//-Pitch, Winkel um Querachse
//-Rollwinkel, Längsachse
//Kurswinkel KVH-Kompaß

```

*//Da die Magnetkompaß-Daten mit geringerer Taktrate verfügbar sind,
//steht etwa in jedem 2. String "NoK!!"... - Kein Kompaß*

//GPS-String \$GPGGA / Struktur:

//2\t\$GPGGA\t113150,50\t4850,6066533\tN\t01111,3442546\tE\t2\t06\t...

//-UTC-Zeit (hhmmss.ss)

//-Breite (GradMin.Min)

//-Länge (GradMin.Min)

//-Flag (2=DGPS)

//-Anzahl empf. Satelliten

*//...1,6\t509,456\tM\t46,789\tM\t10,3\t1002*70*

//-PDOP

//-Höhe über Ellipsoid

//-Alter letzte Korrektur

//GPS-String \$GPVTG / Struktur:

*//1\t\$GPVTG\t231,408\tT\t231,408\tM\t1,6659080\tN\t3,085262\tK*73*

//-Kurswinkel GPS

//-Geschwindigkeit GPS (Km/h)

//Voraussetzungen:

//-Der DGPS Startwert soll stimmen, dies kann in der Praxis durch

// geeignete Initialisierungsverfahren erreicht werden

//-Startposition gilt auch für Sensor-System

//-Das log-File soll mit 2 \$GPGGA beginnen

*/** Einbinden *****

#include <fstream.h>

//Datei-in-out

#include <string.h>

#include <stdlib.h>

//für atoi, atof

#include <math.h>

//für sin, cos, abs, hypot

*/** Globale Initialisierung *****

double zeit=0.0;

//UTC-Zeit

double breite=0.0;

double laenge=0.0;

int sat=0;

//Anzahl verfügbarer Satelliten

float pdop=0.0;

//PDOP

float corr=0.0;

//Alter der letzten gültigen Korrektur

char buf[20];

//Einlesepuffer

```

double gpswinkel=0.0;           //aus $I
double gpsv=0.0;                //aus $I, Geschwindigkeit

char mkstring[20];              //Winkel MGkompaß zB: $231.7 oder $NoK!!
char mksubstr[3]="0";          //Substring zB: [234],
int mkwinkel=0;                 //int-Zahl zB: 234, bei NoK: Alter Wert

long sumlinks=0;                //Impulssumme Radsensor links
long dlinks=0;                  //Impulse pro $3/4-Intervall, links
long sumrechts=0;
long drechts=0;
const int imprometer=447;       //Sensor-Rad-Parameter 34.5 I/m im Versuch

int kvhwinkel=0;                //kvh-winkel

double xdgps=0.0;               //Aktuelle DGPS-Position
double ydgps=0.0;

double xmkr=0.0;                //Position aus MK+Rad
double ymkr=0.0;

double xkopp=0.0;               //Entweder xdgps oder xmkr
double ykopp=0.0;               //(Koppelrechnung)
int mkrzaehler=0;               //Anzahl bordautonome Nav.Intervalle

double gewicht1=1.0;            //Gewichtungsfaktoren für Iteration
double gewicht2=1.0;

int mksum=0;                     //Zur Mittelwertbildung
int mkzaehler=0;                 //für den Kompaßvergleich
int mkmittel=0;                  //hier: Magnetkompaß

int kvhsum=0;                    //hier: kvh-Kompaß
int kvhzaehler=0;                //Initialisierung mit 0, da in case 3/4
int kvhmittel=0;                 //inkrementiert wird, bevor case 2 eintr.

int strnr=2;                      //Stringnummer 1-4, aus stringnr()
long strzaehler1=0;              //zählt die ausgewerteten S
long strzaehler2=0;
long strzaehler3=0;
long strzaehler4=0;
long outzaehler=0;               //Anzahl Datensätze in Zielfeile

long zeile;                       //Datensatzzähler für Hauptschleife
const long schlusszeile=14000;   //Anzahl zu verarbeitender DS
int filter=0;                     //Ausgabefilter für ausgabe2()
const int filterwert=0;           //zB jedes x-te DGPS Intervall
const double radiant=2*3.141592/360; //const für deg->rad

```

```
ifstream fin("kopp7.txt");           //Einlesestrom-Objekt fin(Quelldatei)
ofstream fout("test.txt");           //Ausgabestrom-Objekt fout(Zieldatei)
```

```

/*****
***  Umwandlungsroutinen / Berechnungen  ***
*****/

```

```

**** Breite -> y ****

```

```

double yconvert(double breite)           //Wandelt die Breite in ein
{                                         //lokales y um

    const double boffset=4850.60;         //offset für lokales KS
    const double mpromin=1851.983333;    //1 B°Minute = 1.8 km
    const double yfein=177.0;           //Zur Feinabstimmung
    double ydgps;

    ydgps=(breite-boffset)*mpromin+yfein;

    return ydgps;
}

```

```

**** Länge -> x ****

```

```

double xconvert(double laenge)           //Wandelt die Länge in ein
{                                         //lokales x um

    const double loffset=1111.34;
    const double mpromin=1219.152118;    //1 L°Minute = 1.2 km
    const double xfein=36.0;
    double xdgps;

    xdgps=(laenge-loffset)*mpromin+xfein;

    return xdgps;
}

```

```

**** Neue x-Position aus Rad+MK ****

```

```

void xmkrsum(void)                       //Berechnet die neue x-Position
{                                         //aus MG-Kompaß und Radsensoren
    //((Mittelwert aus Rad links/ rechts)

    xmkr=xmkr+(dlinks+drechts)/2.0/imprometer*sin(mkwinkel*radiant);
}

```

```

**** Neue y-Position aus Rad+MK ****
void ymkrsum(void)
{
    ymkr=ymkr+(dlinks+drechts)/2.0/imprometer*cos(mkwinkel*radiant);
}

**** Stringnummer ermitteln ****

int stringnr(void) //Gibt die Stringnummer zurück
{
    fin >> buf; //String-Nummer feststellen
    strnr= atoi(buf); //String -> Int Konvertierung, String-Nummer

    if(strnr<1) //Fehlerbehandlung
    {
        cout << "\aString-Fehler " << buf << " in Zeile: " << zeile << "\n";
        exit(1);
    }
    if(strnr>4)
    {
        cout << "\aString-Fehler " << buf << " in Zeile: " << zeile << "\n";
        exit(1);
    }

    return strnr;
}

**** mkstring -> mkwinkel ****

int mkconvert(char mkstring[20]) //Wandelt den String Magnetkompaß-Winkel
{ //in eine Integerzahl um.
    //Kein Meßwert -> Alter Wert bleibt
    if(mkstring[1]!='N') //Ungleich 'N' -> Neuer Wert
    { //vgl $231.7 bzw $NoK!!
        mksubstr[0]=mkstring[1];
        mksubstr[1]=mkstring[2];
        mksubstr[2]=mkstring[3];
    }

    return atoi(mksubstr); //String -> Int, Rückgabe
}

```

****** Koppelkoordinaten wählen ******

*//DGPS-Abweichung von Rad+MK < 2m -> Pos. von DGPS
 //DGPS-Abweichung > 1m -> Pos. von Rad+MK, DGPS max 5x ignorieren
 //Ab 5 bordautonomen Hauptintervallen wird iteriert.
 //Der Iterations-Table gibt die Gewichtung und den Zeitpunkt an
 //d.h.: Die Koppelkoordinaten nähern sich wieder an das DGPS-System an*

```
void koppel(void)
```

```
{
```

```
    if(hypot(abs(xdgps-xkopp),abs(ydgps-ykopp))<2.0)
```

```
    {
```

```
        mkrzaehler=0;
```

```
        //Nav. nach DGPS
```

```
        xmkr=xdgps;
```

```
        //Neue Initialisierung Rad und kopp,
```

```
        ymkr=ydgps;
```

```
        //wenn Iterationsziel erreicht
```

```
        xkopp=xdgps;
```

```
        ykopp=ydgps;
```

```
    }
```

```
    else
```

```
    {
```

```
        switch(mkrzaehler)
```

```
        //Iterations-Table
```

```
        {
```

```
        case 0: gewicht1=0.00, gewicht2=1.00; break;
```

```
        case 1: gewicht1=0.00, gewicht2=1.00; break;
```

```
        case 2: gewicht1=0.00, gewicht2=1.00; break;
```

```
        case 3: gewicht1=0.00, gewicht2=1.00; break;
```

```
        case 4: gewicht1=0.00, gewicht2=1.00; break;
```

```
        case 5: gewicht1=0.10, gewicht2=0.90; break;
```

```
        case 6: gewicht1=0.15, gewicht2=0.85; break;
```

```
        case 7: gewicht1=0.20, gewicht2=0.80; break;
```

```
        case 8: gewicht1=0.25, gewicht2=0.75; break;
```

```
        case 9: gewicht1=0.30, gewicht2=0.70; break;
```

```
        case 10: gewicht1=0.35, gewicht2=0.65; break;
```

```
        case 11: gewicht1=0.40, gewicht2=0.60; break;
```

```
        case 12: gewicht1=0.45, gewicht2=0.55; break;
```

```
        case 13: gewicht1=0.50, gewicht2=0.50; break;
```

```
        case 14: gewicht1=0.55, gewicht2=0.45; break;
```

```
        case 15: gewicht1=0.60, gewicht2=0.40; break;
```

```
        case 16: gewicht1=0.65, gewicht2=0.35; break;
```

```
        case 17: gewicht1=0.70, gewicht2=0.30; break;
```

```
        case 18: gewicht1=0.75, gewicht2=0.25; break;
```

```
        case 19: gewicht1=0.80, gewicht2=0.20; break;
```

```
        case 20: gewicht1=0.85, gewicht2=0.15; break;
```

```
        case 21: gewicht1=0.90, gewicht2=0.10; break;
```

```
        case 22: gewicht1=0.95, gewicht2=0.05; break;
```

```
        case 23: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
```

```
        case 24: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
```

```
        case 25: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
```

```

        case 26: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
        case 27: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
        case 28: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
        case 29: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
        default: gewicht1=1.00, gewicht2=0.00; break;
    }

    mkrzaehler++;
    xkopp=gewicht1*xdgps+gewicht2*xmkr;
    ykopp=gewicht1*ydgps+gewicht2*ymkr;
}

//Die ersten 6 DGPS-Ausreißer werden ignoriert,
//-> Navigation nach Rad+MK
//Nach 6 bordautonomen Intervallen rücken die
//neuen kopp-Positionen in Richtung
//der DGPS Positionen
//Die DGPS-Pos. bekommen laufend mehr Gewicht,
//da das Rad+MK-Sys. abdriftet
}

/*****
*** Einleseroutinen ***
*****/

/**** String 1 lesen *****/

void string1(void) //SGPVTG: Daten einlesen
{
    fin >> buf;
    fin >> gpswinkel;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> gpsv;
    fin >> buf;
}

/**** String 2 lesen *****/

void string2(void) //SGPGGA: Daten einlesen
{
    fin >> buf;
    fin >> zeit;
    fin >> breite;
}

```

```

    fin >> buf;
    fin >> laenge;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> sat;
    fin >> pdop;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> corr;
    fin >> buf;
}

```

****** String 3/4 lesen ******

```

void string34(void)                                     //KVH: Daten einlesen Strings 3+4
{                                                       //Kompaß+Sensorik

    dlinks=-1*sumlinks;                                //Impulssumme der Radsensoren
    drechts=-1*sumrechts;                              //umwandeln in Imp. pro Intervall

    fin >> mkstring;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> sumlinks;
    fin >> buf;
    fin >> sumrechts;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> kvhwinkel;

    mkwinkel=mkconvert(mkstring);                      //String->Int, bei NoK alter Wert

    kvhwinkel=kvhwinkel/10;                            //Darstellung Vorkommastellen

    dlinks=dlinks+sumlinks;                            //-Alter Wert +Neuer Wert
    drechts=drechts+sumrechts;

}

```



```

/*****
*** Initialisierung, Startwerte bestimmen ***
****
//Vorraussetzg.: Quelldatei beginnt in der
//Reihenfolge $2, $4, $3...

void initialize(void)
{
    fin >> buf; //Strnr. entfernen
    string2(); //Der 1. Datensatz ist String 2

    xdgps=xconvert(laenge); //Startwerte DGPS-Koordinaten
    ydgps=yconvert(breite);

    xmkr=xconvert(laenge); //1. Kompaßposition = 1. DGPS-Pos.
    ymkr=yconvert(breite);

    xkopp=xconvert(laenge); //1. Koppelposition = 1. DGPS-Pos.
    ykopp=yconvert(breite);

    fin >> buf; //Strnr. entfernen

    fin >> buf; //Der 2. Datensatz ist String 4
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> sumlinks; //Startwert Radsensor links
    fin >> buf;
    fin >> sumrechts; //Startwert Radsensor rechts
    fin >> buf; //(Die 1. Differenz enthält 2 Intervalle)
    fin >> buf;
    fin >> buf;

    fin >> buf; //Strnr. entfernen

    fin >> mkstring; //Der 3. Datensatz ist String 3
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> buf;
    fin >> kvhwinkel;

    mkwinkel=mkconvert(mkstring);

```

```

kvhwinkel=kvhwinkel/10;           //Startwert kvhwinkel

strzaehler2++;
strzaehler3++;
strzaehler4++;

}

//*****
/** Ausgaberroutinen ***
//*****

/** -> Zielfile bei Hauptintervall *****

void ausgabe2(void)                //Ausgabe bei einem Vielfachen des
{                                   //Aufrufes der Routine

    if(filter==filterwert)         //zB: filterwert=3 -> jedes 3.Interv.
    {                               // (In den Auswertungen immer 1)
        fout << strnr << "\t";     //ausgabe2() wird nur bei case 2 auf-
        fout << zeit << "\t";      //gerufen: Abstände ein vielfaches
        fout << sat << "\t";      // des DGPS Intervalls [$2...$2]
        fout << pdop << "\t";
        fout << corr << "\t";
        fout << xdgps << "\t";
        fout << ydgps << "\t";

        fout << xmkr << "\t";
        fout << ymkr << "\t";

        fout << xkopp << "\t";
        fout << ykopp << "\t";
        fout << mkrzaehler << "\n";

        //fout << sumlinks << "\t"; //für Geschwindigkeitsverifizierung
        //fout << sumrechts << "\t"; //vgl gpsv und v(Rad)
        //fout << gpsv << "\n";

        //fout << gpswinkel << "\n"; //Kommentarzeichen, um jeweils nur
        //fout << mkwinkel << "\t"; //bestimmte Parameter zu untersuchen
        //fout << kvhwinkel << "\t"; //MW über 1 DGPS-Intervall
        //fout << mkmittel << "\t"; //Zum Beurteilen der Kompaßsysteme
        //fout << kvhmittel << "\n";

        outzaehler++;              //DS-Ausgabe zählen

```

```

    filter=0;
    }

    else
    filter++;
}

/** -> Zielfile bei $3/4 ****

void ausgabe34(void)                                     //Ausgabe bei String 3 bzw 4
{                                                         //Zur Untersuchung der Parameter
                                                         //innerhalb eines DGPS-Intervalls
                                                         //(nicht kursiv, da variable Kommentarzn.

    //cout << strnr << "\t";
    //cout << zeit << "\t";
    //cout << sat << "\t";
    //cout << pdop << "\t";
    //cout << corr << "\t";
    cout << xdgps << "\t";
    //cout << ydgps << "\t";

    //cout << kvhwinkel << "\n";
    //cout << sin(kvhwinkel) << "\t";

    //cout << dlinks << "\t";
    //cout << drechts << "\t";

    //fout << "\t\t\t\t";

    cout << xmkr << "\t";
    //cout << ymkr << "\n";

    cout << mkrzaehler << "\t";
    cout << xkopp << "\n";
    //cout << ykopp << "\n";
}

/** Bildschirmausgabe ****

void ausg_screen(void)                                   //Kontrolldaten am Bildschirm
{

    cout << "Anzahl ausgewerteter Datensätze:\n";
    cout << "\nString 1 - $GPVTG: " << strzaehler1;
    cout << "\nString 2 - $GPGGA: " << strzaehler2;
    cout << "\nString 3 - $KVH : " << strzaehler3;
    cout << "\nString 4 - $NoK : " << strzaehler4;
    cout << "\n\nSumme:          " <<
    strzaehler1+strzaehler2+strzaehler3+strzaehler4;
    cout << "\nVgl mit Zeilen:  " << schlusszeile+3;
}

```



```

        kvhsum=kvhwinkel;
        kvhzaehler=0;

    } break;

    case 3: { string34();                //§3,4 einlesen

        xmkrsum();                      //Position Sensorsys. addieren
        ymkrsum();                      //für MK+Radkurs

        strzaehler3++;

        mksum=mksum+mkwinkel;          //MW-Bildung für
        mkzaehler++;                   //Kompaßvergleich
        kvhsum=kvhsum+kvhwinkel;
        kvhzaehler++;

        //ausgabe34();

    } break;

    case 4: { string34();                //§3,4 lesen

        xmkrsum();
        ymkrsum();

        strzaehler4++;

        mksum=mksum+mkwinkel;
        mkzaehler++;
        kvhsum=kvhsum+kvhwinkel;
        kvhzaehler++;

        //ausgabe34();

    } break;

    default: cout << "\aFalsche Stringnummer\n";
}
}
    ausg_screen();                      //Bildschirmausgabe Statistik

    return 0;                            //EOF
}
//*****
*****

```

7.2 Quellcode trennfor.cpp

```

/*****
/****                               Ch. Seebauer 01.95                               ****
/****   Trennzeichen suchen und ersetzen zur Datenaufbereitung   ****
/****                               Quelltext trennfor.cpp                               ****
/****
#include <fstream.h>                               //Einbinden

int main(void)                                     //Programm-Schleife
{

    char ch;                                       //Initialisierung
    char quelldatei[20];
    char zieldatei[20];
    long zeilen=0;                                 //Zeilenzähler
    long zeichen=0;                                //Zeichenzähler
    long ersetzt=0;                                //Ersetzt-Zähler

/**** Eingabe Quelldatei, Zieldatei *****/

    cout << "*** Trennzeichen-Umwandlung .-> , ***\n\n";
    cout << "Quelldatei: ";                         //Dateinamen eingeben
    cin >> quelldatei;
    cout << "Zieldatei: ";                           //Dateinamen eingeben
    cin >> zieldatei;
    cout << "\n";

    ifstream fin(quelldatei);                       //Objekte erzeugen
    ofstream fout(zieldatei);

/**** Trennzeichenumwandlung *****/

    while (fin.get(ch))                             //Schleife bis zum Dateiende EOF
    {
        zeichen++;                                  //Anzahl der gelesenen Zeichen

        switch(ch)                                  //Trennzeichen suchen + ersetzen
        {
            case '!':                               //Punkt -> Komma
            {
                fout << ',';
                ersetzt++;
                break;
            }
        }
    }

```

```

        case ',':           //Komma -> Tabulator
        {
            fout << '\t';
ersetzt++;
            break;
        }

        case '\n':        //\n zählen           //Datensätze zählen
        {
            zeilen++;
fout << '\n';

            break;
        }

        default:fout << ch;           //Rest beibehalten
    }

}           //Kontrollausgabe Bildschirm
cout << zieldatei << " enthält " << zeichen << " Zeichen in "
<< zeilen << " Zeilen\n\n";
cout << "Es wurden " << ersetzt << " Trennzeichen ersetzt";

return 0;           //EOF
}

```

```

//*****

```

```

//*****

```

8 Literaturverzeichnis

- [1] Ashtech XII, GPS Receiver Operating Manual, März 1992
Ashtech

- [2] Design & Elektronik -Serie
Das Global Positioning System
Mattos Philip, SGS-Thomson

- [3] Elrad-Serie
Vierundzwanzig fixe Sterne
Schänzer Gunther

- [5] GPS Global Positioning System
Kumm Werner

- [6] GPS und Glonass Statusreport vom 11. Mai 1994 der Referenz- und
Monitorstation der DLR in Oberpfaffenhofen
Th. Jülg, N. Kloss

- [7] GPSCard OEM Performance Series
2100 Series User Manual
NovAtel

- [8] Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung
TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik
Auernhammer Hermann

- [9] Navigation für Expeditionen, Touren, Törns und Reisen.
Orientierung in der Wildnis
Willi Kahl

- [10] Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991
TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik
Demmel M., Muhr Th., v. Perger P., Rottmeier J., Auernhammer H.
- [11] Positionsbestimmung durch Satelliten (GPS)
N. Kloss
- [12] Service Bulletin SB 1800-1
International Marketing Division, 1993
GPS Positioning Engine Model GN-72,
Furuno
- [13] Standortsspezifische Landbewirtschaftung
Geokonzept, Adelschlag
Muhr Thomas
- [14] Technische Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld
TUM Weihenstephan, Institut für Landtechnik
Muhr Th., Auernhammer H.
- [15] Vermessung und Ortung mit Satelliten
Bauer Manfred
- [16] Positionsbestimmung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen für die Entwicklung
ökologisch optimierter Anbauverfahren
Gelbes Heft 53
Bayrisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- [17] Navstar/ Global Positioning System GPS(1)
Bauersima 1992
- [18] Application of NAVSTAR-GPS to Geodesy in Canada
Wells D., Vanicek und Delikaraoglu 1981

- [19] High Precision C/A-Code Technology for Rapid Static DGPS Surveys
Lachapelle, Cannon, Erickson 1992

- [20] Signal Structure and Performance Characteristics. Navigation Vol 1.
Spilker J.J. 1980

- [21] Handbuch der Satellitennavigation
GPS Technik-Geräte-Anwendung
Bachmann Peter 1993