

**Verfügbarkeit und Genauigkeit
von Satellitennavigations- und Korrekturdaten
in unterschiedlichen Umgebungen**

FKZ 50 NA 9920

(Laufzeit Juli 1999 – Juli 2001)

Schlussbericht

Oktober 2001

Zuwendungsempfänger:

Universität Stuttgart
Keplerstr. 7
70174 Stuttgart

Ausführende Stelle:

Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24/D
70174 Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen bei der Durchführung	3
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
1.5	Zusammenarbeit	4
2	Ergebnisbericht	4
2.1	Ausstattung des Meßfahrzeugs	4
2.1.1	Grundausrüstung im Messfahrzeug	4
2.1.2	Messgeräte, Signal- und Datenfluss	4
2.2	Positionsbestimmung mittels Applanix-System	9
2.2.1	Applanix-System	9
2.2.2	Berechnung und Genauigkeit der Fahrzeugposition	10
2.3	Messfahrten	12
2.3.1	Klassifizierung der Testgebiete nach Satelliten-Empfang	12
2.3.2	Klassifizierung der Testgebiete nach DGPS-Empfang	13
2.3.3	Aufstellung des Meßplans	14
2.4	DGPS-Dienste (Korrekturdaten)	20
2.4.1	Angaben zu den Korrekturdatendiensten	20
2.5	Auswertung der Messdaten	22
2.5.1	Analyse des Korrekturdatenempfangs	22
2.5.2	Vergleich von DGPS-Korrekturdaten	32
2.5.3	Beurteilung in Abhängigkeit der Umgebung	39
2.5.4	Verfügbarkeit und Alter der DGPS Korrekturen während der Messfahrten	47
2.6	GPS – Positionsgenauigkeiten	53
2.6.1	Analyse des Satellitenempfangs	53
2.6.2	Auswirkung der Korrekturdaten auf die Positionsgenauigkeit bei unterschiedlichen Empfängern	54
2.6.3	Beurteilung in Abhängigkeit der Umgebung	59
2.7	GPS – Pseudorange-genauigkeiten	61
2.8	Erfahrungen mit EUROFIX und EGNOS	71
2.9	Schlussbetrachtung	73
2.9.1	Verbesserungsmöglichkeiten	73

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

In der Fahrzeugnavigation stehen vermehrt auch Navigationssysteme zur Verfügung, die jederzeit und an jedem Ort eine Positionsbestimmung mit ausreichender Genauigkeit erlauben und damit die Voraussetzung für eine Führung an ein gewünschtes Ziel ermöglichen sollen. Hier können mehrere Komponenten genutzt werden, um diese Aufgabe zu erfüllen, fahrzeugeigene Sensoren, digitales Kartenmaterial, Radio(Satelliten)navigation mit/ohne Stützung, etc. Die Satellitennavigation, hier hauptsächlich GPS, hat bei den Systemen bereits eine dominierende Rolle übernommen und ist in der Funktion der Positionsbestimmung sowie der fortlaufenden Kontrolle und Verbesserung nicht mehr wegzudenken. Neben der reinen Satellitennavigation werden noch verschiedene Dienste zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von GPS angeboten. Diese Dienste stellen die Daten über verschiedene Vertriebswege zur Verfügung, wobei hier nur die Funkdienste betrachtet werden, die die Verbesserung in Echtzeit für die Navigationsaufgabe ermöglichen.

Mit der in diesem Projekt vorgeschlagenen Untersuchung wird eine systematische Überprüfung der Satellitennavigation für Landanwendungen durchgeführt, die gleichzeitig die zur Zeit angebotenen Dienste für differentielles GPS mit validiert. Da die erreichbare Datenqualität u.a. wesentlich von den Umgebungsbedingungen des durchfahrenen Gebiets abhängt, werden Testregionen in typische Klassen eingeteilt und durch Testfahrten und direkte Messungen innerhalb der klassifizierten Teilgebiete beispielhaft erfasst und analysiert.

Durch die dargelegten Ergebnisse wird eine Beurteilung der Gesamtsituation für die Anwendung der Satellitennavigation im Landverkehr unter unterschiedlichen örtlichen Bedingungen gegeben. Die Qualitätsanalyse erstreckt sich hierbei sowohl auf die Satellitennavigationsdaten als auch auf den Empfang der differentiellen Korrekturdaten. Damit werden praxisnahe Informationen für den Einsatz der Satellitennavigation auf verschiedenen Anforderungsniveaus geboten, so dass dann durch geeignete Profile die Nutzbarkeit für die verschiedenen Anwendungen abgeschätzt werden können.

Als Gesamtziel gibt diese Analyse Aufschluss über die Genauigkeit der Satellitennavigation für die verschiedenen Anwendungsbereiche und beschreibt in einer weiteren Betrachtung die zusätzlichen Systemanforderungen, die diese Systemschwächen beheben bzw. verringern könnten.

1.2 Voraussetzungen bei der Durchführung

Die Durchführung dieses Messvorhabens war an die Verfügbarkeit des Messfahrzeugs geknüpft. Dieses Messfahrzeug, das mit seiner Ausrüstung noch näher in Abschnitt 2.1 vorgestellt wird, ist Eigentum des Instituts und eigens für wissenschaftliche Aufgabenstellungen und für die Lehre ausgestattet. Neben der Grundausstattung des Fahrzeugs wurden für dieses Projekt weitere Messgeräte, GPS-Empfänger und zusätzlich entwickelte Hardware eingebaut.

Während der Projektlaufzeit standen uns zeitweilig weitere Empfangskomponenten leihweise zur Verfügung. Hierbei handelte es sich um einen Eurofix- und einen EGNOS-Empfänger, über die beide der Empfang von überregionalen Korrekturdaten möglich ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist in dem Status des GPS-Satellitensystems und der DGPS-Dienste zu sehen. So wurde z.B. während der Laufzeit die GPS-Verschlechterung S/A abgeschaltet und verursachte eine einschneidende positive Veränderung in den Genauigkeiten bei GPS und auch beim zeitlichen Verlauf der zur Verfügung stehenden Korrekturdaten. Die GPS-Dienste werden im Abschnitt 2.5 vorgestellt und verglichen. Beim GPS kann der Status des Systems durch die Anzahl der zur Zeit betriebsbereiten Satelliten beschrieben werden. Hier waren während der ganzen Messzeit immer mehr als 25 Satelliten operationell und damit immer eine ausreichende Anzahl von Satelliten für die Positionsbestimmung verfügbar. Dies war bei GLONNAS nicht gegeben, da hier nur weniger als 10 Satelliten betriebsbereit und nutzbar waren.

Bei den DGPS-Diensten war z.B. das 2m Band im Raum Stuttgart während der Projektzeit noch nicht eingerichtet, so dass Untersuchungen zu diesem Dienst nur im Karlsruher Raum durchgeführt werden konnten.

1.3 Planung und Ablauf

Aufbereitung des Meßsystems: Die Ausgangsbasis war das institutseigene Messfahrzeug mit seiner Grundausrüstung. Die Ergänzung der Messeinrichtung wurde entsprechend der Erfordernisse für das Projekt geplant und vorgenommen. Eine ausführliche Darstellung findet sich im Abschnitt 2.1.

Auswahl von Messgebieten und der Messzeiten: Bei der Auswahl der Messgebiete und der Messzeiten wurde der jeweilige Ausbaustatus der DGPS Dienste berücksichtigt. Bei den Zeiten für die Durchführung der Messfahrten ergaben sich Verschiebungen, die durch die Fehler beim Referenznavigationssystem bedingt wurden, so dass in der Winterphase 2000/2001 keine Messungen durchgeführt werden konnten.

Probleme während der Messungen bzw. bei der Auswertung: Hier bereitete ein fehlerhaftes Kabel bei dem Referenznavigationssystem APPLANIX Schwierigkeiten, da der Fehler nicht messtechnisch ermittelt werden konnte und die Auswertung der Navigationsdaten nur für Teilstücke oder gar nicht erlaubt. Erst nach langwierigen Rücksprachen und Datenanalysen beim Hersteller konnte der Fehler eingekreist und letztendlich das defekte Kabel ersetzt werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Verfügbarkeit von nationalen bzw. internationalen Informationen zur erfassten gleichzeitigen Verfügbarkeit von GPS und DGPS-Diensten liegen nicht in einem gemeinsamen Untersuchungsergebnis vor. Meist sind nur die Effekte bei den einzelnen Komponenten analysiert und hier hauptsächlich die GPS-Komponente. Aber diese Untersuchungen sind nicht auf eine allgemeine Aussage für ein breites Nutzerspektrum angelegt, sondern beleuchten spezielle Fragestellungen und besondere Effekte.

1.5 Zusammenarbeit

Entsprechend der Interessenbekundung der beiden Firmen –Daimler und Alcatel – nahmen Vertreter auf dem Workshop teil. Eine direkte Zusammenarbeit im Rahmen der Projektarbeit war nicht vorgesehen, aber über fortlaufende Gespräche und über die Durchführung von Diplomarbeiten wurden die Interessen, hier von DaimlerChrysler, bei der Landnavigation bei den Messungen berücksichtigt.

2 Ergebnisbericht

2.1 Ausstattung des Messfahrzeugs

2.1.1 Grundausrüstung im Messfahrzeug

Für das Projekt stand das institutseigene Messfahrzeug, ein VW-LT, zur Verfügung, in dem die Messgeräte, Rechner und die zusätzliche Hardware eingebaut wurden. Die Grundausrüstung umfasst :

- Arbeitsplatte
- Geräteschrank zur Aufnahme der Messgeräte
- 24V DC-Versorgung
- 220V AC-Versorgung
- Zusatzhardware zur Übergabe der ABS-Pulse für alle Räder
- Fahrzeugnavigationssystem
- Vorrichtung zur Aufnahme der Antennen auf dem Autodach

Außerdem ist das Navigationssystem AV510 von Applanix für die hochgenaue und kontinuierliche Positionsbestimmung im Fahrzeug installiert und vermessen.

2.1.2 Messgeräte, Signal- und Datenfluss

Im Messfahrzeug ist eine Grundausrüstung an Geräten und Einbauten vorhanden, die neben der Leistungsversorgung auch die Basis für die Datenerfassung und die Aufnahme weiterer Geräte erlaubt. Für dieses Projekt wurden neben den verfügbaren Empfängern für GPS- und DGPS-Dienste speziell Messgeräte für die Erfassung der Signalleistung eingebaut. In der nachfolgenden Tabelle sind alle Geräte aufgelistet und die Messfunktion angegeben.

Gerät	Eingangssignale	Messgrößen	Speichermedium	Formate
TRIMBLE-SSI	GPS-Signale, DGPS-Korrekturdaten	Rohdaten, NMEA-Daten, Zeitinformation, PPS zur Synchronisation	Interner Speicher, Messrechner	Binär ASCII
ASHTECH GG24	GPS-Signale, DGPS-Korrekturdaten	Rohdaten NMEA-Daten	Messrechner	binär ASCII
Motorola Oncore	GPS-Signale, DGPS-Korrekturdaten	NMEA-Daten	Messrechner	ASCII
JAVAD	GPS-Signale	Rohdaten	Interner Speicher	binär
ALF-Empfänger	Langwellensignal	RINEX-Daten, Qualitätssignal	Verteiler, Messrechner	binär
AMDS-Empfänger	LW- und MW-Signale	RINEX-Daten	Messrechner	binär
RASANT	UKW-Signale	RINEX-Daten	Messrechner	binär
EPS-SAPOS	2m Band			
EUROFIX	LORAN-C DGPS-Korrekturdaten	RINEX-Daten	Messrechner	binär
EGNOS	GPS-Signale DGPS-Korrekturdaten	Navigationsdaten GPS verfügbar nur Datenalter	Interne Speicherung	Internes Format
Spektrumanalysator	Signale der Dienste	Signalleistung in dB	Messrechner	ASCII
Barometer	Luftdruck	Druck oder Höhe	Messrechner	ASCII
ABS	Radimpulse	Zählerstände	Messrechner	ASCII
APPLANIX-System	GPS und IMU	Rohdaten für Offline Auswertung (genaue Referenzpositionen)	Interne Speicherung	binär

Tabelle 2.1-1: Eingesetzte Messgeräte während des Vorhabens

Da die Verteilung der Signale von GPS und den Korrekturdaten auf die GPS-Empfänger, Korrekturdaten-Empfänger und Signalanalytoren ein zentrales Anliegen darstellte, wurde geeignete Hardware entwickelt und gebaut, um diese Verteilung und die Anpassung für die Messungen zu sichern. In Abb. 2.1-1 ist der Signalfluss im Messwagen dargestellt.

In Abbildung 2.1-1 sind die analogen Hochfrequenzdatenleitungen als durchgezogene Linien und die digitalen Datenleitungen als strichpunktierte Linien dargestellt. Eine zentrale Rolle spielt der Messrechner, mit dem über zusätzliche Schnittstellenkarten weitgehend alle Messdaten erfasst werden. Dieses neue Messwerterfassungssystem besitzt acht serielle Schnittstellen, eine IEEE 488 Schnittstelle und eine Karte mit fünf Ereigniszählern (z.B. für Radsensor, Odometer, u.s.w.), die Zeitsynchronisation erfolgt über den PPS des TRIMBLE-GPS-Empfängers.

Detailliert werden damit nun die folgenden Daten registriert:

- 1.) die binären UKW RDS / RASANT – Korrekturdaten,
- 2.) die binären EUROFIX – Korrekturdaten,
- 3.) die binären ALF – Korrekturdaten und BitQuality ALF
- 4.) die binären AMDS – Korrekturdaten,
- 5.) EUROFIX-ascii-Daten,
- 6.) ASHTECH GG24: NMEA-Daten (ascii) und Rohdaten (binär),
- 7.) TRIMBLE SSI: NMEA-DATEN, Time Tag und PPS,
- 8.) MOTOROLA ONCORE: NMEA-Daten,
- 9.) die Pegelwerte der Spektrumanalysatoren (für AMDS, ALF und UKW),
- 10.) die ABS-Signale,
- 11.) das Rückfahrcheinwerfersignal und
- 12.) die Barometerdaten.

Damit steht ein für dieses Projekt konzipiertes, funktionelles und einsatzbereites Meß- und Ortungssystem zur Verfügung. Durch die Zeitsynchronisation mit GPS ist eine einfache und auf 1µs genaue Zuordnung von Messdaten möglich. Auch GPS-Empfänger mit interner Datenspeicherung und das Applanix-System nutzen die gleiche Systemzeit GPS.

Empfangsantennen am Fahrzeug

Die hier zu untersuchenden Systeme nutzen als Informationsträger elektromagnetische Wellen. Für den ungestörten und optimalen Empfang dieser elektromagnetischen Signale im Fahrzeug müssen geeignete Antennen genutzt und auch richtig angebracht werden. Die Anordnung der Antennen auf dem Fahrzeugdach zeigt die folgende Abbildung 2.1-2

Es werden zwei verschiedene Antennen zum Empfang der Korrekturdaten über ALF und AMDS betrieben.

Die beiden um 90° gegeneinander verdrehten Ferritantennen, die dem ALF-Empfang dienen, sind räumlich getrennt und in einem geeigneten Abstand über dem Fahrzeugdach montiert. Damit wird eine gegenseitige Beeinflussung dieser beiden

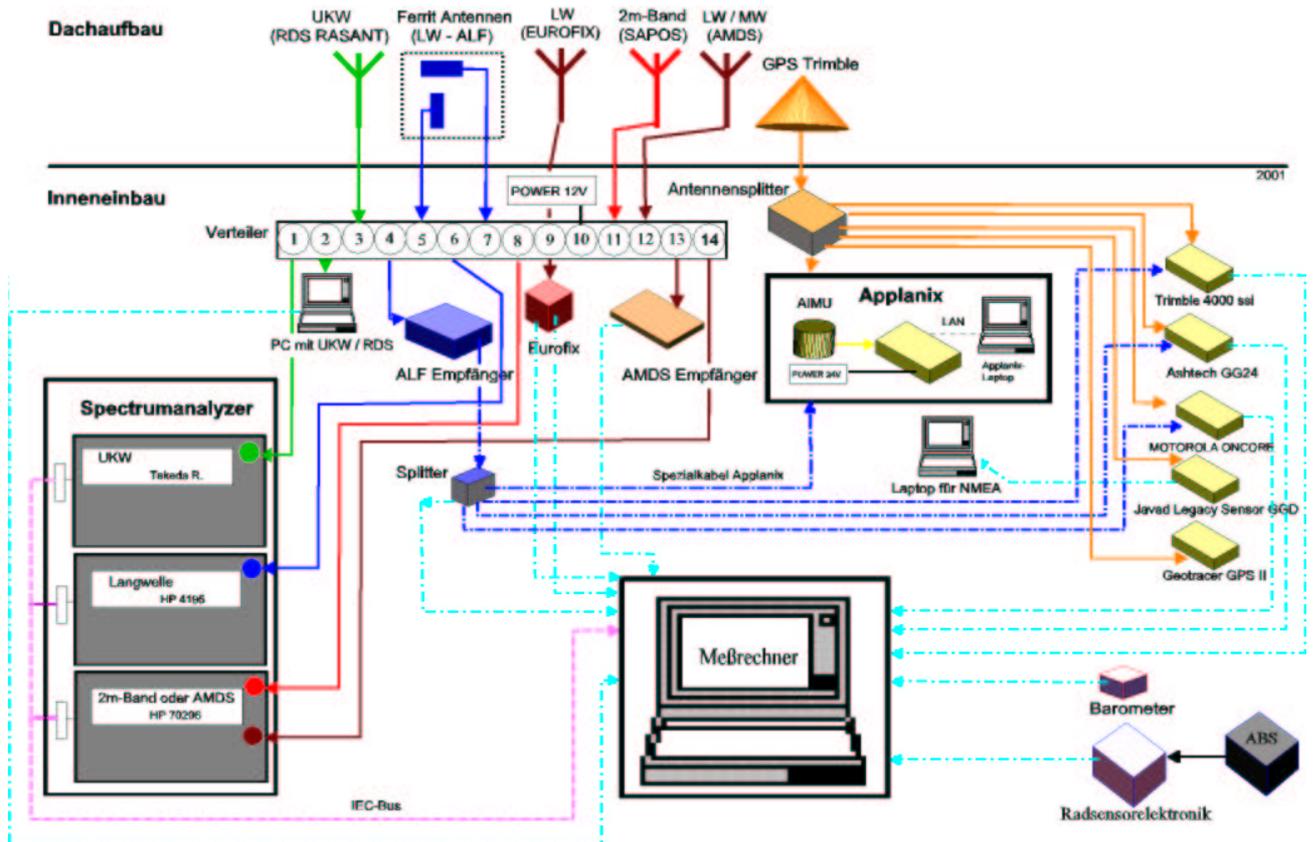


Abb. 2.1-1: Gesamtdarstellung des Messaufbaus

Antennen ausgeschlossen und eine Störung des Antennendiagramms vermieden. Für den AMDS-Empfang wird eine vom Verteiler der AMDS-dGPS-Box empfohlene Antenne eingesetzt. Dabei handelt es sich die aktive Empfangsantenne BCL-1-KA der Firma PROCOM (Dänemark). Da die Antenne mit dem eingebauten Vorverstärker den Eingang des AMDS-Empfängers übersteuerte, wurde zusätzlich ein Dämpfungsglied von 40 dB zwischengeschaltet. Dadurch wird ein zuverlässiger Empfang gewährleistet.

Eine EUROFIX-Antenne befindet sich als Leihgabe vorübergehend auf der Mittelposition des hinteren Dachträgers und wurde im Rahmen der Messfahrten 2001 mit eingesetzt.

Die SAPOS- und die UKW-Antenne befinden sich außen auf den Trägern. Die Lage der GPS-Antenne über der linken Fahrzeugsseite wurde gewählt, da sich diese Antennenposition während der Fahrt nahe der Straßenachsen befindet und sich dadurch in Straßenschluchten die Möglichkeit eines längs der Fahrzeugachse nahezu symmetrischen Satellitensignalempfangs eröffnet. Außerdem wird dadurch die Problematik der Abschattung von GPS-Signalen minimiert.

Die wesentlichen Anordnungen des Messaufbaus im Fahrzeuginneren zeigen die Abbildungen 2.1-3 – 2.1-6: Die Messgeräte sind im Geräteschrank und auf der Arbeitsplatte untergebracht. Ein besonderer Einschub im Messschrank nimmt die Hardware für die Signalverteilung und die kleinen OEM-Geräte auf. Die Messkonfiguration war während der Programmlaufzeit einer kontinuierlichen Verbesserung und Erweiterung unterworfen und stellt die z.Z. genutzte Version dar.

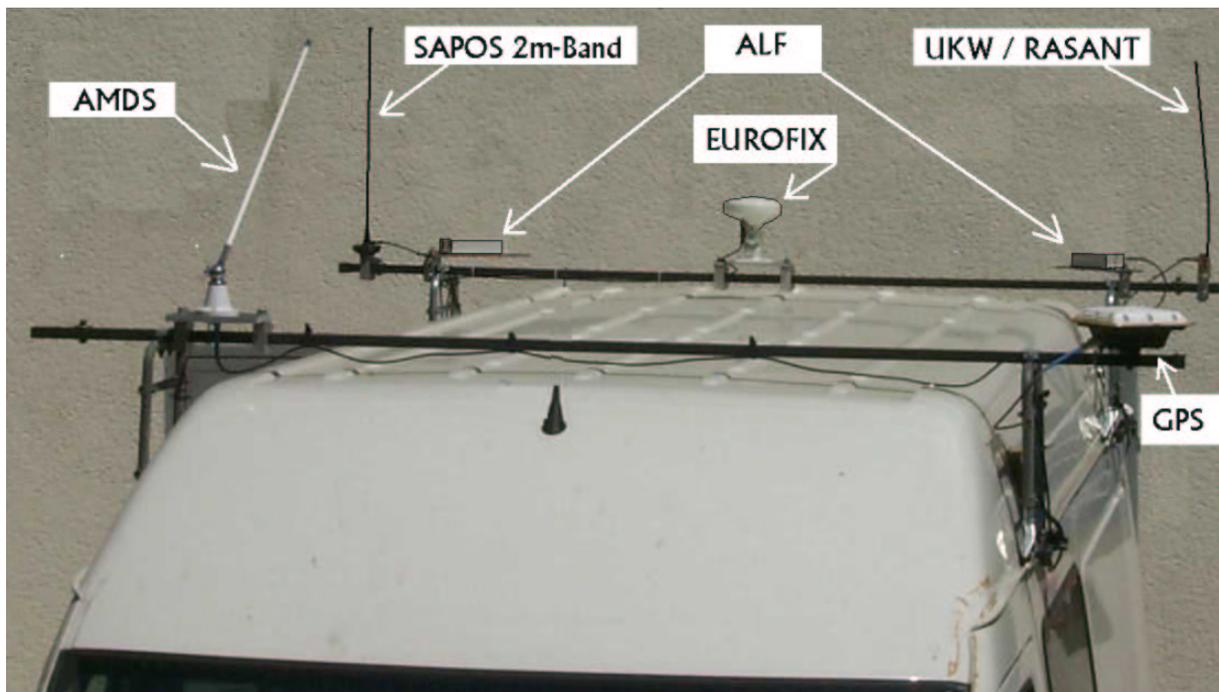


Abb. 2.1-2: Antennenausstattung

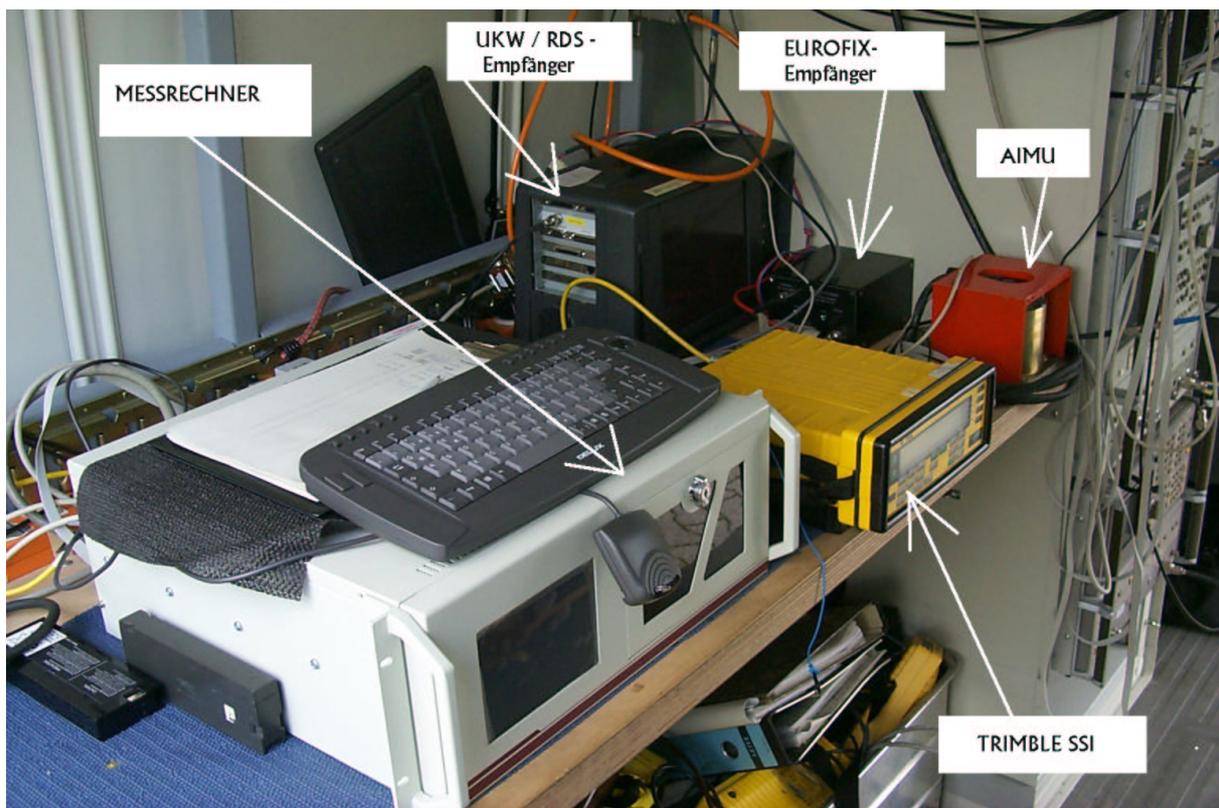


Abb. 2.1-3: Arbeitsplatte mit Messrechner und weiterer Hardwareausstattung im Fahrzeug

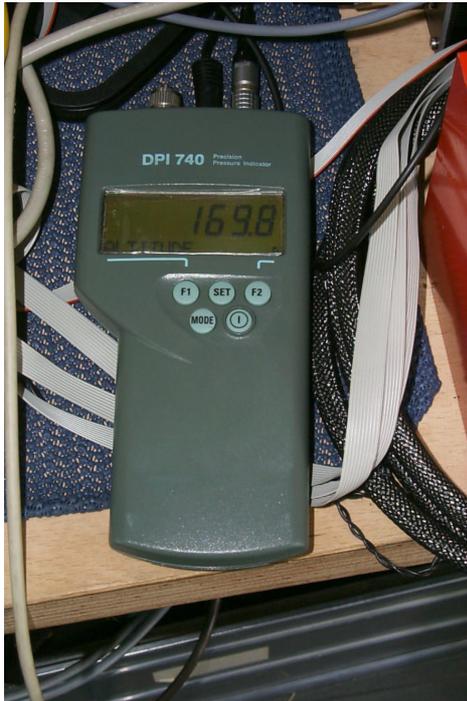


Abb. 2.1-4: Das Präzisionsbarometer

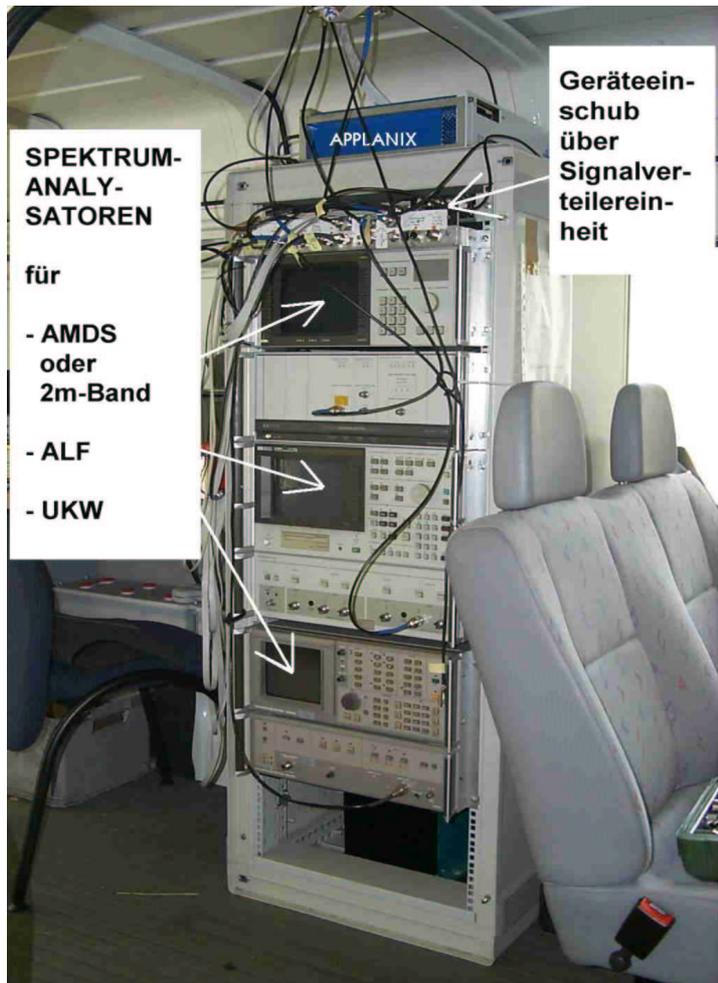


Abb. 2.1-5: Gesamtansicht 19" – Geräteschrank

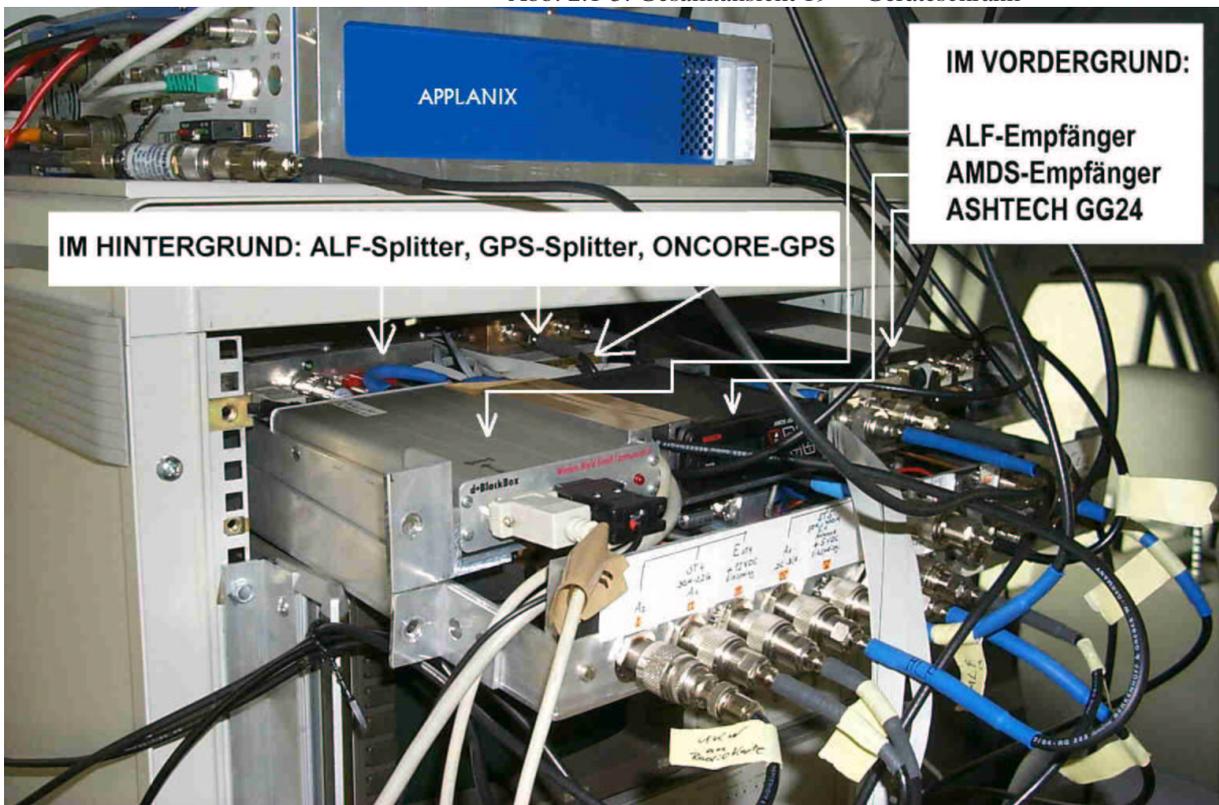


Abbildung 2.1-6: Geräteein-schub im 19"-Schrank (in herausgezogenem Zustand) mit Verteilerelektronik und Empfängern für GPS und Korrekturdaten

2.2 Positionsbestimmung mittels Applanix-System

Für eine qualitative und quantitative Beurteilung der Messergebnisse, ist es nötig ein übergeordnetes Meßsystem als Referenz zur Verfügung zu stellen. Ziel der Referenzmessungen ist die Ermittlung von zeitreferenzierten, hochgenauen Positionsdaten, die möglichst unabhängig durchgeführt werden. Dies erlaubt eine möglichst exakte georeferenzierte Darstellung der erfaßten Meßdaten. Die gefahrene Strecke einer jeden Meßfahrt wird von einem zusätzlichen Navigationssystem bestimmt werden. Die Anforderungen an das Navigationssystem sind wie folgt:

Lückenlose, kontinuierliche Positionierung
10 Hz Datenrate
Positionsgenauigkeit im Dezimeterbereich

Eine kontinuierliche Positionierung kann z.B. im innerstädtischen Bereich aufgrund von Signal-Abschattungen und weiteren Störeinflüssen mit GPS alleine nicht gewährleistet werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Inertialsensoren zwingend notwendig. Für diese Aufgabe wurde das am Institut für Navigation vorhandene Navigationssystem POS/AV 510 der Firma Applanix Corporation¹ eingesetzt.

2.2.1 Applanix-System

Dieses Positionierungs- und Orientierungssystem wurde in erster Linie für den Einsatz in Flugzeugen zur Echtzeit-Navigation und zur hochgenauen Erfassung der Flugtrajektorie (Post-Processing) konzipiert. Als primäre Navigationssensoren umfaßt das POS/AV einen Zweifrequenz NovAtel MiLLennium GPS Empfänger sowie eine sehr genaue dreiachsige inertielle Meßeinheit (AIMU).

Die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten beim Einsatz in hochkinematischen Fluganwendungen unter Voraussetzung einer fixierten differenziellen GPS Mehrdeutigkeitslösung (Phasenlösung) werden für die Position mit 0.05 bis 0.30 Meter angegeben. Diese hohen Genauigkeiten können aber nur dann erreicht werden wenn qualitativ hochwertiges GPS Datenmaterial der Auswertung zugrunde liegt. Im Gegensatz zum Einsatz in der Luft ist im Landverkehr je nach Meßgebiet mehr oder weniger häufig mit GPS Signalstörungen bis hin zu Signalverlusten zu einem, mehreren oder allen Satelliten zu rechnen. Die GPS Phasenlösung (Fixed Ambiguity Solution) wird dadurch drastisch erschwert und die Positionsgenauigkeit dementsprechend schlechter. Eine Begleiterscheinung bei der Prozessierung von (stark) gestörtem GPS Datenmaterial ist auch ein erhöhter Auswertearaufwand, weil die semi-automatische Prozesskette aufgrund der vielen manuellen Eingriffen kaum genutzt werden kann. Teilweise versagen sogar die in den GPS Auswerteprogrammen enthaltenen Datenvoranalyse-Routinen, sodaß das Beobachtungsmaterial oft manuell vorweganalysiert und korrigiert werden mußte.

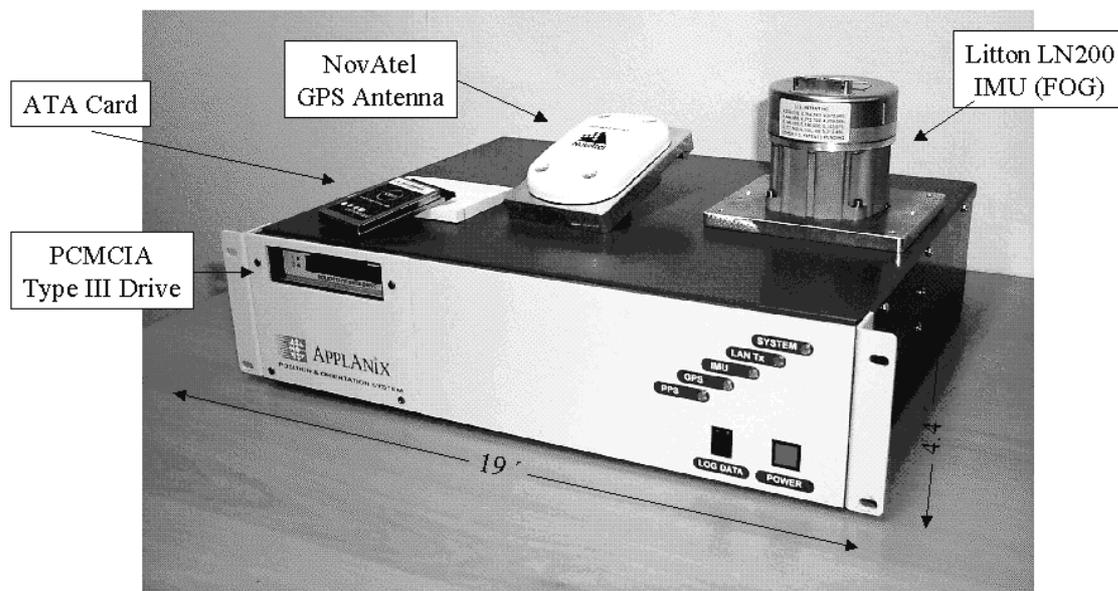


Abb.2.2-1: Applanix-Navigationsplattform

¹ Applanix Corporation, Richmond Hill, Ontario / Canada (URL: <http://www.applanix.com/>)

Das Navigationssystem von Applanix kann durch Messwerte von einem hochgenauen Barometer und den Radabgriffen des fahrzeuginternen ABS (Antiblockiersystem) bzw. eines optischen Wegstreckenmessers erweitert werden. Diese Zusatzsensoren bieten eine gewisse Verbesserung bei GPS-Ausfällen, die eine Überbrückung der Lücken erleichtert.

Die Integration von GPS und Inertialsensor (IMU – Inertial Measurement Unit) bietet nachfolgende Vorteile:

- ø Die IMU kann Ausfallzeiten des GPS überbrücken.
- ø Die Positionen können mit einer Datenrate von bis zu 200Hz ausgegeben werden.
- ø Es wird eine Trägerphasenauswertung im Post-Processing durchgeführt.
- ø Für die Satellitennavigation wird ein hochwertiger Zweifrequenz-GPS-Empfänger eingesetzt.

2.2.2 Berechnung und Genauigkeit der Fahrzeugposition

2.2.2.1 Die Erzeugung der Referenzpositionen mit dem Applanix-System

Die Integration der GPS Trajektorie mit den Inertialdaten erfolgt in einem dezentralen Kalman Filter - dezentral weil in diesem keine GPS Rohmessungen verarbeitet werden sondern bereits vorweg prozessierte Positionen, Geschwindigkeiten und Standardabweichungen. Daher erfolgt die Berechnung der Navigation in zwei Schritten:

Berechnung der GPS Trajektorie mit PosGPS²

Integration der GPS Trajektorie mit den Inertialdaten mit PosProc¹

Im ersten Schritt berechnet das Programm PosGPS aus den statischen GPS Referenzstationsdaten und den kinematischen GPS Fahrzeugdaten die gefahrene GPS Trajektorie. Als Meßgrößen werden C/A-Code Pseudoentfernungen, Phasenmessungen auf L1 und L2 sowie Dopplermessungen auf L1 erwartet. Da im Landverkehr aufgrund von Signalstörungen eine vollständige Berechnung der gefahrenen Trajektorie mittels fixierter Mehrdeutigkeitslösung nahezu unmöglich ist enthält die mit PosGPS prozessierte Fahrstrecke Positionsinformationen, die aus folgenden Berechnungsarten resultieren:

Fixed Ambiguity Solution (Positionsgenauigkeit: cm Bereich)

Float Ambiguity Solution (Positionsgenauigkeit: dm Bereich)

C/A-Code DGPS Solution (Positionsgenauigkeit: 0.5 bis 5 Meter)

Keine Positionsberechnung (zu viele Signalabschattungen oder andere Interferenzen)

Im zweiten Schritt berechnet das Programm PosProc unter anderem eine aus GPS und Inertialdaten kombinierte Positionslösung. Diese Berechnung umfaßt drei verschiedene Programmläufe, die zuerst die relevanten Kalman Filterparameter sowohl bestimmen als auch glätten und anschließend ausgeglichene Positionen berechnen. Im folgenden werden die Ergebnisse zweier Meßfahrten unterschiedlicher Qualität exemplarisch vorgestellt. Dabei bestimmt der Einfluß von GPS Signalstörungen zum Beispiel durch ein erhöhtes Meßrauschen bis hin zu kürzeren (einige Sekunden) oder längeren Signalunterbrechungen (einige Minuten) zu einzelnen Satelliten oder zu allen GPS Satelliten stark die Qualität der Auswertung. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die erreichten, theoretischen Genauigkeiten der Auswertung mit PosProc sowohl vor der Glättung der kombinierten Navigationslösung und der Kalman Filterparameter sowie nach der Glättung der ausgeglichenen Fahrtrajektorien. Diese verwendete Datenglättung basiert auf einem modifizierten Bryson-Frazier Glättungsalgorithmus und liefert eine bestmöglich geschätzte Fahrtrajektorie aufgrund von Meß- und Auswertinformationen. Außerdem wird bei der mathematischen Modellbildung zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit das konträre Fehlverhalten³ von GPS und AIMU berücksichtigt.

² Waypoint Consulting Inc., Calgary, Alberta / Canada (URL: <http://www.waypnt.com/>)

³ Ein Inertialsystem hat kurzzeitig betrachtet eine hohe Stabilität bzw. ein niederes Meßrauschen (short-term), während langfristig das Driftverhalten (long-term) Probleme verursacht. Bei GPS ist es genau umgekehrt - kurzzeitig besitzt GPS ein hohes Positions- bzw. Meßrauschen, langfristig betrachtet aber ein äußerst stabiles Verhalten.

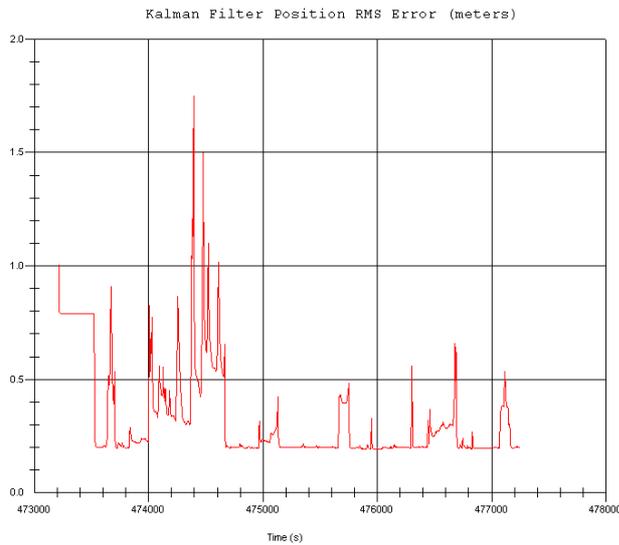


Abbildung 2.2-2: Beispiel 1, Ungeglättete Trajektorie

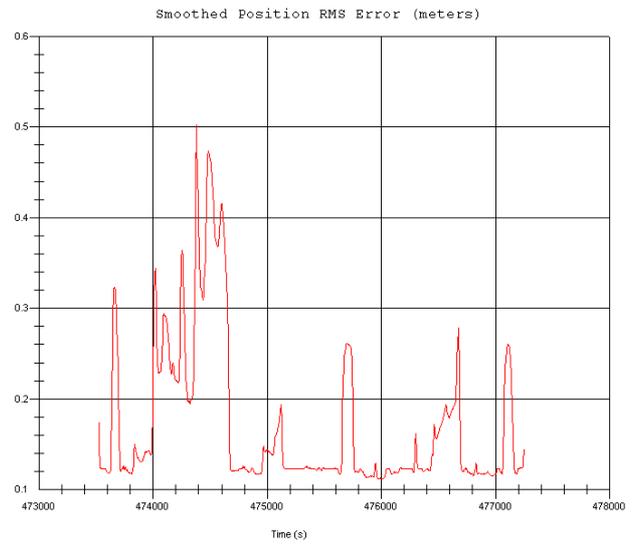


Abbildung 2.2-3: Beispiel 1, Geglättete Trajektorie

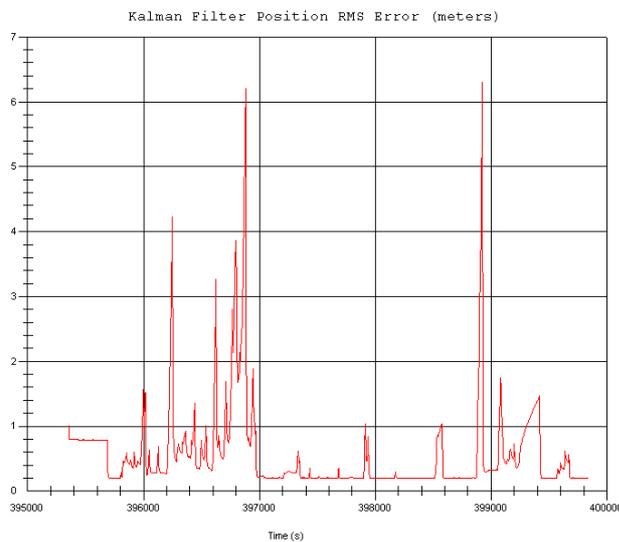


Abbildung 2.2-4: Beispiel 2, ungeglättete Trajektorie

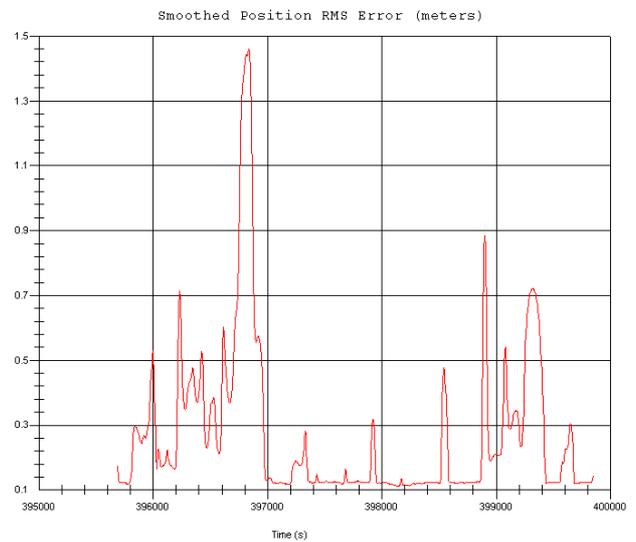


Abbildung 2.2-5: Beispiel 2, Geglättete Trajektorie

In den „Kalman Filter“ Grafiken (Abbildung 2.2-2 und 2.2-4) ist leicht erkennbar, daß sich die theoretische RMS Standardabweichung für die Position vom Dezimeter- bis Meterbereich bewegt. Der Verlauf dieser RMS Werte zeigt zeitweise Einbrüche in der Kontinuität. Dies ist in erster Linie auf die unterschiedliche Qualität der GPS Messungen und Auswertung zurückzuführen, die wie bereits erwähnt von der gelösten Mehrdeutigkeits-, Float-, C/A-Code DGPS Lösung bis hin zu Signalabbrissen zu allen Satelliten und somit zu Lücken in der GPS Trajektorie reicht. Diese GPS Qualität ist auch weitgehend identisch mit der Topographie entlang der Fahrstrecke. Im Falle solcher GPS Lücken stützt sich die Positionsrechnung dann nur noch auf das Inertialsystem, wobei je nach Dauer der Unterbrechung und Stabilität der Lösung das natürliche Driftverhalten eines jeden Inertialsensors eine mehr- oder weniger große Rolle spielt. In den Grafiken zeigen die Spitzenwerte solche GPS Lücken an, die sich hier meist im Bereich von mehreren Minuten bewegen und zu Ungenauigkeiten im Bereich von mehreren Metern führen.

Die „Smoothed“ Grafiken (Abbildung 2.2-3 und 2.2-5) zeigen die RMS Standardabweichungen nach der Datenglättung und beschreiben die Qualität der fertig prozessierten Fahrtrajektorien. Diese Trajektorien sind dann Grundlage für die anschließende Georeferenzierung der während der Meßfahrt erfaßten Navigationssignale. Im Vergleich zu den „Kalman Filter“ Grafiken ist das Niveau der Standardabweichungen bei Einbrüchen in der Kontinuität deutlich kleiner. Es sind zwar noch die selben Einbrüche in der Genauigkeit erkennbar, jedoch sind diese mindestens um den Faktor 3 reduziert. Der Grund für diese Verbesserung liegt im mathematischen Modellansatz der Navigationsdatenprozessierung. Während die Standardabweichungen aus den „Kalman Filter“ Grafiken nur aus einem Vorwärtslauf des Auswerteprogramms PosProc resultieren (Straight-Forward-Loop) ergeben sich die Standardabweichungen der „Smoothed“ Grafiken aus dem Vorwärtslauf und einem Rückwärtslauf unter Verwendung der Ergebnisse aus dem Vorwärtslauf (Forward-Reverse-Loop). Dadurch werden unter anderem Lücken in der GPS Trajektorie z.B. aufgrund eines Straßentunnels nicht nur von einer Berechnungsrichtung her überbrückt sondern auch von der inversen und kombiniert. Diese Vorgehensweise garantiert eine stabilere Auswertung und eine höhere Genauigkeit der Navigationslösung.

Aus einer empirischen GPS Datenanalyse geht weiterhin hervor, daß das GPS Datenmaterial des NovAtel MiLLennium Empfängers, insbesondere die Dopplermessung, aus dem Jahre 2000 ein höheres Meßrauschen enthält als das von 2001. Diese Eigenheit ist vermutlich auf interne Störeinflüsse im Meßfahrzeug selbst zurückzuführen. Aus diesem und weiteren Gründen wurde auch Anfang 2001 die Signalelektronik optimiert und dadurch beträchtlich verbessert.

Generell kann bei den vorliegenden Fahrtrajektorien davon ausgegangen werden, daß je nach GPS Lösung folgende theoretische Genauigkeiten vorliegen:

	Fixed Ambiguity Trajektorie	Float Ambiguity Trajektorie	C/A Code DGPS Trajektorie	Keine GPS Trajektorie
Positions-RMS [m]	0.05 – 0.10	0.10 – 0.30	0.50 – 2.00	2 – 12 (max.)

Tabelle 2.2-1: Zusammenstellung der theoretischen Genauigkeiten

Je nach Häufung und Dauer von GPS Signalstörungen und Unterbrechungen ist in den Positionen zusätzlich noch mit Einflüssen bedingt durch das normale Driftverhalten des Inertialsensors zu rechnen. Diese Zeitbereiche können jedoch, wie die Abbildungen 2.2-3 und 2.2-5 zeigen, leicht lokalisiert werden. Angaben über die Absolutgenauigkeit der Positionen können an dieser Stelle nicht gemacht werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die Absolutgenauigkeit der Fahrtrajektorien in etwa den theoretischen Genauigkeiten aus Tabelle 2.2-1 entspricht.

2.3 Messfahrten

Das Aufstellen eines umfassenden Messplans hat zum Ziel, Testfahrten unter allen typischen Bedingungen durchzuführen. Die Testgebiete wurden daher nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- örtliche Umgebungsparameter (z.B. Abschattungen, Reflexionen, Dämpfung)
- zeitlich variable Umgebungsparameter (z.B. Wetter)

2.3.1 Klassifizierung der Testgebiete nach Satelliten-Empfang

Parameter, die den Satellitenempfang beeinträchtigen und somit Einbußen bei der Positionsbestimmung verursachen sind

- Abschattungen der Signale
 - ◊ lückenhafte Positionsbestimmung bei zu geringer Zahl an Messwerten (< 3 Satelliten)
 - ◊ plötzliche Änderung der Satellitenzahl (Verlust bzw. Neuquisition bei Abschattung)
 - ◊ schlechter DOP-Wert
- Satellitenwechsel
 - ◊ sprunghafte Änderung der geometrischen Bedingungen
- Reflexionen, Streuung
 - ◊ Verfälschung der Messungen durch Mehrwegesignale
 - ◊ falsche Messungen bei alleinigem Empfang der Umwegesignale
- Störsignale
 - ◊ Abschwächung der Signale
 - ◊ Ausfall von Signalen
- Dämpfung
 - ◊ Empfang schwacher, verrauschter Signale
 - ◊ Ausfall von Signalen

Diese Situationen zeigen sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Umgebung, die Bebauung, Vegetation oder offenes Gelände bestimmen und in der sich bewegte Objekte befinden können. Es lassen sich folgende Klassen unterscheiden:

Art der Bebauung:

- Großstadt (Haushöhen > 3 Stockwerke, Straßen ein-, mehrspurig, reflektierende Flächen aus Stahl und Beton)
- mittlere Bebauung (Haushöhen < 3 Etagen, Straßen einspurig)
- niedrige Bebauung (Einzelstehende Häuser, einzelne Bäume, offenes Gelände)

Art des Bewuchses:

- Wald
- Allee
- einzelne Bäume am Straßenrand
- offenes Gelände (Überlandstraße)

Art der Witterung:

- normale trockene Bedingungen
- Niederschläge (Schnee; starker Regen)
- Situation nach Niederschlägen

Sondersituationen:

- Autobahn (frei, mehrspurig, Einschnitte, Busse+LKWs)

2.3.2 Klassifizierung der Testgebiete nach DGPS-Empfang

Die Empfangsbedingungen für die verschiedenen DGPS-Dienste richten sich im wesentlichen nach der unterschiedlichen Reichweite der Sender, sowie der verwendeten Frequenzen. Die Kennwerte der Dienste innerhalb von SAPOS sind in Tabelle 2.3-1 aufgezeigt.

Dienst	Frequenz	Sender	Reichweite
EPS-LW/RDS (ALF)	122,5 kHz	Mainflingen	ca. 600 km
EPS-UKW/RDS (RASANT)	UKW-3-Verkehrsfunksender (SWR3 = 95,3 MHz)	z.B. Stuttgart Fernsehturm	ca. 100 km
HEPS-2m-Band	ca. 160 MHz	Karlsruhe, Heidelberg, Iffezheim, Stuttgart	ca. 20 km – 40 km

Tab.2.3-1: SAPOS-Dienste in Baden-Württemberg

Die Qualität der Korrekturdaten wird durch folgende Einflüsse bedingt:

- Entfernung zur Referenzstation bzw. Vernetzung der Referenzstationen
- Alter der Korrekturdaten (abhängig vom Übertragungsweg Referenzstation zum Sender und Entfernung zum Sender)
- Übertragungsrate
- Bitfehlerrate

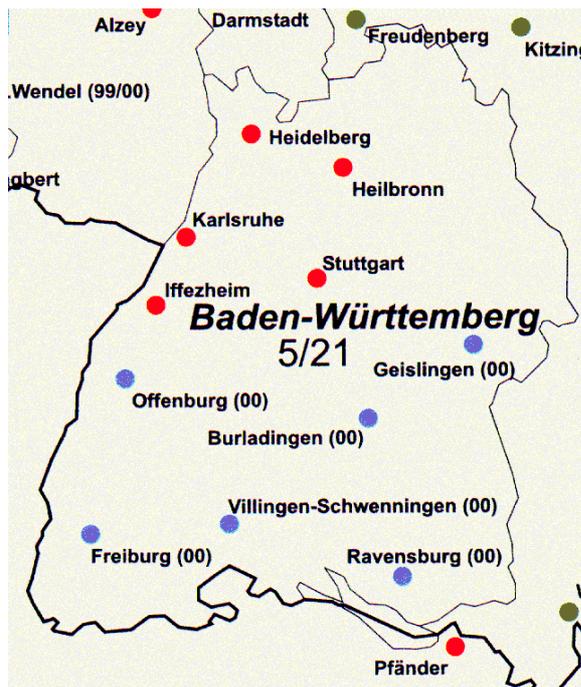


Abb.2.3-1: Referenzstationen (rot in Betrieb)

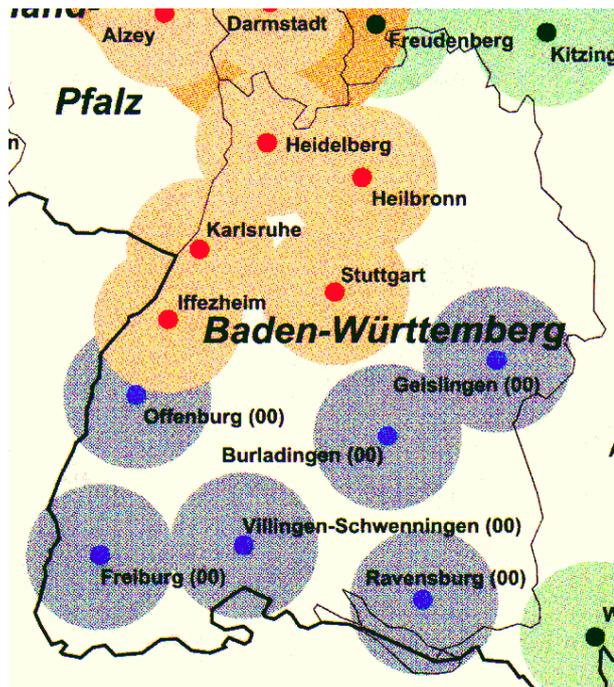


Abb.2.3-2: 2m-Band-Funksender (rot in Betrieb)

Problemsituationen können in nachfolgenden Fällen auftreten:

- Verzögerungen durch lange Übertragungswege vom Referenzempfänger zum Sender (siehe Abb.2.3-3)
- Abschattungen des Empfangs
- Wechsel des UKW-Senders in Randzonen
- Wechsel des 2m-Band-Senders in Randzonen
- Störsignale

Aufgrund des momentanen unvollständigen Ausbaustadiums in Baden-Württemberg müssen die Testgebiete anhand der vorhandenen Überdeckungsgebiete ausgewählt werden. Dies ergibt insbesondere für den 2m-Band-Empfang sehr starke Einschränkungen.

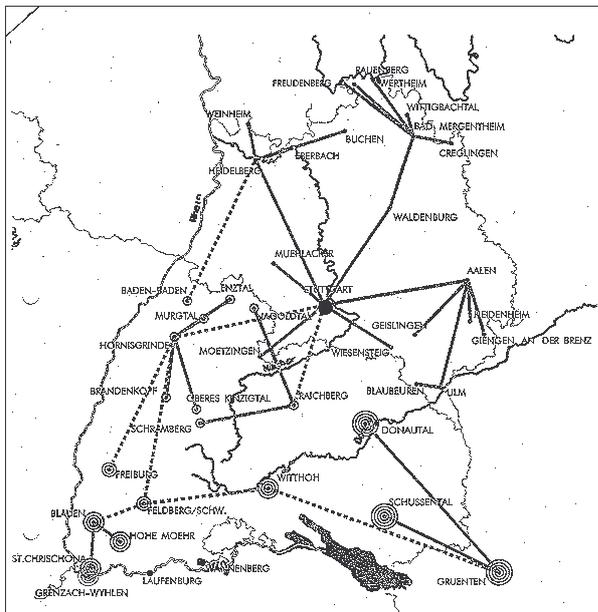


Abb. 2.3-3: Übertragungsstrecken der Korrekturdaten mit Knotenpunkten

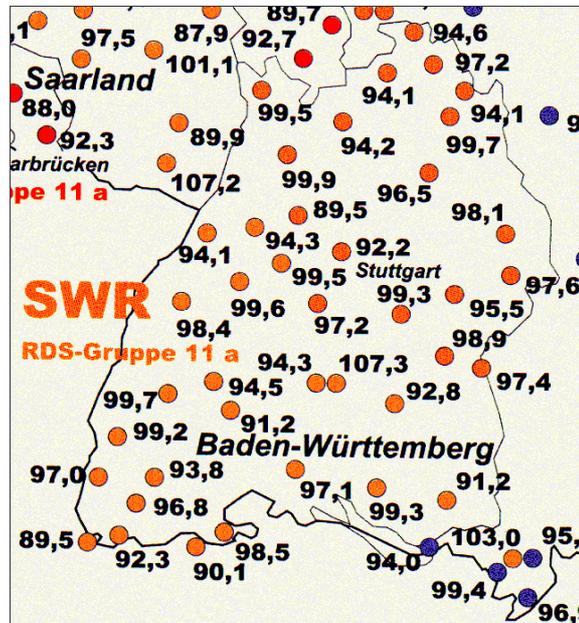


Abb.2.3-4: UKW-3-Sender, die EPS/ RASANT senden

2.3.3 Aufstellung des Meßplans

Der aufgestellte Meßplan beinhaltet derzeit noch hauptsächlich Gebiete im Raum Stuttgart. Dabei wurden für die Messungen möglichst signifikante Gebiete ausgewählt, an denen typische Situationen für den Straßenverkehr getestet werden können. Diese Gebiete liegen in der Stuttgarter Innenstadt, im Industriegelände am Stuttgarter Hafen und entlang der Weinsteige/B27, einer der Hauptverbindungsstraßen von Stuttgart Richtung Süden.

Klassifizierung der Testgebiete

Anhand der Randbebauung der Straßen läßt sich eine Klassifizierung der gefahrenen Strecken durchführen. Dabei wird vor allem nach der Höhe und Art der Bebauung am Straßenrand unterschieden. Je schmaler die Straße und je höher die Häuser, um so schlechter sind die Bedingungen zum lückenlosen Empfang der GPS-Signale. Die Beschaffenheit der Hauswände spielt beim Empfang ebenfalls eine Rolle. Je besser die Reflexionseigenschaft einer Hauswand, um so größer werden die Verfälschungen der Messungen durch Mehrwegesignale. Für den Korrekturdatenempfang gelten diese Kriterien der Bebauung in ähnlicher Weise. Zusätzlich können auf einem Industriegelände durch Fabrikmaschinen Störfrequenzen erzeugt werden, die eine Abschwächung der gemessenen Signale verursachen können.

Im folgenden werden die drei Teststrecken nach den verschiedenen Klassifizierungsrubriken eingeteilt und an Hand von Bildern visualisiert.

Straße	Bebauung		Bewuchs	
	5-6 Stockw.	3-4 Stockw.	Wald	Allee
Schwabstr/Rotebühlstr	X			
Rotenwaldstr		X		X
Am Kräherwald		X	X	
Lenzhalde		X		
Herdweg		X		

Kräherwald, zweispurige Straßen

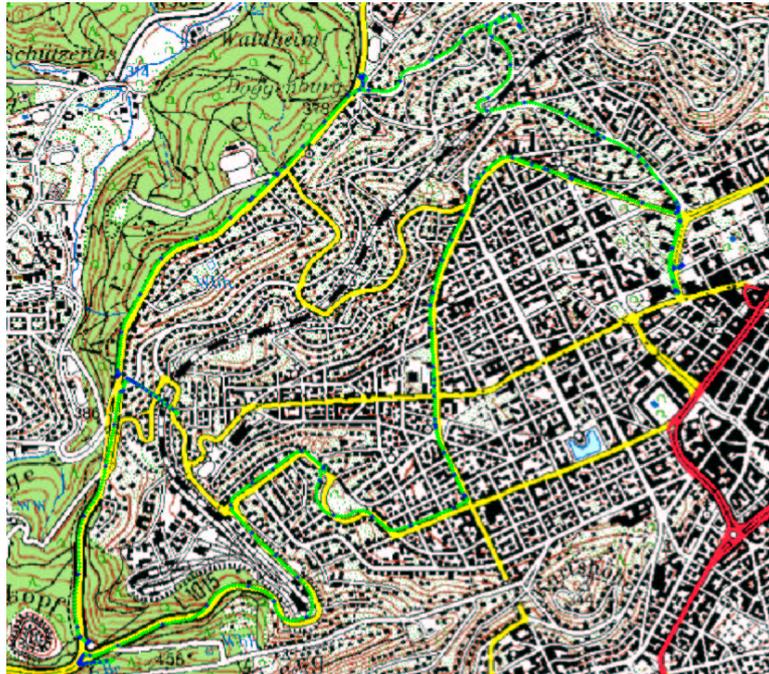


Abbildung 2.3-5: Karte der Strecke Am Kräherwald - Stuttgarter Innenstadt (grüne Markierung)



Abbildung 2.3-6: Photo links: Schwabstraße Stuttgarter Innenstadt; Photo rechts: Kräherwaldstraße Wohnviertel am Wald

Hafen, breite Industriestraßen

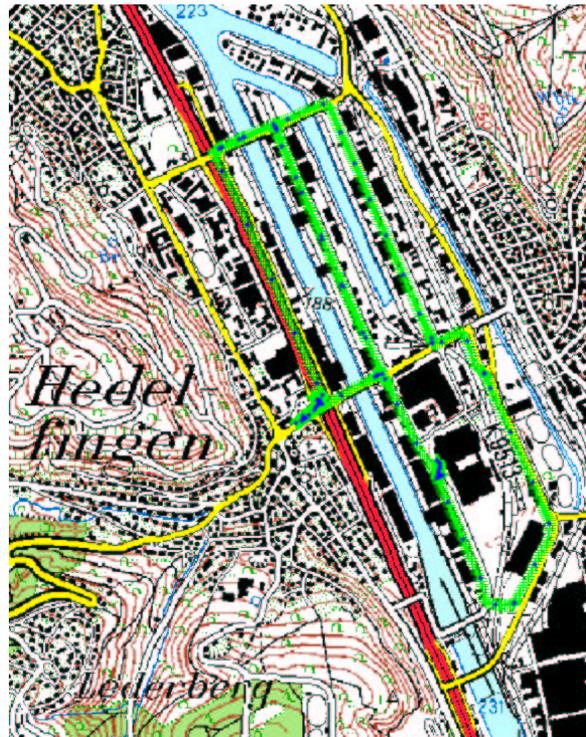


Abbildung 2.3-7: Karte der Teststrecke am Stuttgarter Hafen - Industriegebiet

Straße	Bebauung		Bewuchs	
	Industriehallen	niedrige Büros	Wald	Allee
West-, Mittel-, Ostkai	X			
Hafenbahnstr		X		X



Abbildung 2.3-8: Photo vom Stuttgarter Hafen, Mittelkai



Abbildung 2.3-9: Photo vom Stuttgarter Hafen, Ostkai



Abbildung 2.3-10: Photo vom Stuttgarter Hafen, Hafenbahnstraße

Weinsteige/B27, vierspurige Straßen

Abbildung 2.3-11: Karte der Teststrecke Weinstein/B27



Straße	Bebauung		Bewuchs	
	5-6 Stockw.	offenes Gelände	Wald	Allee
Kriegsbergstr/ Hbf	X			
Charlottenplatz	X			
Weinsteige/Degerloch	X			X
B27/Möhringen		X		



Abbildung 2.3-12: Photo der Weinsteige

Weitere Testgebiete:

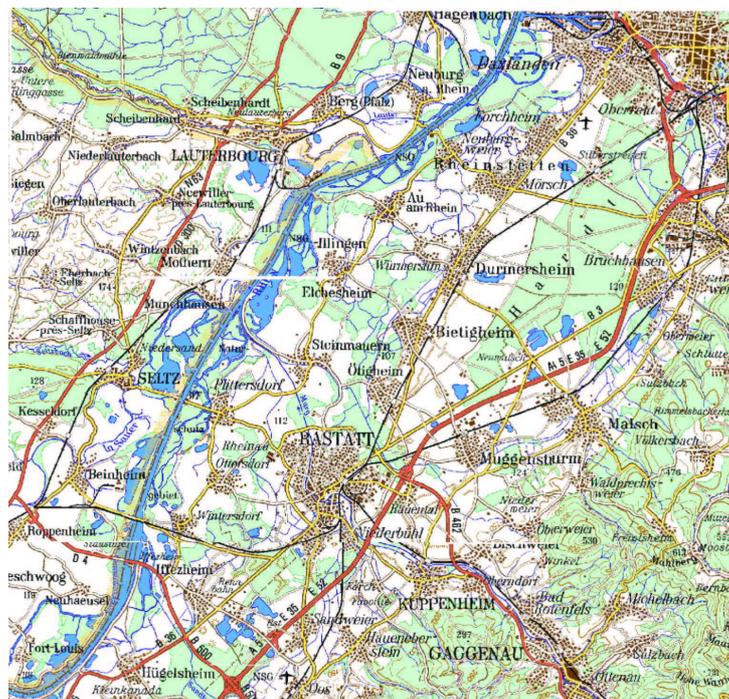


Abbildung 2.3-13: Karte vom Raum Karlsruhe - Iffezheim

Weiterhin wurden im Raum Karlsruhe-Iffezheim Messfahrten durchgeführt. Dieses Gebiet bietet den Vorteil eines operationellen Senders für das 2m-Band. Dieser Dienst wurde im Raum Stuttgart noch nicht eingerichtet.

Im Raum Iffezheim werden die Messfahrten hauptsächlich den Klassen offenes Gelände, einzelne Bäume, Wald und niedrige Bebauung zugeordnet (siehe auch Abbildung 14).

Des Weiteren sind Fahrten auf der Bundesstraße 10, vom INS bis nach Göppingen durchgeführt worden, die durch den Autobahncharakter und einer Ost-West Tallage ein zusätzliches Umgebungsbild bieten.

2.4 DGPS-Dienste (Korrekturdaten)

Überblick über die Vorgehensweise bei der Auswertung der verschiedenen Dienste

Die Korrekturdaten sowie auch die Schnittstellen an den Geräten sind weltweit durch die RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) normiert. Für die Korrekturdatenausstrahlung werden vorwiegend die beiden Typen RTCM SC 104, Versionen 2.0 und 2.1 verwendet. Die beiden Versionen unterscheiden sich gravierend. Bei der Version 2.0 werden nur Code-Korrekturen für eine Frequenz übermittelt. Damit wird eine Genauigkeit im Submeter-Bereich erreicht bei einer Übertragungsrate ab 100 bit/s. Das Korrektursignal einer Referenzstation kann ohne merkbareren Genauigkeitsverlust über einige hundert Kilometer verwendet werden. Bei der Version 2.1 werden die Phaseninformationen auf beiden Messfrequenzen übertragen. Dieses Verfahren ist zur Zeit nur für relativ kurze Distanzen bis ca. 20 km anwendbar; es resultieren jedoch cm-Genauigkeiten bei einer Übertragungsrate von mind. 2000 bit/s. Im weiteren beschränken wir uns auf die Genauigkeitssteigerung mit Code-Lösungen über größere Distanzen.

2.4.1 Angaben zu den Korrekturdatendiensten

Die hierfür zur Verfügung stehenden Dienste werden kurz beschrieben.

2.4.1.1 ALF

LW-Realtime-DGPS "ALF" (**A**ccurate Positioning by **L**ow **F**requency) wird als Dienst der Firma DeTex in Zusammenarbeit mit der TELEKOM und dem Institut für angewandte Geodäsie (IFAG) zur genaueren Positionsbestimmung in Echtzeit bereitgestellt. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie ist für die Bereitstellung und Kontrolle der Korrekturdaten zuständig.

Dieser Dienst wird von der DeTex gebührenpflichtig zur Verfügung gestellt. Die Lizenzgebühr wird nur einmalig, beim Kauf eines Empfängers für die Korrekturdaten, fällig und berechtigt zur zeitlich unbeschränkten Nutzung der Daten. Der Standort des Langwellensenders ist Mainflingen bei Frankfurt. Mit diesem Sender wird der gesamte Bereich der Bundesrepublik Deutschland mit Korrekturdaten versorgt. Der Bereich der Abschattungen ist verhältnismäßig gering. Für das Realtime-DGPS werden die Daten im RTCM-104 Format, Version 2.0, gesendet. Der Sender wird mit Einseitenbandmodulation, 2PSK, auf 122,5 kHz betrieben. Die Daten werden in RDS-Paketen übertragen.

2.4.1.2 AMDS

Die Übertragung mit AMDS (**A**mplituden **M**oduliertes **D**aten **S**ystem) wurde im Wesentlichen von der Technischen Universität Dresden in Zusammenarbeit mit Bosch entwickelt. AMDS dient zur digitalen Datenübertragung auf Mittel- und Langwelle bei Rundfunksendern. Diese haben eine ganz ausgezeichnete Ausbreitungscharakteristik auch in topographisch schwierigem Gelände. Der Empfang ist somit auch in Bergtälern möglich. In Gebieten mit Mittelwellen-Radio-Empfang (in der Schweiz Radio Beromünster auf 531 kHz oder SWR4 auf 666 kHz, Bodensee Radio) ist auch bei schlechtem Tonempfang das GPS-Korrektursignal noch verwendbar.

Es steht zur Zeit die ganze Bandbreite des AMDS, mit 136 bit/s, für die Übertragung des Korrektursignals zur Verfügung. Ohne Datenkomprimierung und Optimierung kann das gesamte Telegramm im 2-3s Intervall übermittelt werden.

Sender: Aholming (Frequenz 207)
Donebach i. Odenwald (153)
Rohrdorf/Sigmaringen
Langwellen-Hörfunksignal des Deutschlandradio

2.4.1.3 SAPOS EPS (2m-Band)

SAPOS, **S**atelliten**p**ositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung, umfasst vier Servicebereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften und Genauigkeiten:

- SAPOS EPS Echtzeit Positionierungs-Service
- SAPOS HEPS Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service
- SAPOS GPPS Geodätischer Präziser Positionierungs-Service

SAPOS GHPS Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service.

Die Korrekturdaten für SAPOS-EPS werden verschlüsselt und komprimiert im Format *RTCM AdV* über Sender der Landesvermessungsämter (2-m-Band) zum Anwender gesendet. Das erforderliche Anwederequipment auf der Nutzerseite besteht aus einem DGPS-Empfänger, einem 2-m-Band-Funkempfänger und einem SAPOS ® -Decoder, der die Korrekturdaten dekomprimiert und in das standardisierte Format RTCM 2.0 zurückverwandelt. Die zu erreichende Genauigkeit liegt bei ca. 1-2m;

SAPOS - German National Survey Satellite Positioning Service				
Service	Time to result	Transmission	Data Format	Accuracy
EPS Real Time Positioning Service	Real time	Radio Data System (RDS) of FM radio stations, 87-108 MHz	RTCM 2.0	1-3 m
HEPS Precise Real Time Positioning Service	Real time	5 separate radio frequencies at ~160 MHz, exclusively used	RTCM 2.1	1-5 cm
GPPS Geodetic Positioning Service	Postprocessing Within ~15 min.	Telephone, GSM	RINEX	1 cm
GHPS Precise Geodetic Positioning Service	Postprocessing	Mail etc.	RINEX	< 1 cm

RTCM = Radio Technical Commission for Maritime Services

RINEX = Receiver Independent Data Exchange Format

Table 1 SAPOS

Tabelle 2.4-1

2.4.1.4 RDS-RASANT

Die SAPOS-Korrekturdaten werden in Zusammenarbeit mit den Rundfunkanstalten der ARD (UKW) im RDS mit dem Verfahren RASANT (**R**adio **A**ided **S**atellite **N**avigation **T**echnique) gesendet. Das Anwederequipment besteht aus einem DGPS-tauglichen GPS-Empfänger und einem RASANT-Decoder, der im Handel erhältlich ist. Dieser Dienst ist bundesweit realisiert und erreicht eine Genauigkeit von 1-3m.

Für den Stuttgarter Raum werden die Korrekturdaten vom Landesvermessungsamt Stuttgart mit einem Trimble-Empfänger 4000SSi erzeugt. Über Modem werden die Daten an den Stuttgarter Fernsehturm übertragen und dort vom SüdWestRundfunk über die RDS-Gruppe 11 an den Nutzer auf der Frequenz 92.2 MHz des SWR3 ausgestrahlt.

2.4.1.5 EUROFIX (LW)

Eurofix ist ein integriertes Radionavigations- und Kommunikationssystem, das von der Delft University of Technology vorgeschlagen und entwickelt wurde. Loran-C oder Chayka Stationen wurden erweitert um eine zuverlässige niederfrequente Datenübertragung über einen Bereich von bis zu 1000km zu ermöglichen. Die Daten sind auf 8 Kanäle verteilt, mit einer entsprechenden Zuweisung von DGPS, DGLONASS, DLoran-C/DChayka, Navigations Integrity Message und Kurznachrichtendienst. Drei Kanäle sind für zukünftige Anwendungen reserviert.

2.4.1.6 EGNOS

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) soll Europa mit drei Erweiterungen zu GPS und GLONASS versorgen:

- * eine GPS ähnliche geostationäre Bereichserweiterung, welche die Nutzer mit zusätzlichen Laufzeitmessungen versorgt,
- * eine Erweiterung der Integritätsüberwachung, wodurch die Integrität des Navigationsdienstes für die Nutzer verbessert wird,
- * eine Erweiterung durch DGPS, wodurch die Positionsgenauigkeit verbessert wird, indem DGPS Korrekturen an die Nutzer übertragen werden.

2.5 Auswertung der Messdaten

Überblick über die Vorgehensweise bei der Auswertung

Die Auswertung der Daten von den verschiedenen Messfahrten erfordert eine erste Sichtung der Daten hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit und Vollständigkeit. Diese Grundfunktion wird bei der Datensicherung nach einer Messfahrt ausgeführt. Die eigentliche Analyse ist in Teilbereiche gegliedert:

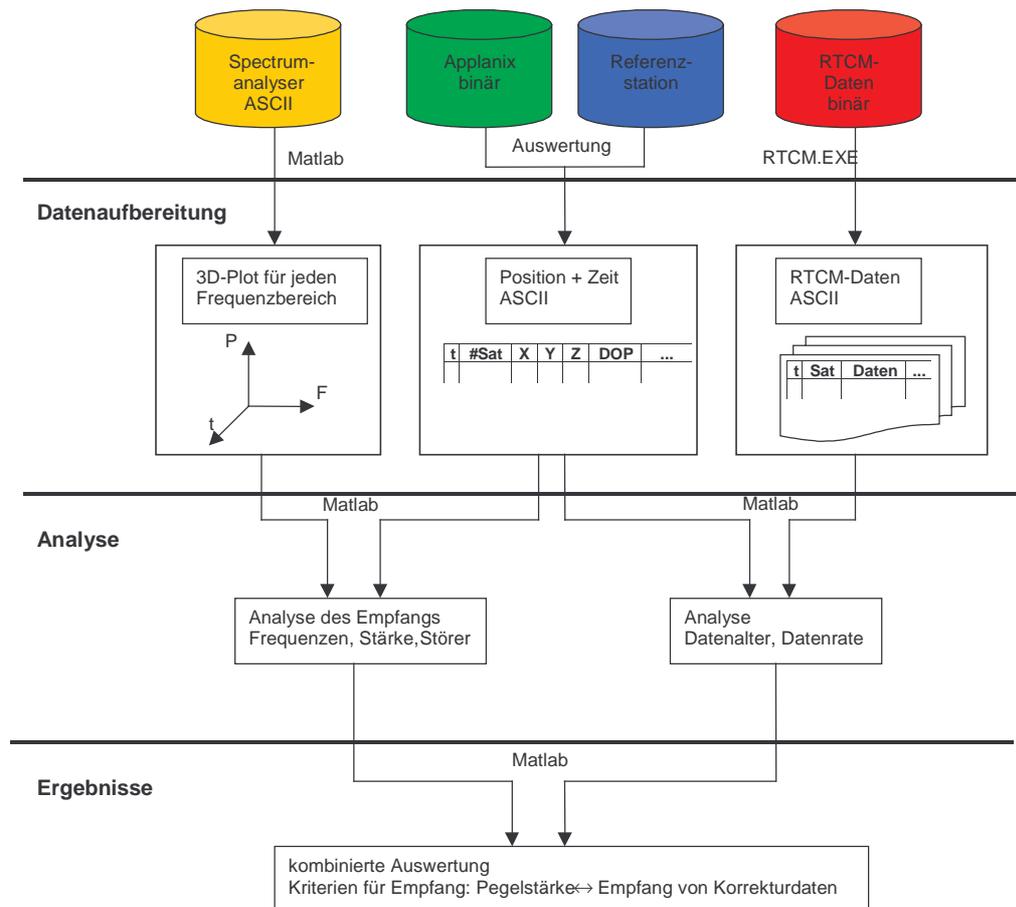
- DGPS- Korrekturdaten
 - Verfügbarkeit des Dienstes
 - zeitliche Verzögerung des Korrektursignals
 - Vollständigkeit der Information
 - Vergleich mit anderen DGPS-Diensten
- GPS Position
- GPS Pseudostrecken

2.5.1 Analyse des Korrekturdatenempfangs

Der Empfang der Korrekturdaten wird entsprechend auf Verfügbarkeit über die Parameter

- zeitliche Kontinuität der RTCM-Datensätze
 - Datenalter im NMEA-GGA-Format
- und Qualität über die Parameter
- Analyse des Empfangsspektrums
 - Bitfehlerrate
- überprüft.

Eingangsdaten



Ch.Pfister Mai 2000

Abbildung 2.5-1: Vorgehensweise zur Analyse der Korrekturdaten mit Angabe der verwendeten Software

Das Ablaufschema der Korrekturdatenauswertung und die Kombination der vorhandenen Daten zur Analyse werden in Abb 2.5-1 dargestellt. Die zur Analyse erforderlichen Softwarekomponenten wurden mit Matlab implementiert.

Für jeden Korrekturdatenanbieter können zwei Datensätze erzeugt werden, die Pegelmessungen des Spektrumanalysators und die RTCM-Korrekturdaten. Jeder dieser beiden Datensätze kann an Hand der abgespeicherten Zeitinformation die zugehörige Position aus den Aufzeichnungen des Referenzsystems Applanix zugewiesen werden. Zur Analyse der Daten und zur Visualisierung der Ergebnisse wird jeweils Matlab verwendet.

Im Vorfeld der eigentlichen Meßfahrten wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt:

- Formatüberprüfungen der Korrekturdaten
- Verhalten der Werte der PseudoRangeCorrections (PRC).

2.5.1.1 Vorüberlegungen zu den Korrekturdaten

Diese Untersuchungen wurden an Hand von statischen Messungen durchgeführt, um Basisinformationen über die Funktion der einzelnen Korrekturdatensender zu erhalten. Außerdem sollten diese Untersuchungen auch die neuen Bedingungen für GPS ohne S/A-Effekt beleuchten.

Verhalten der Korrekturdatensender

Die Korrekturdatensender unterscheiden sich in erster Linie durch die Telemetrie, mit der die Daten an den Nutzer übermittelt werden. Für den EPS-Dienst der Landesvermessung, auf UKW und LW, soll hier eine kurze Zusammenfassung gegeben werden. Eine Untersuchung des SAPOS HEPS Dienstes war nicht möglich, da dieser Sender in Stuttgart noch nicht betriebsbereit ist.

Die Korrekturdaten werden für einen Zeitpunkt ermittelt und in Form von Datenpaketen im RTCM 2.0/2.1 Format übertragen. Die enthaltene Information eines solchen Paketes hat, in einem lesbaren Format dargestellt, folgenden Inhalt:

```
Differential GPS corrections                                FRAME 01
M-Z-Count : 60423.0
SV | Factor | UDRE m | PsRangeCo m | RaRaCo m/s | IOD | M-Z-Count
===|=====|=====|=====|=====|=====|=====
 2 | fine    | ... 1 | -12.10 | -0.004 | 8 | 60423.0
 3 | fine    | ... 1 | -20.56 | -0.002 | 72| 60423.0
11 | fine    | ... 1 |  1.78 | -0.002 | 13| 60423.0
15 | fine    | ... 1 | -1.94 | -0.002 | 170| 60423.0
20 | fine    | ... 1 | -1.56 | -0.006 | 17 | 60423.0
21 | fine    | ... 1 | -3.66 |  0.004 | 2 | 60423.0
29 | fine    | ... 1 | -1.44 | -0.004 | 75 | 60423.0
31 | fine    | ... 1 | -2.86 |  0.000 | 129| 60423.0
```

Tabelle 2.5-1: Beispiel für die lesbare Form der RINEX-Daten

Jedem Korrekturdatensatz wird mit der Größe 'M-Z-Count' (modifizierter Z-Count) der Zeitpunkt mitgegeben, an dem er erzeugt wurde. Dieser enthält nur die Minuten und Sekunden und keine Angaben der aktuellen Stunde. Diese wird vom Aufzeichnungs- bzw. Konvertierungsprogramm ergänzt. Der eigentliche Inhalt eines Datensatzes sind die Korrekturwerte für den PseudoRange und den RangeRate für jeden an der Referenzstation sichtbaren Satelliten.

Die Erneuerung der Korrekturwerte ist abhängig von der Mess- und Berechnungsdauer des Referenzempfängers und der Genauigkeit der Darstellung des Z-Counts. Der Z-Count wird mit einem Skalierungsfaktor, bzw. mit einer Einheit, von 0.6 Sekunden erzeugt. D.h. der Zeitpunkt der Erzeugung eines Datensatzes kann nur in einem Raster von 0.6 Sekunden angegeben werden. Werden vom Empfänger die Datensätze öfter berechnet, muss diesen derselbe Z-Count mitgegeben werden. So ergeben sich Situationen in denen zum selben Z-Count unterschiedliche Korrekturwerte für denselben Satelliten angegeben werden. An Hand der Häufigkeit der Änderung des Z-Counts, während einer statischen Empfangssituation, lässt sich die Datenrate des Empfängers berechnen.

UKW

Die Untersuchung des Z-Counts in den über UKW übertragenen Korrekturdaten ergab eine Datenrate für die Berechnung von neuen Korrekturdatensätzen im Empfänger von 0.225 s. Allerdings erfolgt die Neuberechnung von Korrekturdaten nicht immer in diesen Zeitabständen. Es ergaben sich häufig Unterbrechungen dieses Zeitrahmens, die auch durch die Übertragung bedingt sein können.

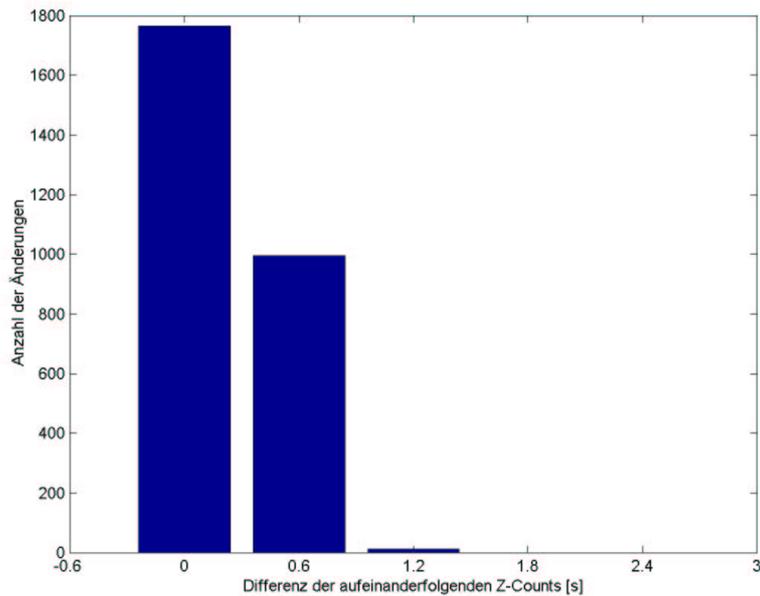


Abb 2.5-2: Histogramm der Differenz der aufeinanderfolgenden Z-Counts für die Korrekturen eines Satelliten ausgestrahlt über UKW

In Abb 2.5-2 wird die Häufigkeit der Änderungen des Z-Counts in Form eines Histogramms über die Differenz der aufeinanderfolgenden Z-Counts dargestellt. Dabei tritt der Skalierungsfaktor von 0.6 und seine Vielfachen als einzige berechenbare Größe auf.

Mit dem Trimble-Empfänger 4000 SSi des Instituts wurden ebenfalls RTCM-Daten erzeugt und direkt an einen PC übertragen. Diese Übertragung erfolgte direkt über die Schnittstellen der beiden Geräte, so dass eine Verzögerung durch die Telemetrie nicht vorkommen konnte. Die Datenrate für die Berechnung neuer Korrekturdatensätze im Empfänger betrug 1s. Es ergab sich ausschließlich eine Datenrate im Raster von 0.6s bzw. 1.2 Sekunden. Für die Übertragung des EPS-Dienstes der Landesvermessung kann somit jedes höhere Datenalter auf die Problematik der Telemetrie zurückgeführt werden.

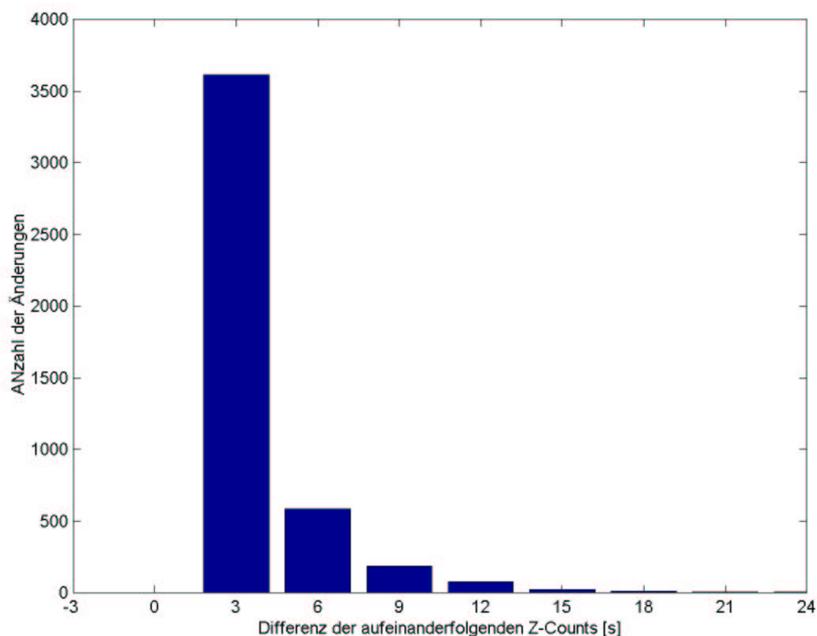


Abb 2.5-3: Histogramm der Differenz der aufeinanderfolgenden Z-Counts für die Korrekturen eines Satelliten ausgestrahlt über LW

LW

Die Telekom und das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie betreiben in Mainflingen bei Frankfurt den Korrekturdatensender SAPOS ALF, der über Langwelle zu empfangen ist. An der Referenzstation werden zwei Empfänger betrieben, ein Trimble SSi und ein Trimble SSe. Jeweils von einem der beiden Empfänger werden die Korrekturdaten erzeugt und auf der Frequenz 123.7 kHz ausgestrahlt.

Für diesen Langwellensender wurde die verfügbare Datenrate vom Betreiber auf ein Minimum von 3 Sekunden festgelegt. Für die Untersuchung des Z-Counts ergaben sich damit keine solchen Unregelmäßigkeiten wie bei UKW, da die Datenrate exakt ein Vielfaches der Skalierungseinheit des Z-Counts von 0.6 Sekunden ist. Alle vom Empfänger neu berechneten Korrekturdaten werden übertragen. Es kann zu keiner mehrmaligen Benutzung desselben Z-Counts kommen, da die Datenrate dies schon per Vordefinition ausschließt.

Im Histogramm (Abb 2.5-3) geben die Differenzen der aufeinanderfolgenden Z-Counts die Regelmäßigkeit dieser Vordefinition wieder.

Korrekturdaten ohne S/A-Effekt

Seit der Abschaltung des S/A-Effekts Anfang Mai 2000 hat sich die erreichbare absolute Genauigkeit der GPS-Messungen wesentlich verbessert. Ohne die Nutzung von Korrekturdaten wird eine absolute Genauigkeit von ca. 10 m erwartet. Für genauere Anwendungen werden weiterhin Korrekturdaten benötigt. Die Größenordnung und Variation dieser Werte hat sich, seitdem keine künstliche Verschlechterung der Signale mehr vorhanden ist, verändert. In den Korrekturdaten bei vorhandenem S/A-Effekt bewegten sich die Werte um bis zu ± 100 m in Perioden von mehreren Minuten (~ 10 min); dies entspricht den Schwankungen des S/A. Die Korrekturdaten zeigen, bei ausgeschaltetem S/A-Effekt, eine erheblich kleinere Amplitude und ändern sich über die Zeit nicht mehr so stark.

Die jetzt verbleibenden größten Fehlereinflüsse sind die :

Atmosphärischen Störungen durch die Ionosphäre und Troposphäre und die Mehrwegeeffekte (sollten bei Referenzstationen nicht vorhanden sein).

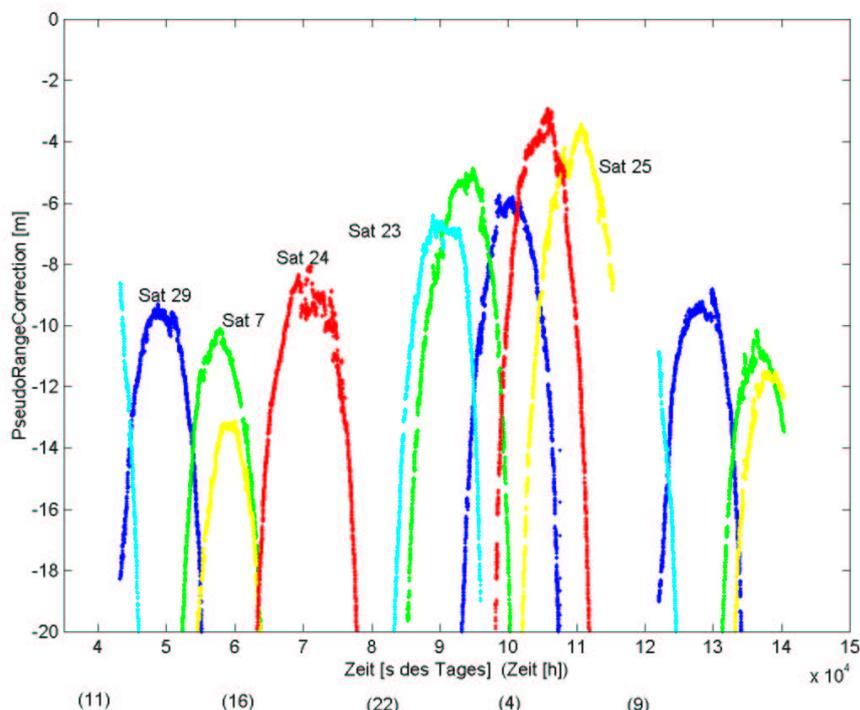


Abb 2.5-4: Vergleich der PseudoRangeCorrection für Satelliten bei ca. 40° Elevation dargestellt über 24h

Diese Fehlereinflüsse waren auch bei Messungen mit eingeschaltetem S/A vorhanden. Sie wurden jedoch durch den großen Einfluss des S/A-Effekts überdeckt und waren nicht direkt erkennbar. Der größte Fehlereinfluss auf GPS-PseudoRange-Messungen ist die Ionosphäre. Die Ionosphäre wird durch die Sonnenaktivität beeinflusst und hat damit eine tägliche, jährliche und mehrjährige (ca. 11 Jahre) Periode. Das Tagesmaximum des Einflusses der Ionosphäre liegt

bei ca. 14 Uhr (lokale Zeit). Bei besonders niedrig stehenden Satelliten (Elevationswinkel $< 40^\circ$) ist der Einfluss größer als bei hoch stehenden Satelliten, da deren Signale einen längeren Weg durch die beeinflussenden Schichten zurücklegen müssen.

Mit den Korrekturdaten der Langwelle wurde eine Messung über 24 Stunden durchgeführt um die jetzt sichtbaren periodischen Einflüsse der Ionosphäre und evtl. andere Störeinflüsse aufzuzeigen.

In Abb 2.5-4 werden die PseudoRangeCorrections (PRC) für Satelliten, die ihren maximalen Elevationswinkel bei ca. 40° erreichen, über 24 Stunden dargestellt. Die geringste Korrektur erfahren die Satelliten jeweils in ihrem höchsten Punkt der Sichtbarkeit. Bei Auf- und Untergang eines Satelliten verhalten sich die Korrekturwerte umgekehrt proportional zum Bahnbogen. Je größer der Elevationswinkel wird, um so kleiner werden die für ihn ermittelten Korrekturwerte, entsprechend umgekehrt bei kleiner werdendem Elevationswinkel. Ein Vergleich der kleinsten Korrekturwerte über einen ganzen Tag ergibt einen deutlich geringeren Korrekturbedarf der Messungen in den Nachtstunden als am Tag.

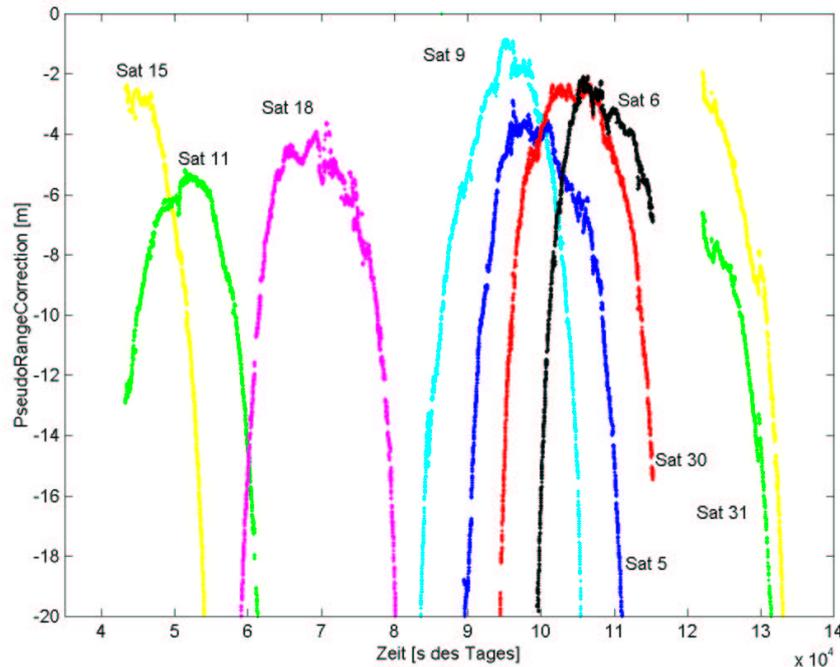


Abb 2.5-5: Vergleich der PseudoRangeCorrekctions für Satelliten bei einer Elevation höher als 80°

In Abb 2.5-5 werden aus derselben Messung Satelliten dargestellt, die ihren maximalen Elevationswinkel bei mehr als 80° erreichen. Der Korrekturwert, der für diese Satelliten an ihrem höchsten Punkt berechnet wird, ist um einiges geringer als bei den Satelliten mit niedrigerer Elevation. Auch bei diesen hoch stehenden Satelliten macht sich die bessere Empfangssituation in den Nachtstunden bemerkbar.

Für die Korrekturwerte kann also ein periodisches Verhalten über einen Tag (24h) festgestellt werden. Dies wird eindeutig vom größten auftretenden Fehler der PseudoRange-Messung, dem Einfluss der Ionosphäre, beeinflusst.

In Abb. 2.5-6 werden noch einmal die PseudoRangeCorrections verschiedener Satelliten dargestellt. Sie sind über dem Elevationswinkel aufgetragen. Diese Darstellung ermöglicht einen besseren Vergleich der Korrekturwerte. Für einen Satellit, der seine maximale Elevation um 14 Uhr erreicht, wird eine größere Korrektur benötigt als für einen Satellit der dieselbe Elevation in der Nacht gegen 1 Uhr erreicht. Die Korrekturwerte für den PseudoRange differieren innerhalb eines Tages um ca. 6 m für denselben Elevationswinkel. In Abb. 2.5-6 wird auch deutlich, dass für Elevationswinkel kleiner als 20° eine Korrektur von nur 20 m benötigt wird. Für viele Anwendungen werden sehr niedrig stehende Satelliten (Elevationen $< 15^\circ$) von den Messungen ausgeschlossen, da sie zu große Unsicherheiten in die Messung mit einbringen würden.

Die Änderung der Korrekturwerte hatte mit eingeschaltetem S/A-Effekt eine Periode von mehreren Minuten, damit wurde auch die zeitliche Gültigkeit der Korrekturdaten stark eingeschränkt. Die Untersuchung der zeitlichen Änderung ohne den Einfluss des S/A wird hier am Beispiel einiger Satelliten dargestellt.

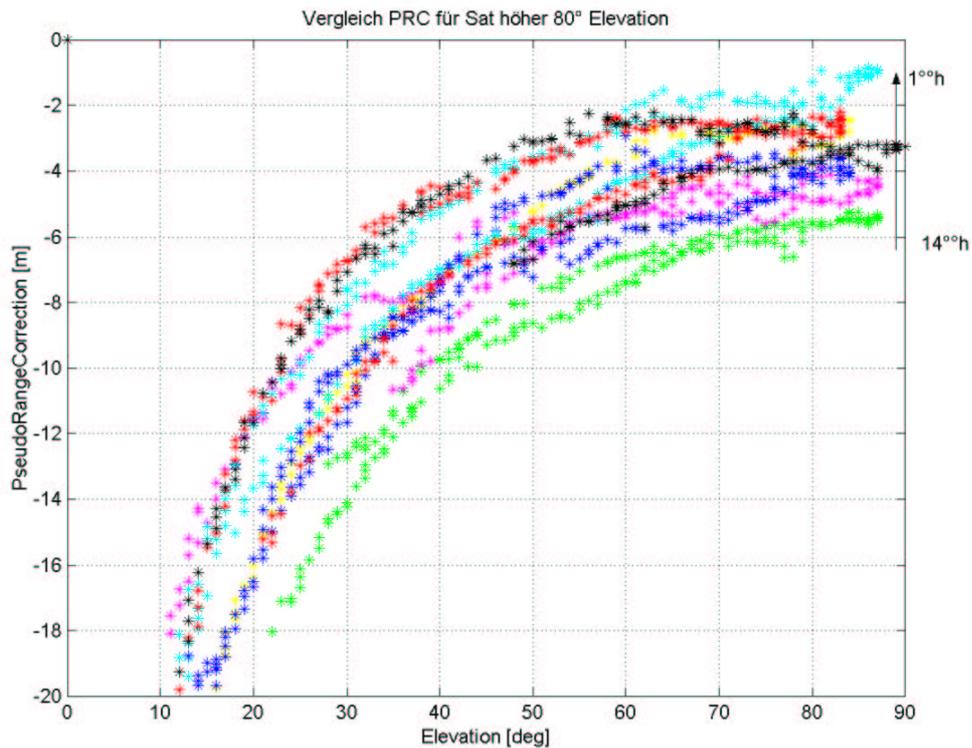


Abb 2.5-6: Vergleich der PseudoRangeCorrections aufgetragen über der Elevation

	Sat. Elevation > 80°			Sat. Elevation bei 40°		
	Sat 5	Sat 9	Sat 30	Sat 7	Sat 24	Sat 29
Änderung des PRC für Elevationen bis 40°, Angaben in [m/min]:						
Sat.-Aufgangsphase	0.28	0.36	0.45	0.15	0.14	0.17
Sat.-Untergangsphase	-0.33	-0.38	-0.24	-0.15	-0.24	-0.13
Ø Änderung des PRC	~ ± 0.34			~ ± 0.16		
Änderung des PRC für Elevationswerte > 40°, Angaben in [m/min]:						
Sat.-Aufgangsphase	0.04	0.06	0.02	-	-	-
Sat.-Untergangsphase	-0.05	-0.05	-0.06			
Ø Änderung des PRC	~ ± 0.05					

Tabelle 2.5-2: Mittlere Änderung der Korrekturwerte in Abhängigkeit der Elevation der Satelliten

Die durchschnittliche Änderung der Korrekturwerte pro Minute ist abhängig von der Satellitenbahn und vom Elevationswinkel unter dem der Satellit beobachtet wird. In Abb. 2.5-4 und Abb. 2.5-5 wird das stetige Verhalten der Korrekturen deutlich. In der Tabelle 2.5-2 werden die Änderungen pro Minute für einige Satelliten aufgelistet. Die Unterteilung der Satellitenbahnen in Teilbereiche erfolgte nach dem Elevationswinkel größer bzw. kleiner 40°. Für Satelliten die einen maximalen Elevationswinkel bei ca. 80° erreichen, verändert sich die Korrektur in den niedrigen Elevationswinkeln (< 40°) um ca. ±0.34 [m/min], für Elevationswerte zwischen 40 - 80° betragen die Änderungen bei den Korrekturen nur noch ca. 0.05 [m/min]. Satelliten die ihre höchste Elevation bei 40° erreicht haben, haben keine starke Änderungen pro Minute. Sie werden durchschnittlich um 0.16 [m/min] korrigiert.

Verglichen mit den periodischen Änderungen mit S/A-Effekt sind die Änderungen der Korrekturwerte jetzt sehr gering. In Abb 2.5-7 werden für einen ausgewählten Zeitbereich die PseudoRangeCorrections für alle Satelliten dargestellt. In diesem Zeitbereich sind Unregelmäßigkeiten in den PseudoRangeCorrections für alle zu dem Zeitpunkt sichtbaren Satelliten festzustellen. Da alle Satelliten betroffen sind, kann keine Azimut- oder Elevationsabhängigkeit bei dieser Störung vorliegen. Vermutlich handelt es sich um eine Störung, die in der unmittelbaren Umgebung der Referenzstation erfolgte oder in der Atmosphäre zu suchen ist und zu einer Abweichung bei der Bestimmung des Empfängeruhrenfehlers führt, der sich dann auf die Korrekturdaten aller Satelliten auswirkt; aber für die Positionsbestimmung mit DGPS keinen Fehler verursacht, da sich dies hier wieder in den Uhrenfehler niederschlägt.

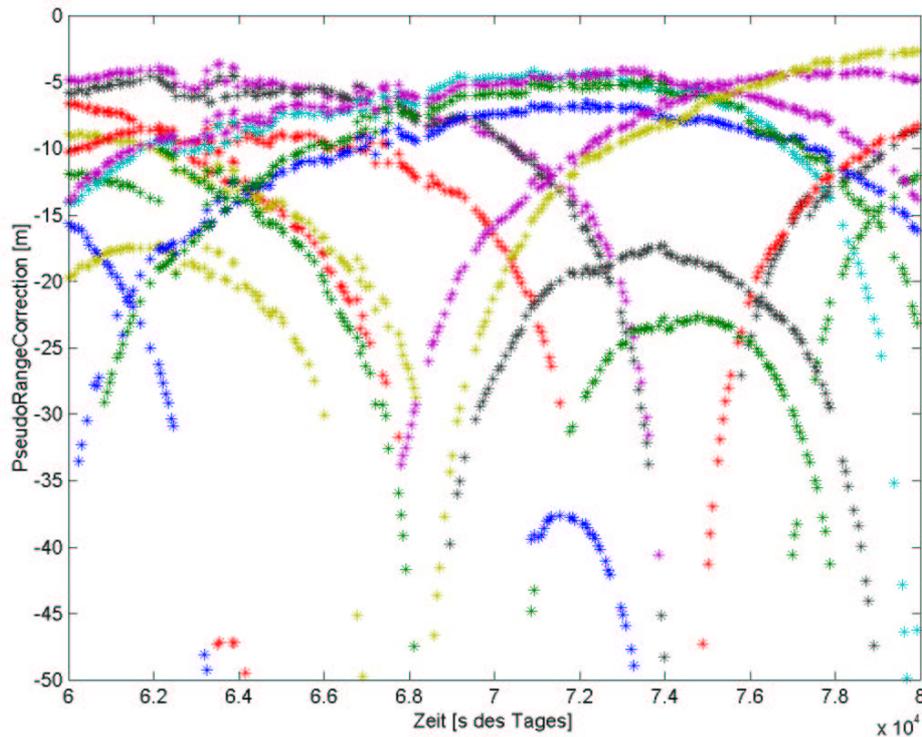


Abb 2.5-7: Vergleich der PseudoRangeCorrection (PRC) für alle Satelliten

2.5.1.2 Untersuchung zur Auswirkung des Korrekturdatenalters auf die Positionsgenauigkeit

Die Genauigkeit einer Positionslösung kann mit dem Produkt aus der Satellitengeometrie (PDOP) und der Genauigkeit der Pseudoentfernungsmessung angegeben werden. Zur Untersuchung der Auswirkung des Korrekturdatenalters auf die Positionsgenauigkeit wurden, für verschiedene gleichzeitig beobachtete Satelliten, ab einem bestimmten Zeitpunkt die Änderungen der Pseudostreckenkorrekturen (PRC) zu den einzelnen Satelliten berechnet. Ab dem Startzeitpunkt ergeben sich damit über gewisse Zeitspannen anwachsende Korrekturbeträge für die einzelnen Pseudoentfernungen. Das Ergebnis wird in der nachfolgenden Graphik dargestellt.

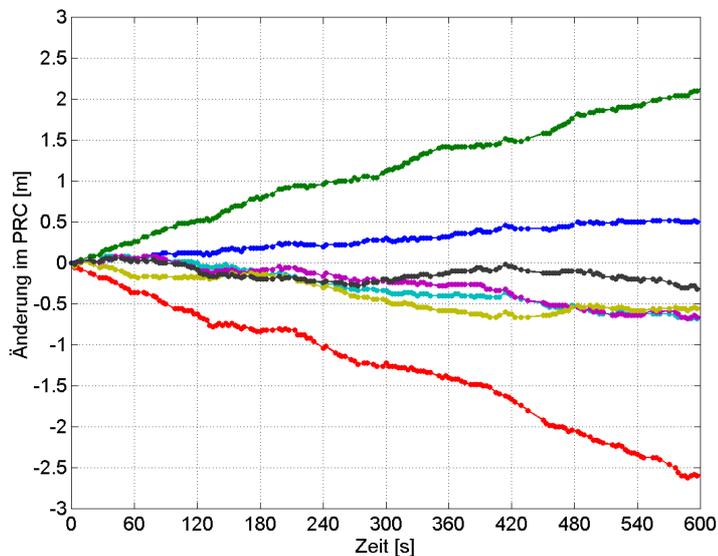


Abb. 2.5-8: Änderung im PRC in Abhängigkeit von der Zeit

Man erkennt in dieser Graphik für die einzelnen Satelliten (jeder in einer anderen Farbe dargestellt) die Korrekturbeträge die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt gegenüber ihrer ursprünglichen Pseudorange zum Startzeitpunkt ergeben. Dabei steigen insbesondere diejenigen Korrekturbeträge stark an, die sich auf Satelliten in niedrigen Elevationen beziehen (hier in grün und rot dargestellt). Bei diesen beiden Satelliten liegt der Korrekturbetrag nach 240 Sekunden beispielsweise bei einem Meter. Dies bedeutet bei einem guten PDOP von 1.2 eine Positionsgenauigkeit von 1,2 m und bei einem mittleren PDOP von 4 eine Verschlechterung auf 4 m. Tabelle 2.5-3 gibt einen Überblick über die Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit des Datenalters und der PRC-Änderung für zwei DOP-Werte.

Datenalter [min]	Änderung der PRC [m]	$\pm\sigma_{POS}$ DOP=1.2 [m]	$\pm\sigma_{POS}$ DOP=4 [m]
1	< 0.5	< 0.6	< 2
4	1	1.2	4
7	1.5	1.8	6
> 7	> 2	> 2.4	> 8

Tabelle 2.5-3: Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von Korrekturdatenalter und Satellitengeometrie

Damit spielt das Datenalter der Korrekturdaten seitdem SA abgeschaltet wurde (01.05.2000) nun nicht mehr so eine große Rolle, insbesondere da, wie in Abb. 2.5-12 ersichtlich, der Korrekturwert sich annähernd linear verändert und so über kurze Zeiträume mit guter Näherung geschätzt werden kann. Bei einem PDOP von 2 und einer angestrebten Genauigkeit von einem Meter würde damit eine Aufdatierungsrate der Korrekturdaten von ca. 90 Sekunden gut reichen, um die Positionsgenauigkeit unter einem Meter zu halten. Vor der Abschaltung von SA wäre zur Realisierung einer solchen Genauigkeit unter gleichen geometrischen Bedingungen eine Aufdatierungsrate von besser als 10 Sekunden erforderlich gewesen. Diese „10-Sekundenschranke“ stellte vor der Abschaltung von SA ein Problem dar, da beispielsweise bei einer Übertragungsrate von 50 Baud die Übertragung von Korrekturdatensätzen des Typs 1 (RTCM) für 12 Satelliten eine Zeitspanne von 13,2 Sekunden in Anspruch nimmt.

2.5.1.3 Auswertung der Leistungsspektren der Korrekturdaten

In diesem Kapitel wird beispielhaft die Auswertung mit der Messfahrt von der Strecke *Weinsteige/B27* durchgeführt. Ein Überblick der Lage der Strecke wird in Abbildung 12 gegeben. Die Strecke liegt zum Teil in der Stuttgarter Innenstadt mit hoher Bebauung. Sie beinhaltet auch die Klasse 'offenes Gelände' im Bereich der B27 von Degerloch Richtung Möhringen.

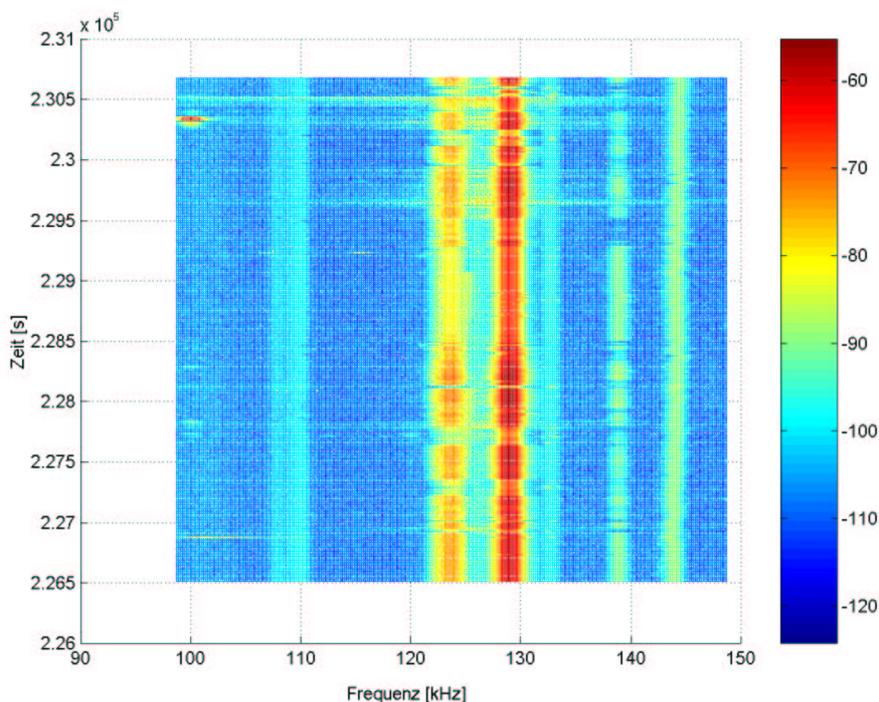


Abb 2.5-9: Pegelscan des Frequenzbereichs der Langwelle (123.7kHz), Pegelstärke angegeben mit Farbschattierung in [dBm]

Mit Hilfe der Spektrumanalysatoren wird ein Scan des angrenzenden Frequenzbereiches der in Frage kommenden Trägerfrequenz durchgeführt. Damit kann eine eventuelle Störung in diesem Bereich detektiert und lokalisiert werden. Der Langwellensender in Mainflingen überträgt seine Korrekturdaten auf der Frequenz 123.7 kHz. In Abbildung 2.5-9 ist bei dieser Frequenz ein deutliches Maximum der Pegelstärke zu sehen, was auf einen guten Empfang des Senders schließen lässt. Parallel ist bei einer Frequenz von 129 kHz ebenfalls ein Sender zu sehen, der eine wesentlich stärkere Empfangsleistung aufweist als die von uns genutzte Frequenz bei 123.7 kHz.

Um eine Analyse der Empfangseigenschaften an der Sollfrequenz über der Strecke durchführen zu können, wurden die gemessenen Werte geocodiert (siehe Abb 2.5-10). Mit dem Bezug zur gefahrenen Strecke lassen sich eindeutig Gebiete bestimmen in denen die Langwelle nur schlecht zu empfangen war und hier dann besondere Umgebungsparameter zugeordnet werden können.

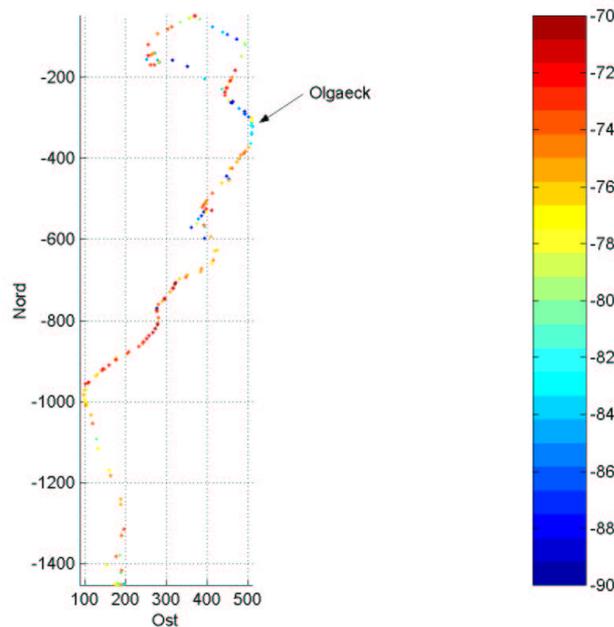


Abb 2.5-10: Pegelstärke an der Sollfrequenz aufgetragen über der gefahrenen Strecke, Farbskalierung nach der Pegelstärke in [dBm]

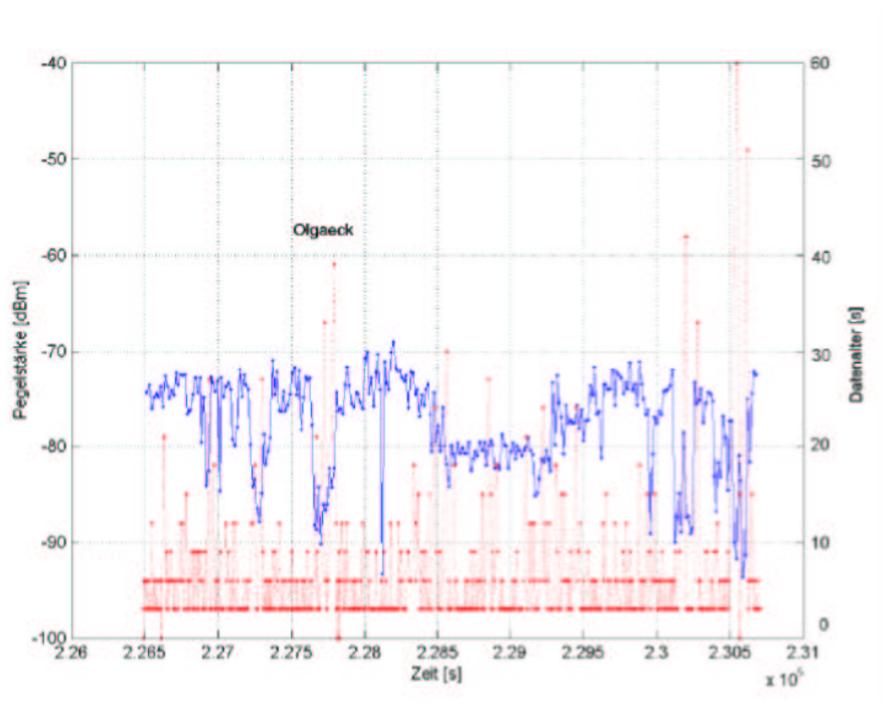


Abb 2.5-11: Weitere Untersuchung des Einflusses der Pegelstärke auf die empfangenen Korrekturdaten, dargestellt an Hand des Datenalters

Bei der Auswertung mehrerer Fahrten dieser Strecke wurden an denselben Stellen immer ähnliche Pegelstärken gemessen. So ist z.B. im Bereich des Olgaecks immer deutlich schlechterer Empfang als im weiteren Verlauf der Weinsteige. Die weitere Analyse der an dieser Stelle empfangenen Korrekturdaten wird in Abbildung 2.5-11 dargestellt. Die Betrachtung des Luftbildes zeigt hier eine deutlich kompaktere und höhere Bebauung, die eine gewisse Abschirmung in Richtung Sendestation bildet.

Wird die Pegelstärke gemeinsam mit der Angabe des Datenalters der Korrekturdaten über der Zeit aufgetragen, kann der Einfluss der Empfangssituation auf die übertragenen Daten deutlich gemacht werden. Erfolgt ein Einbruch in der Pegelstärke führt dies auch zu Datenverlusten. Am Beispiel des Olgaecks wird dieser Sachverhalt besonders deutlich, da dort für längere Zeit ein schlechter Empfang registriert wurde. Allerdings konnte in diesem Gebiet keine Störfrequenz im Bereich zwischen 100 – 150 kHz festgestellt werden (siehe auch Abbildung 2.5-9). Die Ursachen sind hier vornehmlich in der örtlichen Empfangssituation zu sehen, die durch die hohe Bebauung und die Geometrie des Geländes beeinflusst wird.

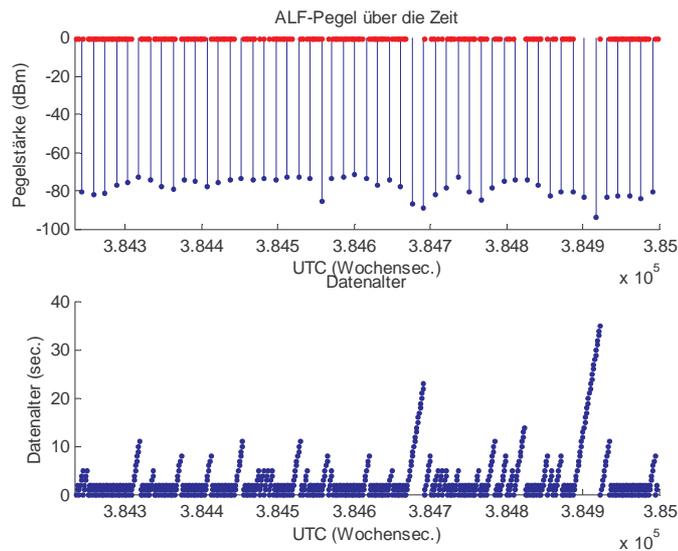


Abbildung 2.5-12: ALF-Signalstärke und zugehöriges Datenalter

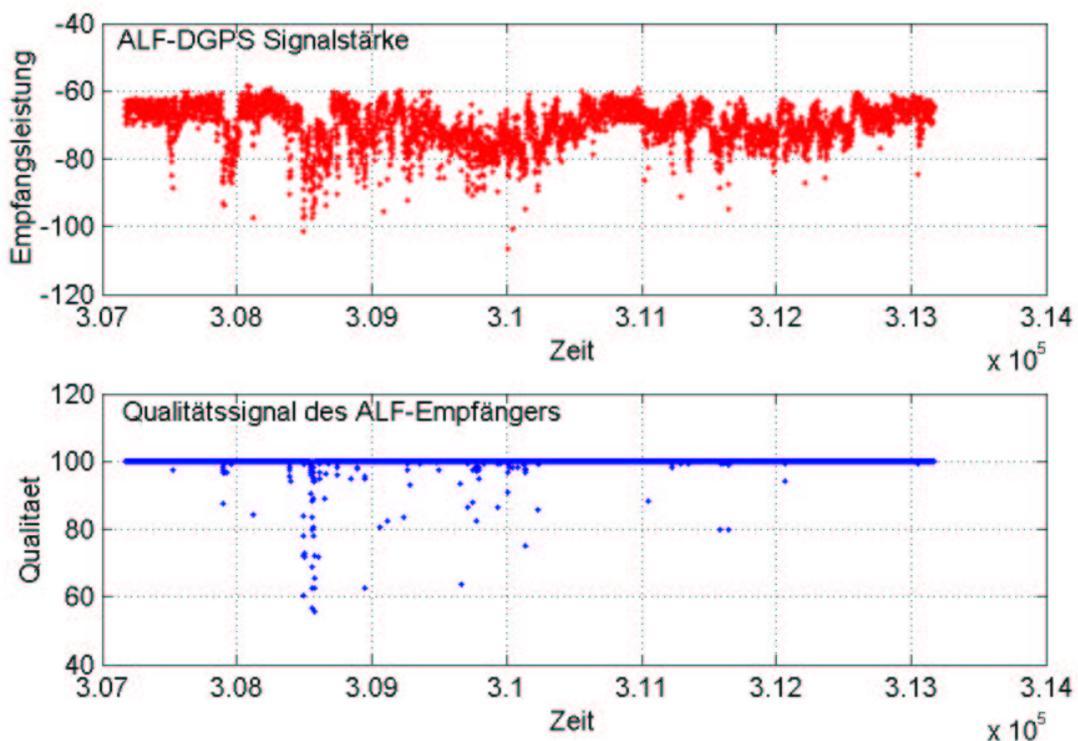


Abbildung 2.5-13: Qualitätssignal und Pegel für ALF-Korrektursignale

Der Zeitbedarf eines Pegelscans mittels Spektrumanalysator ist recht zeitintensiv, so werden im Mittel ca. 10s für einen Scan mit Übertragung auf den Messrechner benötigt. Da die Spektrumanalysatoren auch das Auslesen der maximalen Leistung bei einer Frequenz erlauben und dieser Vorgang nur 1,2s erfordert und damit deutlich schneller ist und auch einen wesentlich geringeren Speicherbedarf im Messrechner verursacht, wurde die Leistungsmessung auf diese Methode umgestellt. Damit stehen auch direkt die Zahlenwerte zur Verfügung und müssen nicht aus dem Pegelscan extrahiert werden. Diese Leistungswerte lassen sich direkt über der Zeitachse mit den anderen Messwerten verknüpfen. Damit ergeben sich vergleichbare Werte zu den Pegelscanmessungen, nur mit dem Vorteil, dass mehr Werte zur Verfügung stehen und die Messwerte direkt für die Sendefrequenz ausgelesen wurden. Für die gleiche Meßstrecke ergibt sich jetzt das Pegeldiagramm entsprechend Abbildung 2.5-12

Zusätzlich wurde ein vom ALF-Empfänger intern zur Verfügung stehendes Qualitätssignal in die Registrierkette eingebunden und mit registriert. Das Qualitätssignal zeigt deutlich weniger Schwankungen als der gemessene Pegel. Der Empfänger kann demnach bis zu einer Empfangsleistung von ca. – 80 dBm die Signale sauber decodieren, erst bei geringeren Pegeln zeigen sich auch im Qualitätssignal deutliche Veränderungen.

2.5.2 Vergleich von DGPS-Korrekturdaten

2.5.2.1 Direkter Vergleich der Entfernungskorrekturwerte

Bei den Messfahrten in Stuttgart wurden die Daten der verschiedenen DGPS-Dienste registriert. Als DGPS-Online Korrektur wurden die ALF-Daten eingesetzt. Abbildung 2.5-14 zeigt diese registrierten Daten für vier Satelliten für eine stationäre Messung auf dem Killesberg. Für diesen Vergleich wurde die stationäre Messung ausgewählt, da sich hier keine Unterbrechungen bei den DGPS-Korrekturdaten durch Abschattungen ergeben konnten.

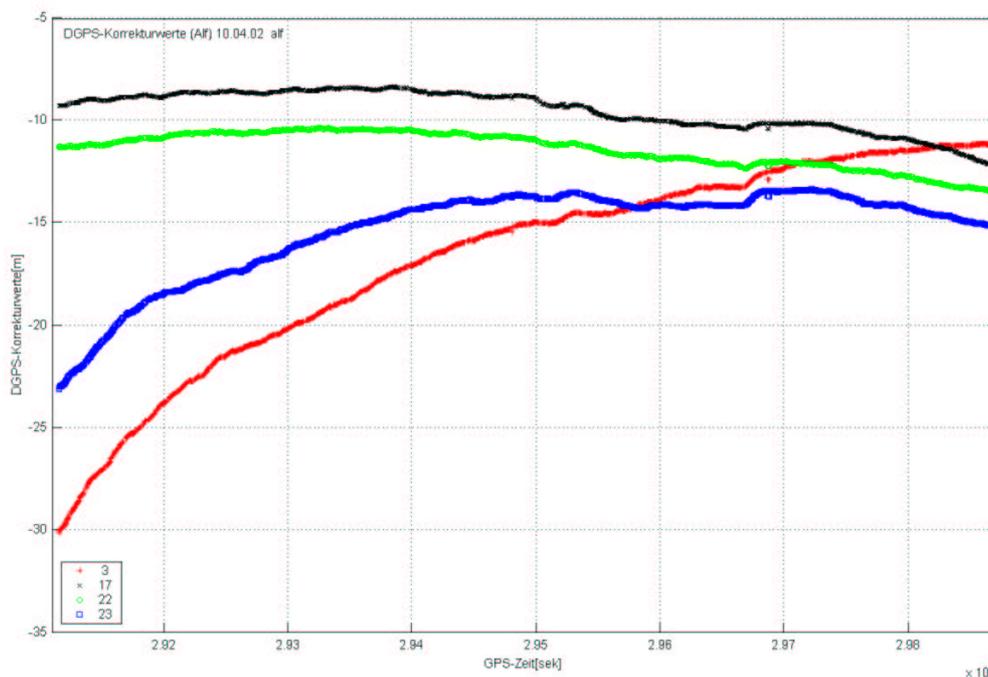


Abbildung 2.5-14: ALF DGPS-Korrekturdaten für die Satelliten 3, 17, 22, 23

Der Kurvenverlauf dieser Daten zeigt eine sehr deutliche Korrelation zwischen den einzelnen Satelliten. Dies kann mit den Daten der anderen DGPS-Dienste untermauert werden. Abbildungen 2.5-15 und 2.5-16 zeigen die Korrekturdaten von AMDS und UKW/Rasant. Bei diesen Korrekturdaten treten Sprünge auf, die unterschiedlich schnell abklingen. Diese Schwankungen in den Korrekturdaten werden durch den nicht absolut korrekt bestimmten Empfängeruhrfehler beim Referenzempfänger erzeugt. Diese in Größe und Vorzeichen gleichen Abweichungen der DGPS-Daten liefern beim Empfänger nur einen zusätzlichen Beitrag beim Uhrfehler, der sich nicht in der Position niederschlagen darf. Voraussetzung ist dabei, dass keine Filter im Empfänger vorhanden sind, die bei den sprunghaften Änderungen dann immer erst einschwingen müssen, d.h. den Zeitfehler nicht sofort vollständig als Uhrenfehler erfassen. Bei hoher Stabilität des Oszillators im Referenzempfänger und geeigneter Software könnten die plötzlichen Veränderungen in den Korrekturdaten vermieden werden.

Die Differenzen zwischen den verschiedenen Korrekturdaten zwischen AMDS und ALF sowie UKW und ALF in Abbildungen 2.5-17 und 2.5-18 zeigen zum Teil deutliche Unterschiede, haben aber einen weitgehend gleichen gemeinsamen Offset. Wichtig ist, dass der Verlauf der Differenzen konstant bleibt und so eine Kompensation dieser Differenzen über den Uhrfehler des Empfängers realisiert werden kann. Dies ist bei ALF und AMDS für die Messung gegeben. Die Differenzen bewegen sich in einem Band von ca. einem Meter. Die Spitzen und deutlichen Sprünge sind durch die Bildung von doppelten Differenzen verschwunden und es bleibt hauptsächlich ein konstanter Offset übrig.

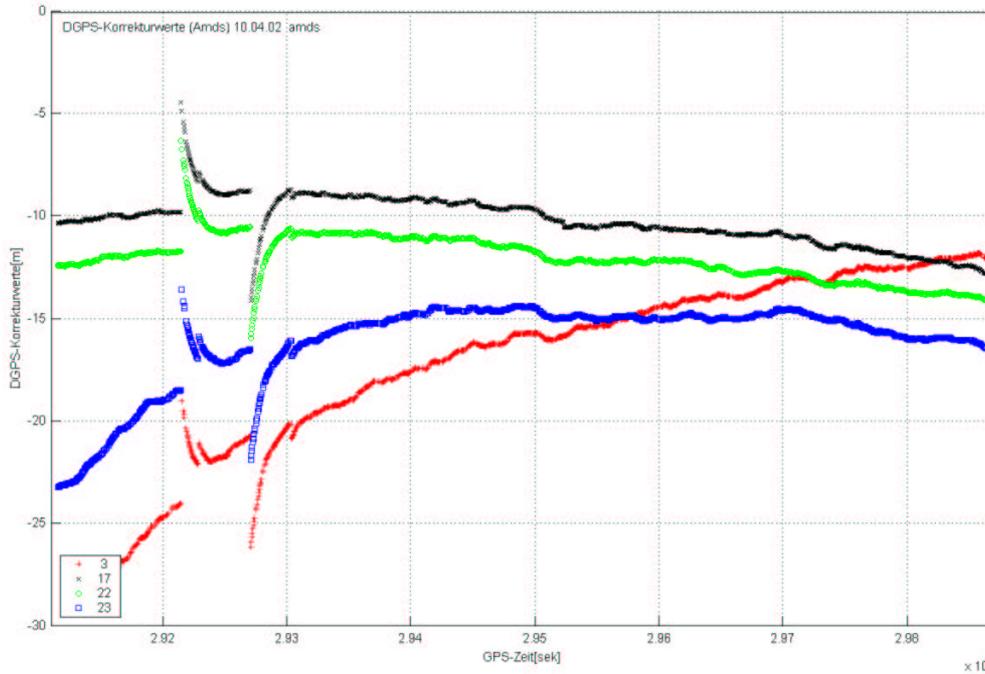


Abbildung 2.5-15: AMDS-Korrekturdaten für die Satelliten 3,17,22,23

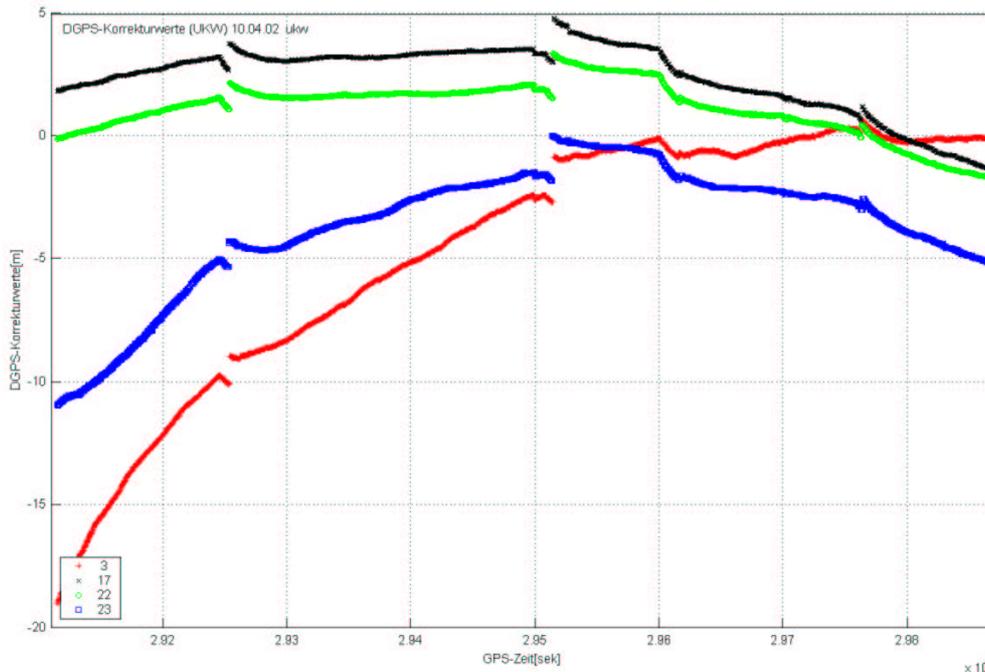


Abbildung 2.5-16: UKW Korrekturdaten für die Satelliten 3,17,22,23

Bei der Differenz zwischen ALF und UKW wird der Abstand zwischen den Differenzen gegen Ende der Messzeit größer. Dieser Sachverhalt kann mit der unterschiedlichen Position der Referenzempfänger erklärt werden. ALF liegt bei

Frankfurt, während der für UKW zuständige Empfänger in Stuttgart aufgestellt ist. Diese Entfernung von ca. 200km verursacht erkennbare Unterschiede in der Signalverzögerung durch die Atmosphäre, die sowohl in der Ionosphäre als auch der Troposphäre entstehen können.

Im nächsten Abschnitt wird eine weitere Untersuchung bezüglich der Korrekturdaten durchgeführt, die den direkten Einfluss auf die Positionsgenauigkeit zeigen soll und der auch den Einfluss des räumlichen Abstandes der Referenzstation zeigen wird.

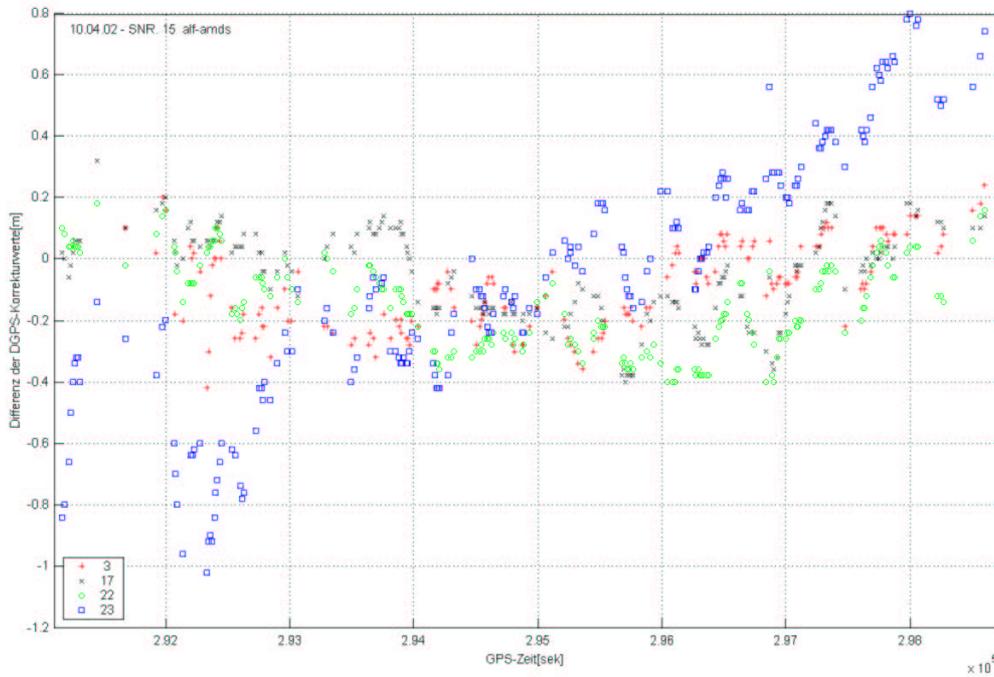


Abbildung 2.5-17: Doppelte Differenzen zwischen ALF- und AMDS-Korrekturdaten bezogen auf Sat.15 für die Satelliten 3,17,22,23

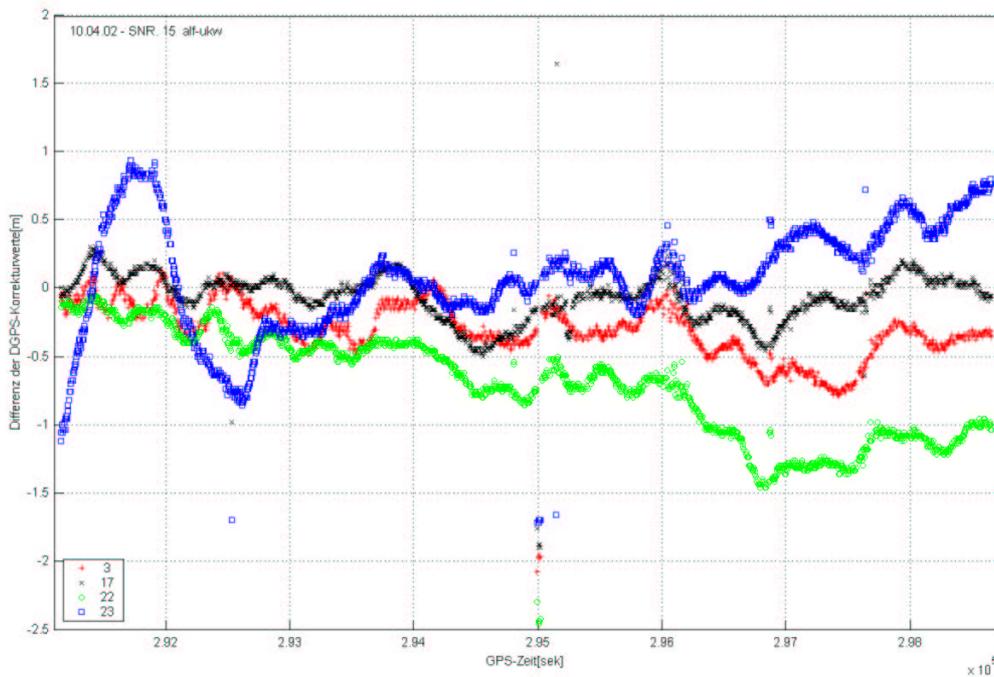


Abbildung 2.5-18: Doppelte Differenzen zwischen ALF- und UKW-Korrekturdaten bezogen auf Sat.15 für die Satelliten 3,17,22,23

2.5.2.2 Erreichbare Positionsgenauigkeiten

Die Positionsgenauigkeit, die mit Hilfe der DGPS-Korrekturen erzielt werden können, hängen von einigen Parametern ab. Diese Parameter sind:

- Datenalter der Korrekturen
- Entfernung der DGPS-Referenzstation von der eigenen Messposition
- Umgebung bei der eigenen Messposition

Der Einfluss all dieser Komponenten auf die Genauigkeit der Positionsberechnung kann nicht allein durch den Vergleich der Korrekturdaten bestimmt werden, sondern muss außerdem über die direkte Positionsberechnung überprüft werden. Hierzu wird mit dem gleichen Rohdatensatz und der gleichen GPS-Software die Positionsberechnung für die verschiedenen DGPS-Dienste vorgenommen.

Für den Vergleich der mit den jeweiligen Korrekturdaten erzielten Positionsverbesserung werden die rohen Pseudorangemessungen eines Empfängers (Trimble, JAVAD oder NovAtel) in das RINEX Format konvertiert. In diesem Format kann mit kommerziellen Programmen eine C/A-Code-Lösung berechnet werden. Der Vergleich dieser Positionen mit den Referenzwerten der Applanix-Lösung liefert eine Aussage über die Genauigkeit der Lösung mit unkorrigierten Pseudorangemessungen. In einem weiteren Schritt werden nun in den RINEX-Daten die Pseudorange-Messungen mit den DGPS-Korrekturwerten verbessert und mit diesen korrigierten Pseudorange-Entfernungen die Positionsbestimmung durchgeführt. Dieses Resultat wird ebenfalls mit der Referenzlösung verglichen. Die DGPS-Korrekturen werden entsprechend der RTCM-Vorschrift angebracht.

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC \cdot (t - t_0)$$

Mit: PRC(t) anzubringende Korrektur
 RRC Korrektur der Entfernungsänderung aus der Nachricht
 t₀ Zeitbezug der Korrektur

t
 Zeitpunkt der Pseudorange-Messung

Die Grundgenauigkeit der Dienste ist mit einer stationären Messung am besten zu beschreiben. Hier können die Ablagen gegenüber einer Referenzposition, d.h. die verbleibenden Restfehler, den Korrekturdaten unmittelbar zugewiesen werden. Dabei bildet die gleiche Verrechnungssoftware und die gleichen GPS-Rohdaten die erforderliche Voraussetzung.

In den Abbildungen 2.5-19 bis 22 sind die Differenzen als Positionsfehler und aufgesplittet in die Komponenten Breite, Länge und Höhe dargestellt. Die sprunghaften Fehler in 2.5-19 bei der unkorrigierten Version treten bei allen DGPS-

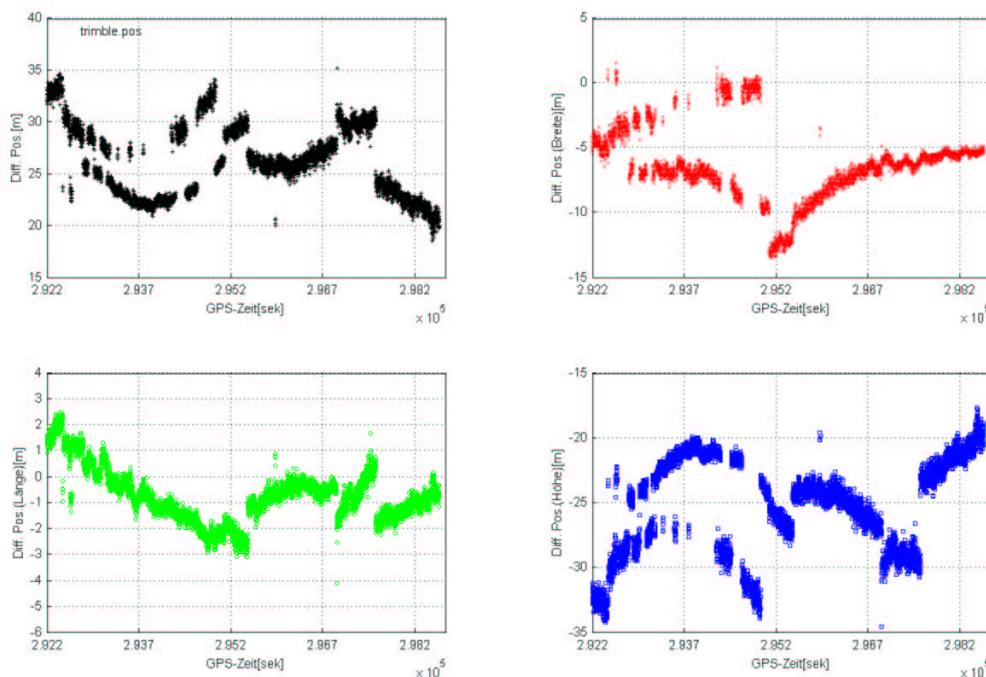


Abbildung 2.5-19: Differenzen zwischen der Referenzposition und den unkorrigierten GPS-Positionen aus den Pseudorangemessungen (C/A-Code)

Versionen (Abb. 2.5-20 bis 22) nicht mehr auf. Die Mittelwerte des Fehlers in der Position und den Komponenten zeigen die erwartete Verbesserung durch die DGPS-Korrekturen, vergleiche Tab 2.5-4 mit 2.5-5 bis 7. Betrachtet man die maximalen Ablagen, so schneidet die Korrektur mittels UKW am besten ab. Bei Mittelwert und Standardabweichung ist keine so klare Tendenz für einen Korrekturdienst erkennbar.

Fehler	Position [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert	26.277	-6.385	-0.753	-25.279
Standardabweichung	3.402	2.325	1.028	3.048
Minimum	18.518	-13.526	-4.103	-34.573
Maximum	35.151	1.502	2.474	-17.747

Tabelle 2.5-4: Differenzen zwischen der Referenzposition und den unkorrigierten GPS-Positionen

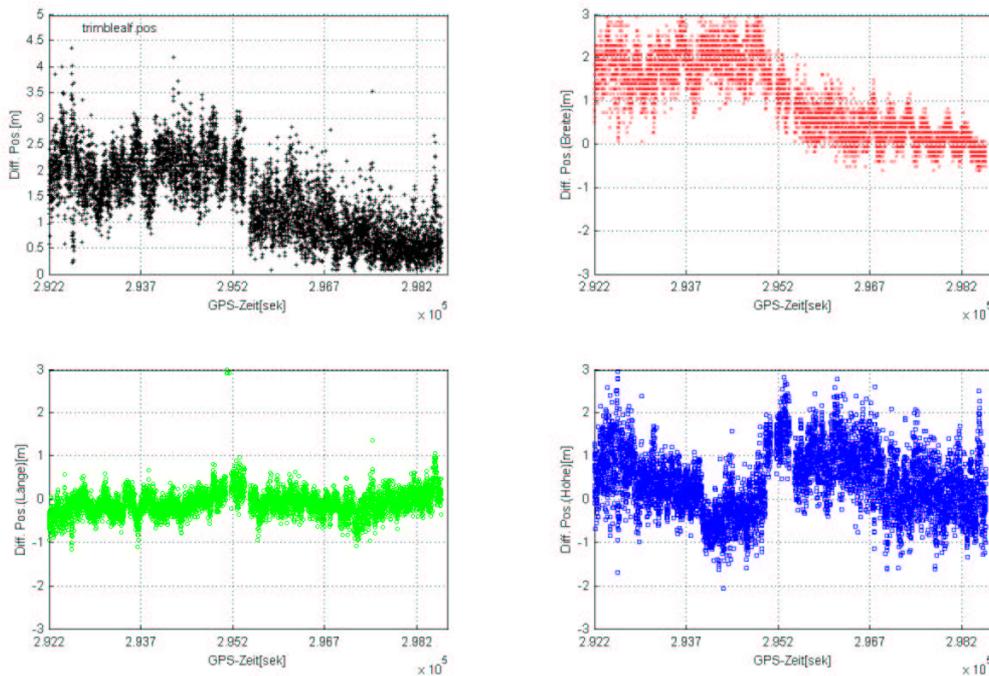


Abbildung 2.5-20: Differenzen zwischen der Referenzposition und den GPS-Positionen aus den mit ALF korrigierten Pseudorangemessungen

Fehler	Position [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert	1.961	0.771	-0.203	0.031
Standardabw.	0.741	0.909	0.452	0.945
Minimum	0.059	-16.198	-12.397	-26.191
Maximum	29.724	6.623	3.611	3.203

Tabelle 2.5-5: Differenzen zwischen der Referenzposition und den ALF korrigierten GPS-Positionen

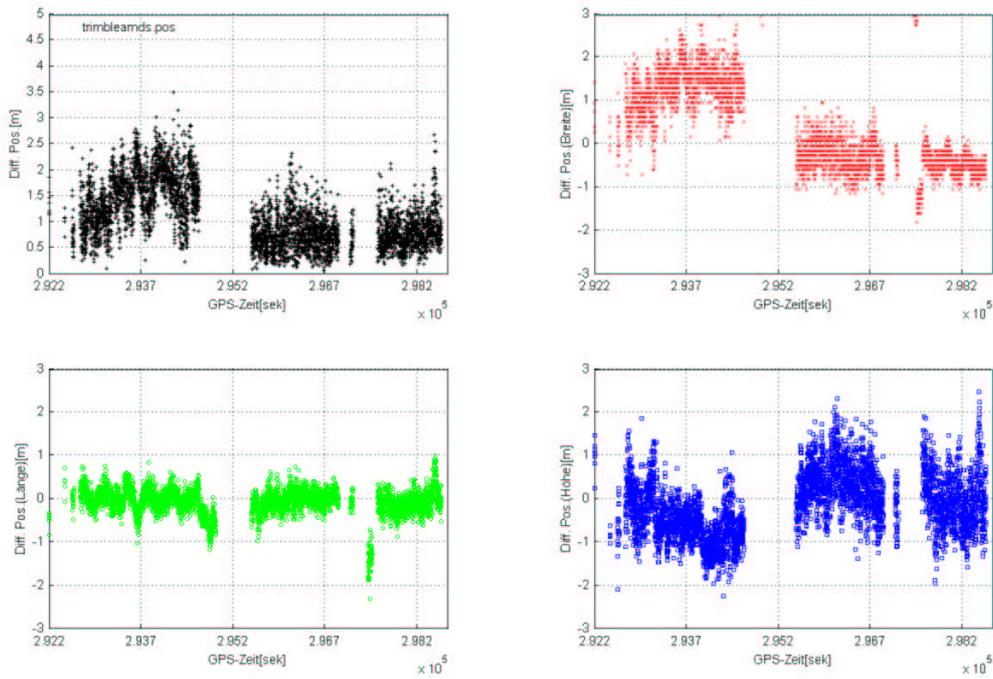


Abbildung 2.5-21: Differenzen zwischen der Referenzposition und den GPS-Positionen aus den mit AMDS korrigierten Pseudorangemessungen

Fehler	Position [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert	9.007	-1.583	-0.741	-6.620
Standardabw.	0.571	1.497	0.315	0.699
Minimum	0.061	-24.881	-12.500	-41.874
Maximum	42.014	18.422	10.233	2.468

Tabelle 2.5-6: Differenzen zwischen der Referenzposition und den AMDS korrigierten GPS-Positionen

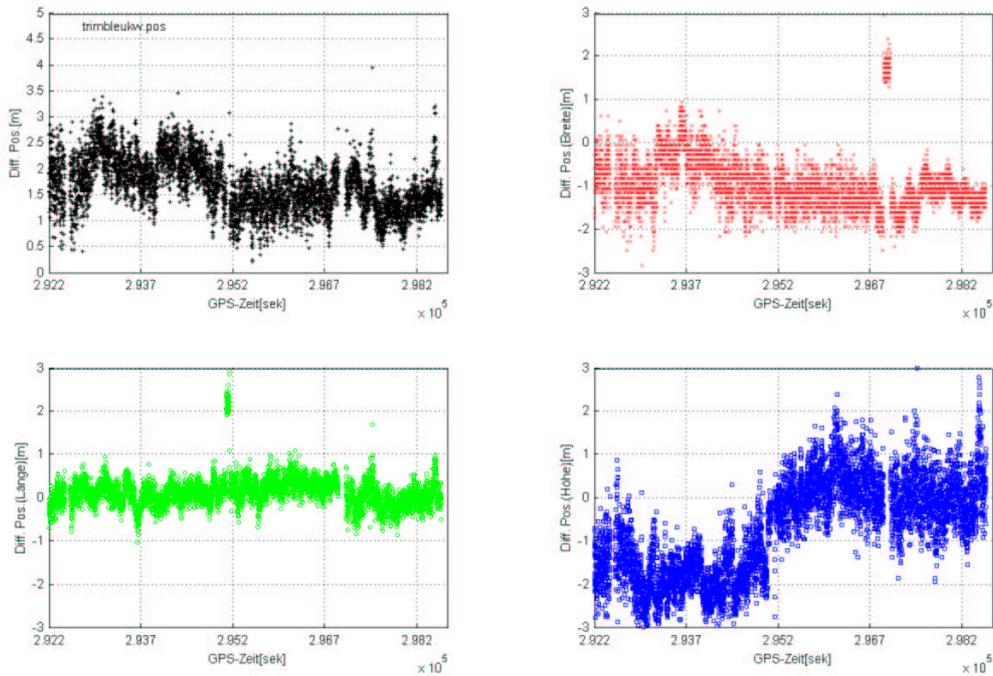


Abbildung 2.5-22: Differenzen zwischen der Referenzposition und den GPS-Positionen aus den mit UKW korrigierten Pseudorangemessungen

Fehler	Position [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert	2.211	-1.159	0.056	-1.147
Standardabw.	0.495	0.631	0.709	1.144
Minimum	0.208	-13.081	-8.562	-18.942
Maximum	20.995	2.949	4.447	2.986

Tabelle 2.5-7: Differenzen zwischen der Referenzposition und den UKW korrigierten GPS-Positionen

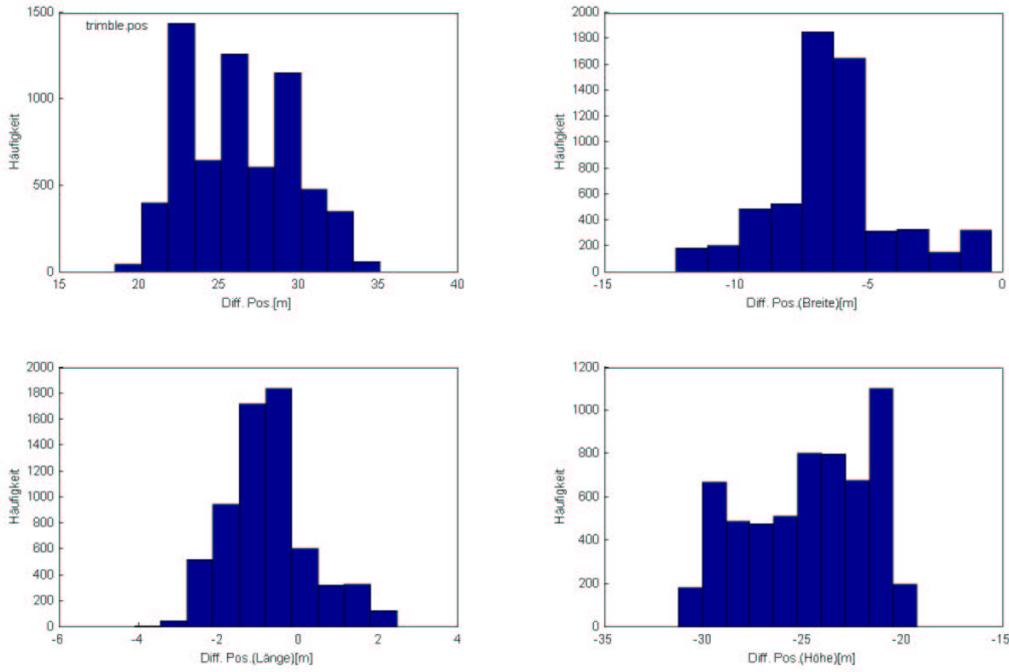


Abbildung 2.5-24: Histogramme der Differenzen zwischen Referenzposition und GPS-Positionen

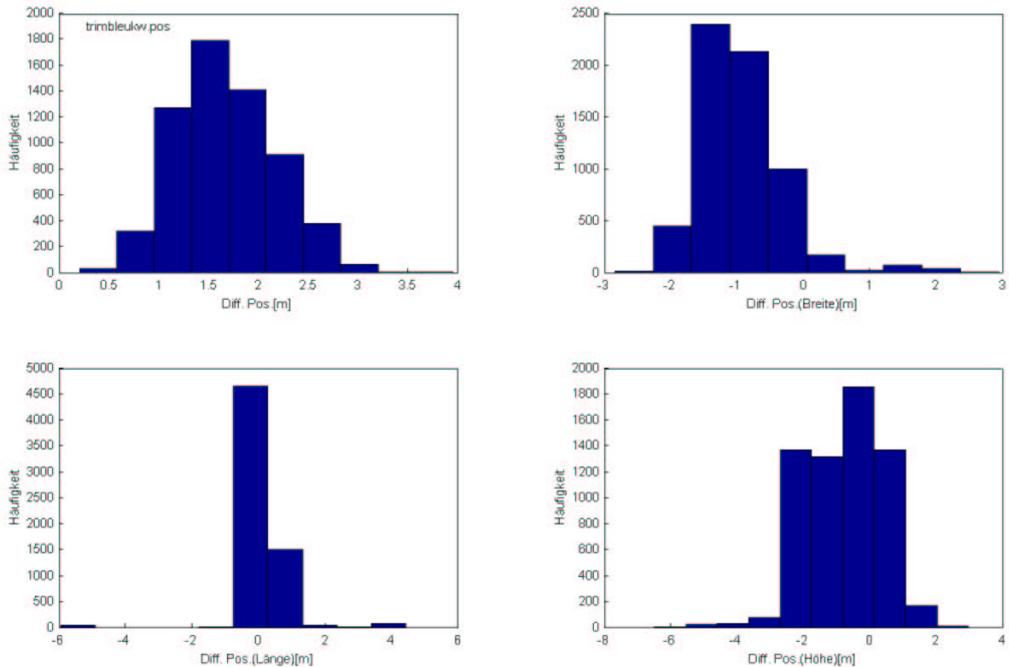


Abbildung 2.5-23: Histogramme der Differenzen zwischen Referenzposition und UKW-DGPS-Positionen

In den Abbildungen 2.5-23 und 2.5-24 sind die Verbesserungen durch die DGPS-Korrekturen in den Histogrammen zu erkennen. Die Positionsablagen und auch die Ablagen in den einzelnen Komponenten sind bei den DGPS korrigierten

Positionen erheblich kleiner und auch in der Verteilung gleichmäßiger. Dies ist auch aus den Standardabweichungen in den Tabellen 2.5-4 bis 2.5-7 ersichtlich. Die Standardabweichung in der Position hat sich von 3.4m bei den unkorrigierten Positionen auf kleiner 75 cm bei den differenziell korrigierten Positionen verringert. Der Unterschied bei den Ergebnissen für die DGPS-Dienste ist nicht so deutlich, so dass hier eine Einstufung der Dienste nicht sinnvoll erscheint.

2.5.3 Beurteilung in Abhängigkeit der Umgebung

Werden die gleichen Untersuchungen an den Datensätzen durchgeführt, die z.B. während der Fahrt durch die Testgebiete, Weinsteige, Kräherwald und Stuttgarter Hafen aufgenommen wurden, so ergeben sich zwar vergleichbare Verbesserungen bei den Mittelwerten der Ablagen, aber bedingt durch die starken Fehler bei den Pseudostrecken, die durch Mehrwege-Einflüsse verursacht werden, deutlich höhere Standardabweichungen. Die über DGPS erwartete Genauigkeit von besser als 5m kann in vielen Punkten nicht eingehalten werden. Hier sind die Mehrwegefehler bei den Pseudorange-Messungen so groß, dass Ablagen von mehreren Zehner-Metern bei der Position entstehen. Die Abbildungen 2.5-24 bis 2.5-27 zeigen die Ablagen der GPS und DGPS-Positionen gegenüber den Referenzwerten von Applanix.

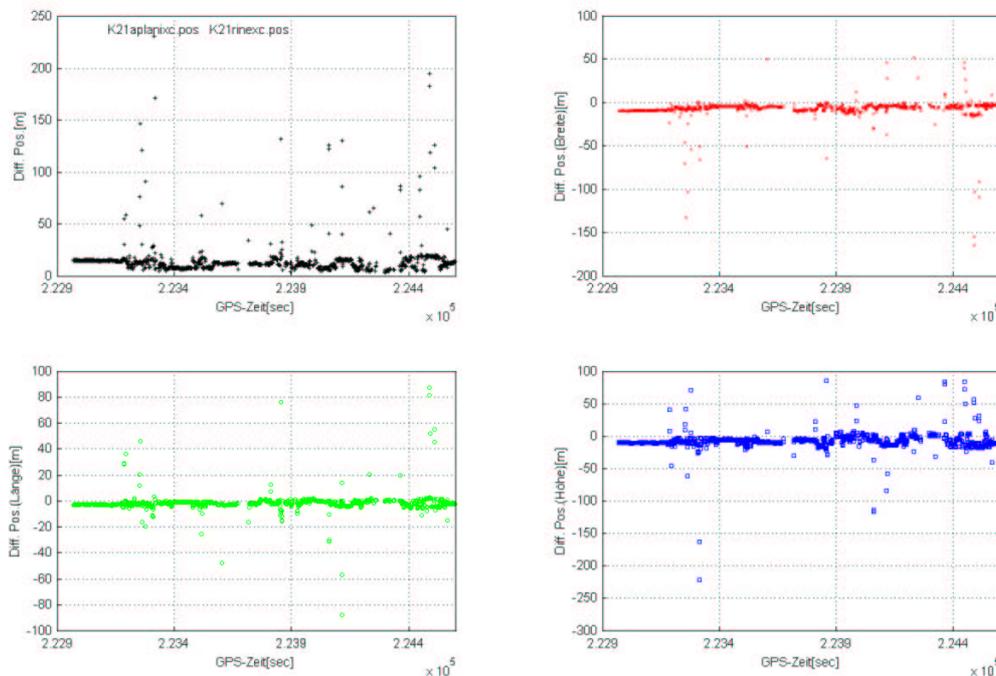


Abbildung 2.5-25: Messfahrt Kräherwald / Differenzen APPLANIX und einfache GPS-C/A-Code Position

Bei den Ablagen für die reine C/A-Code Positionsbestimmungen ist in Abbildung 2.5-25 der volle Skalenbereich genutzt, um die Größenordnung der Fehler zu zeigen. Hier sind Fehler bis 100m relativ häufig vertreten und auch einzelne Ausreißer bis 200m und darüber zu verzeichnen. Diese große Ablagen bleiben auch bei den DGPS korrigierten Verrechnungen erhalten, wie in Abbildung 2.5-27 für die UKW-Korrektur gezeigt wird. Werden die Skalierungen der Diagramme auf den Hauptteil der Fehler ($-5\text{m} < d < 5\text{m}$) begrenzt, so zeigen sich auch hier deutlich die erreichten Verbesserungen (Abbildungen 2.5-26 und 28). In Tabelle 2.5-8 sind die Resultate für die DGPS-Dienste und der reinen GPS-Lösung für die Teststrecken in Stuttgart zusammengestellt. Da die groben Fehler durch Mehrwege-Effekte die Resultate dominieren, sind die Statistiken zusätzlichen für einen eingeschränkten Fehlerbereich von $\pm 5\text{m}$ berechnet worden. Für diesen eingeschränkten Fehlerbereich zeigt sich in den Abb. 2.5-29 und 30 für die Mittelwerte und die Standardabweichungen ein Vorteil für UKW-Verbesserungen. Dieser Vorteil liegt in der ortsnahen Referenzstation für den UKW-Dienst in Stuttgart direkt. Dieser Effekt ist ebenfalls in der deutlich besseren Fehlerverteilung in den Histogrammen zu erkennen, siehe Abb. 2.5-31 bis 33. Hier ist die Verteilung von UKW (zweite Reihe von oben) am gleichförmigsten und am besten um Null zentriert.

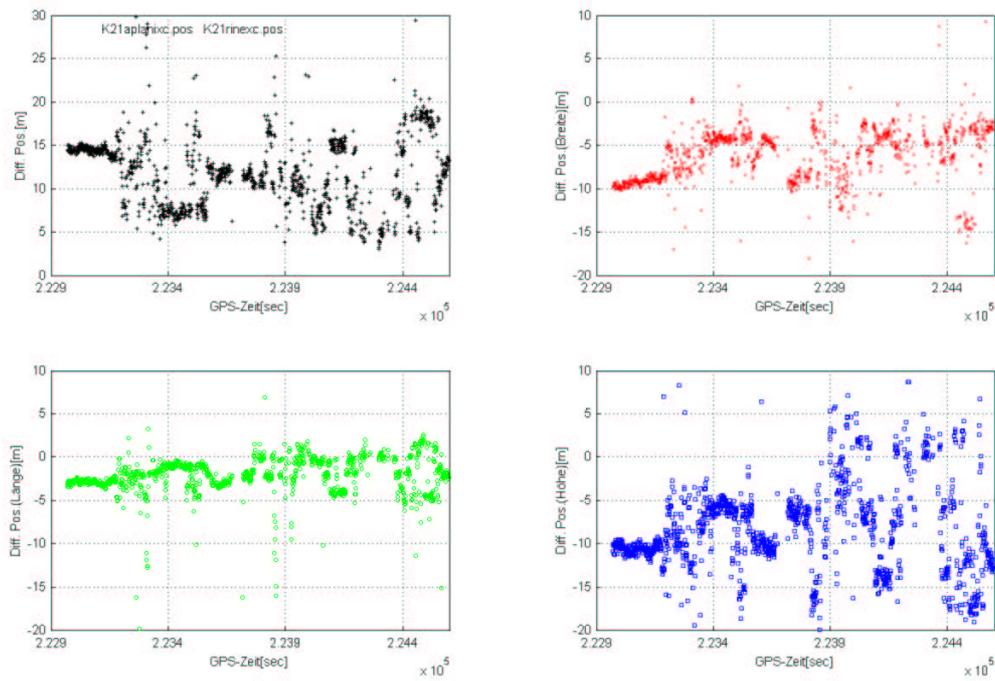


Abbildung 2.5-26: Messfahrt Kräherwald / Differenzen APPLANIX und einfache GPS-C/A-Code Position (Skalenbereich für die Differenzen eingeschränkt)

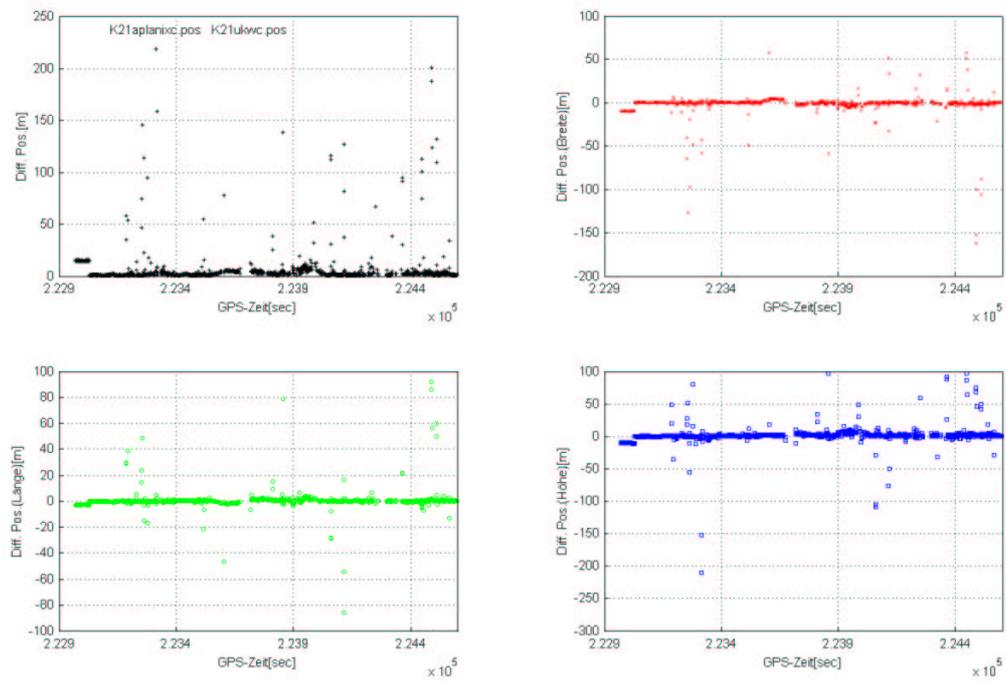


Abbildung 2.5-27: Messfahrt Kräherwald / Differenzen APPLANIX und UKW-DGPS-Position

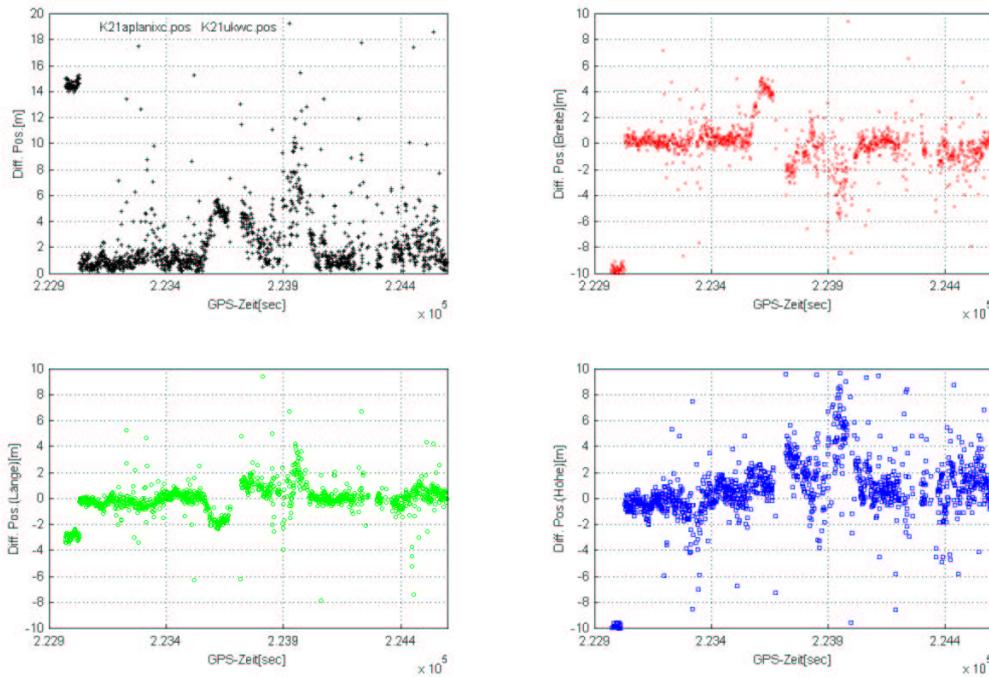


Abbildung 2.5-28: Messfahrt Kräherwald / Differenzen APPLANIX und UKW-DGPS-Position (Skalenbereich für die Differenzen eingeschränkt)

Messfahrt im Hafen Stuttgart -- ohne Korrektur			
	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert alle Werte	-1.57	1.20	-10.00
Standardabweichung alle Werte	22.99	9.43	21.39
Mittelwert Werte < 5m	-1.88	1.04	-9.90
Standardabweichung Werte < 5m	2.50	1.22	2.63
Größter negativer Fehler	-717.25	-280.23	-328.56
Größter positiver Fehler	201.45	66.38	170.18
Messfahrt im Hafen Stuttgart -- UKW Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-0.66	-0.32	-1.23
Standardabweichung alle Werte	23.65	9.37	17.00
Mittelwert Werte < 5m	-0.22	-0.13	0.25
Standardabweichung Werte < 5m	1.14	0.71	1.19
Größter negativer Fehler	-816.33	-311.01	-367.84
Größter positiver Fehler	199.22	47.60	149.01
Messfahrt im Hafen Stuttgart -- ALF Korrektur			
Mittelwert alle Werte	0.68	0.23	-3.01
Standardabweichung alle Werte	23.21	9.24	17.96
Mittelwert Werte < 5m	1.10	0.39	-1.33
Standardabweichung Werte < 5m	2.51	1.05	2.19
Größter negativer Fehler	-794.06	-304.68	-357.59
Größter positiver Fehler	202.34	48.74	145.71
Messfahrt im Hafen Stuttgart -- AMDS Korrektur			
Mittelwert alle Werte	0.21	0.34	-1.27
Standardabweichung alle Werte	24.87	10.02	19.92
Mittelwert Werte < 5m	1.48	0.20	-0.27
Standardabweichung Werte < 5m	1.72	1.10	1.91
Größter negativer Fehler	-795.29	-304.82	-358.49
Größter positiver Fehler	202.45	77.98	191.51
Messfahrt Weinsteige Stuttgart -- ohne Korrektur			
	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert alle Werte	-4.91	-2.67	-12.15
Standardabweichung alle Werte	20.86	8.43	18.98

Mittelwert Werte < 5m	-3.09	-2.59	-12.21
Standardabweichung Werte < 5m	1.67	1.01	2.03
Größter negativer Fehler	-342.59	-117.78	-254.38
Größter positiver Fehler	137.73	118.86	166.73
Messfahrt Weinsteige Stuttgart -- UKW Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-2.29	-0.42	0.82
Standardabweichung alle Werte	20.47	8.19	18.56
Mittelwert Werte < 5m	-0.46	-0.33	0.90
Standardabweichung Werte < 5m	1.08	0.81	1.34
Größter negativer Fehler	-334.46	-113.18	-243.71
Größter positiver Fehler	139.96	122.21	176.21
Messfahrt Weinsteige Stuttgart -- ALF Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-1.56	-1.75	1.59
Standardabweichung alle Werte	20.57	8.24	18.82
Mittelwert Werte < 5m	0.27	-1.66	1.82
Standardabweichung Werte < 5m	1.56	0.82	1.68
Größter negativer Fehler	-333.91	-114.78	-242.84
Größter positiver Fehler	141.18	120.33	177.59
Messfahrt Weinsteige Stuttgart -- AMDS Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-1.52	-1.75	1.04
Standardabweichung alle Werte	20.84	8.35	18.92
Mittelwert Werte < 5m	0.34	-1.65	1.32
Standardabweichung Werte < 5m	1.60	0.89	1.67
Größter negativer Fehler	-340.81	-117.44	-242.90
Größter positiver Fehler	141.07	120.30	178.70
Messfahrt Kräherwald Stuttgart -- ohne Korrektur			
	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Mittelwert alle Werte	-6.89	-1.80	-8.29
Standardabweichung alle Werte	10.62	6.55	12.77
Mittelwert Werte < 5m	-6.39	-2.13	-7.83
Standardabweichung Werte < 5m	2.44	1.46	2.26
Größter negativer Fehler	-165.08	-88.04	-221.36
Größter positiver Fehler	52.58	86.96	85.30
Messfahrt Kräherwald Stuttgart -- UKW Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-1.19	0.19	0.67
Standardabweichung alle Werte	10.63	6.47	12.33
Mittelwert Werte < 5m	-0.51	-0.22	1.14
Standardabweichung Werte < 5m	1.86	1.13	1.60
Größter negativer Fehler	-162.30	-85.79	-210.32
Größter positiver Fehler	58.65	91.57	96.51
Messfahrt Kräherwald Stuttgart -- ALF Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-0.31	-0.96	1.92
Standardabweichung alle Werte	10.64	6.44	12.43
Mittelwert Werte < 5m	0.40	-1.36	2.52
Standardabweichung Werte < 5m	1.90	1.11	1.66
Größter negativer Fehler	-159.96	-87.49	-210.59
Größter positiver Fehler	59.50	89.81	97.44
Messfahrt Kräherwald Stuttgart -- AMDS Korrektur			
Mittelwert alle Werte	-0.31	-0.92	1.39
Standardabweichung alle Werte	10.66	6.45	12.40
Mittelwert Werte < 5m	0.34	-1.32	1.99
Standardabweichung Werte < 5m	1.92	1.09	1.67
Größter negativer Fehler	-159.85	-87.68	-210.88
Größter positiver Fehler	60.39	89.90	96.51

Tabelle 2.5-8: Vergleich der C/A-Code Positionslösungen gegenüber der APPLANIX-Referenz für die Stuttgarter Teststrecken (reine GPS- und DGPS-Lösungen)

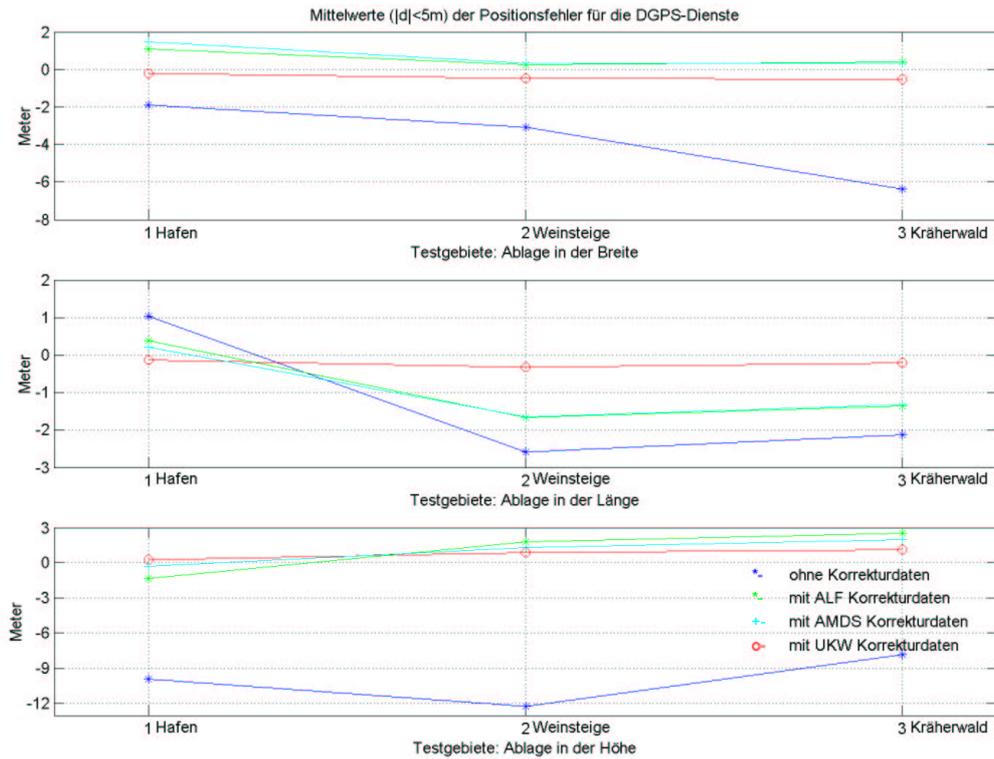


Abbildung 2.5-29: Mittelwerte der Fehler in den Positionskomponenten gegenüber APPLANIX bei Ausschluss grober Fehler < 5m

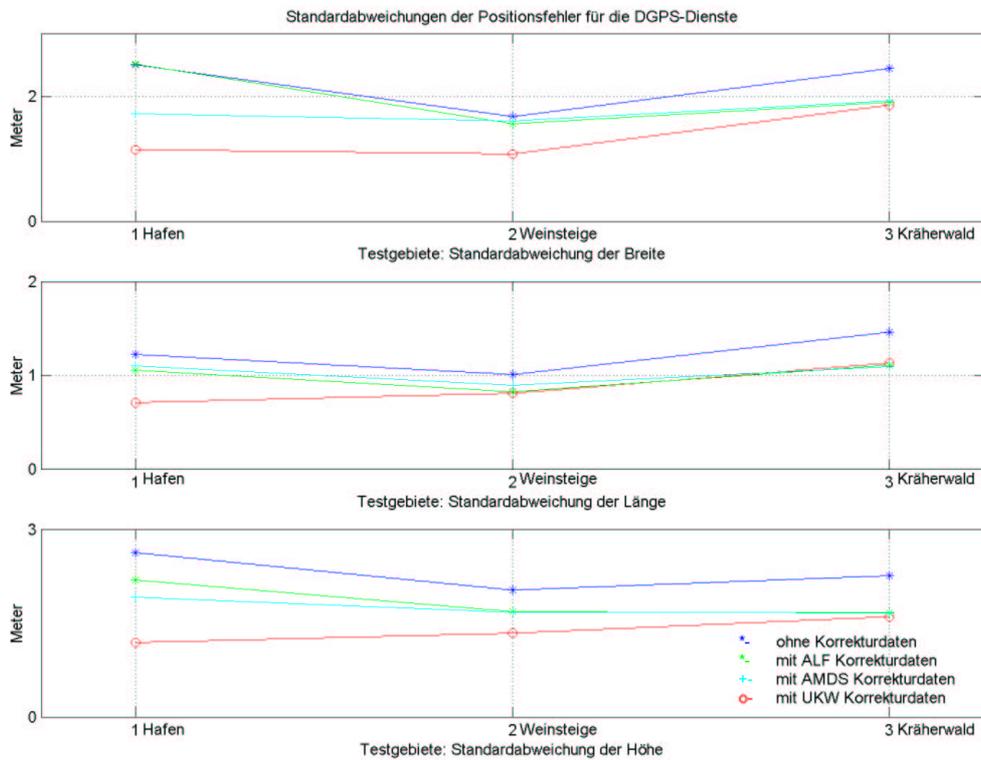


Abbildung 2.5-30: Standardabweichungen der Fehler in den Positionskomponenten gegenüber APPLANIX bei Ausschluss grober Fehler < 5m

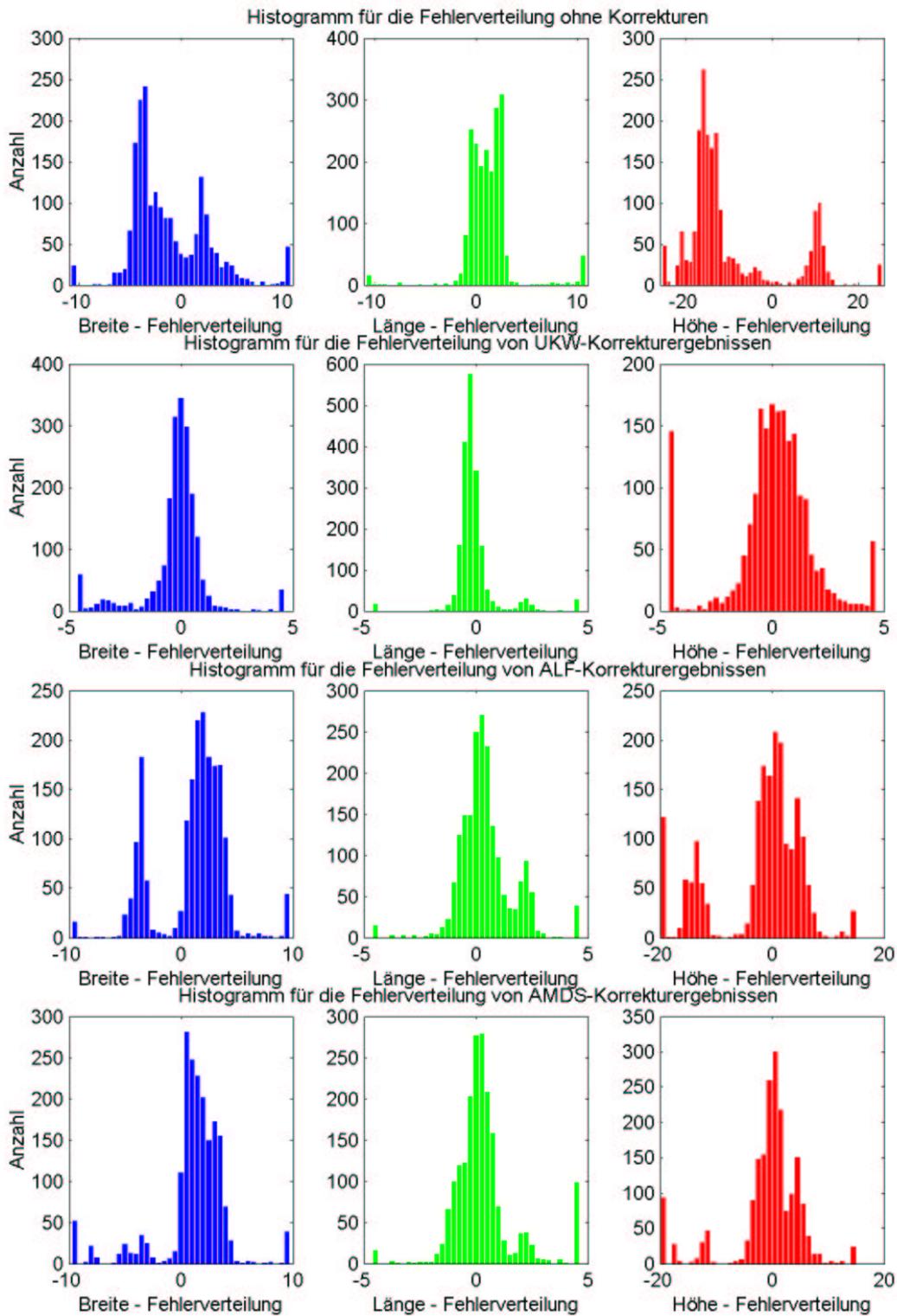


Abbildung 2.5-31: Fehlerverteilung der Positionsfehler bei der Messfahrt Hafen für die verschiedenen DGPS-Dienste

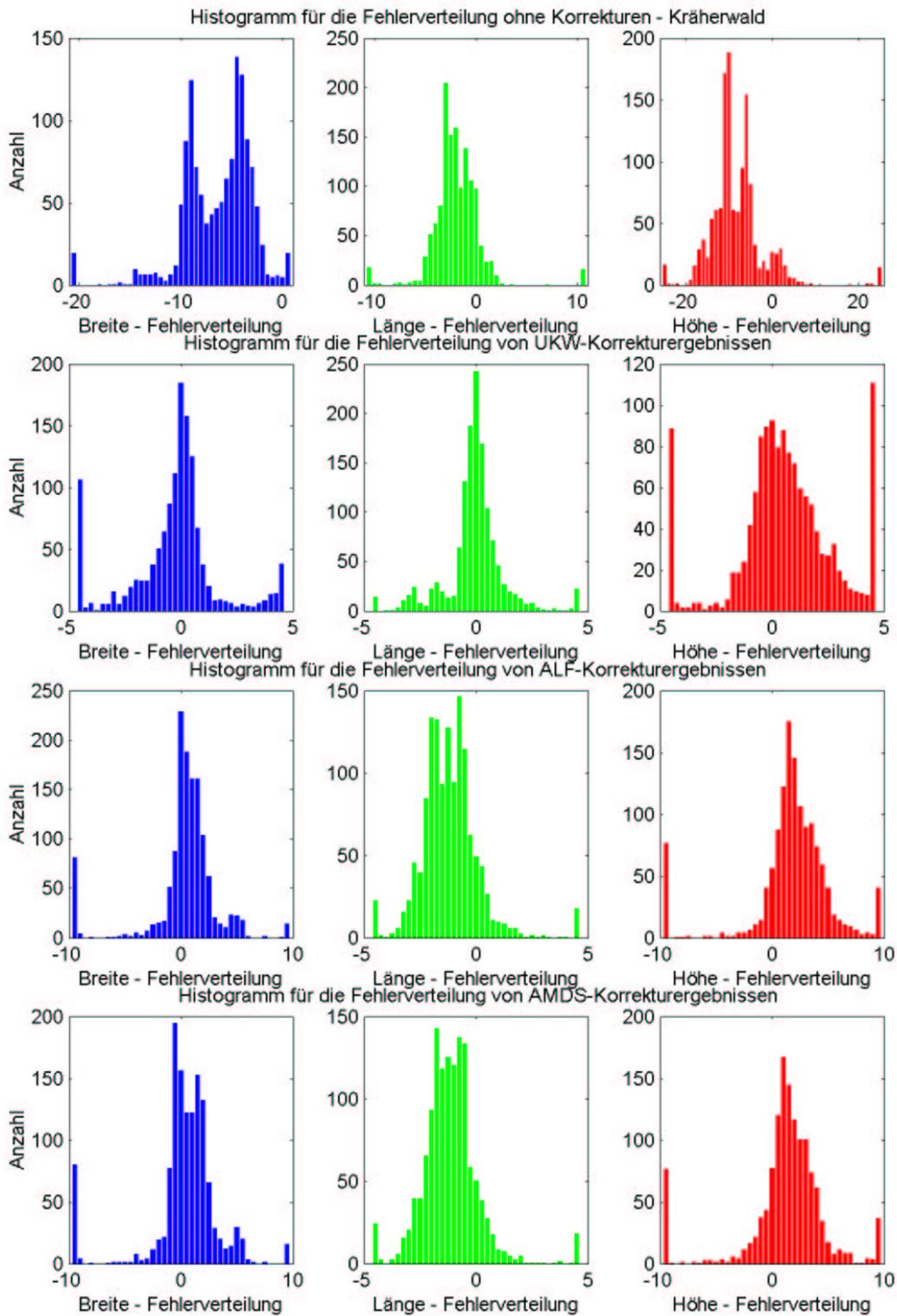


Abbildung 2.5-32: Fehlverteilung der Positionsfehler bei der Messfahrt Kräherwald für die verschiedenen DGPS-Dienste

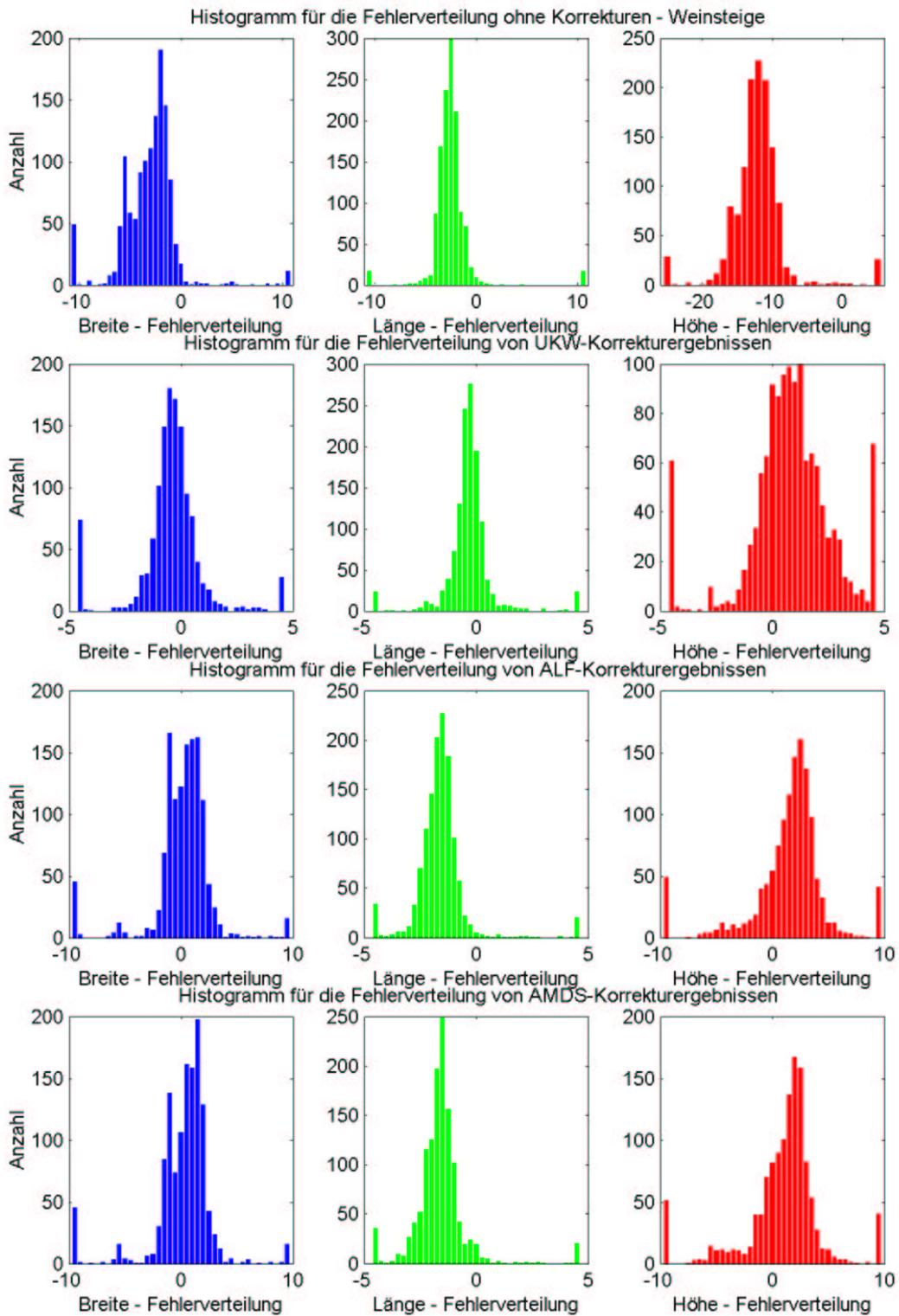


Abbildung 2.5-33: Fehlverteilung der Positionsfehler bei der Messfahrt Weinsteige für die verschiedenen DGPS-Dienste

2.5.4 Verfügbarkeit und Alter der DGPS Korrekturen während der Messfahrten

Die Korrekturdaten für den Echtzeitbetrieb werden durch Funkübertragung zur Verfügung gestellt und unterliegen damit wie die GPS-Signale Ausbreitungseffekten. Neben diesen elektromagnetischen Einflüssen müssen noch die zeitlichen Effekte erwähnt werden. Hier sind die Aufbereitung der Korrekturdaten und die Übertragungskette die Ursache für Zeitverzögerungen. Diese Verzögerungen sind seit Wegfall des SA und bei Nutzung der C/A-Code Lösung zur Positionsbestimmung von untergeordneter Bedeutung. Wie bereits im Abschnitt 2.4.1 ausgeführt, sind für die Übertragung eines kompletten neuen Korrekturdatensatzes bei AFL 3 Sekunden vorgesehen, bei AMDS 2-3 Sekunden und auch bei UKW 2-3 Sekunden, wobei hier keine Störungen auf der Übertragungsstrecke eintreten dürfen.

Verfügbarkeit und Datenalter stehen in einem unmittelbaren Zusammenhang. Werden über eine gewisse Zeit keine Daten empfangen, so erhöht sich gleichzeitig das Alter der verwendeten DGPS-Korrekturdaten für den jeweiligen GPS-Empfänger. Entsprechend der Einstellung bei den GPS-Empfängern werden die Korrekturdaten bis zu einem voreingestellten Alter benutzt und dann verworfen. Dies bedeutet, dass z.B. beim Trimble nach 100 Sekunden (dieser Wert kann verändert werden) vom DGPS Modus auf den Normalmodus ohne Korrektur umgeschaltet wird. Sobald ein neuer und vollständiger Korrekturdatensatz verfügbar ist, wird wieder auf den DGPS-Modus gegangen.

Bei der Nutzung der DGPS-Dienste zur Steigerung der Genauigkeit von GPS in Echtzeit spielt somit die Empfangbarkeit eine entscheidende Rolle. Da die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen von der Topographie und der Bedeckung durch Vegetation und Gebäude abhängig ist, werden mit den Messfahrten für die ausgesuchten Gegenden die Empfangsbedingungen ermittelt.

In den Abbildungen 2.5-34 und 2.5-35 sind für den Hafen beispielhaft die aus den Messungen aufbereiteten Grafiken dargestellt. Abbildung 2.5-34 liefert das Datenalter an der jeweiligen Fahrzeugposition, während Abbildung 2.5-35 eine Darstellung über der Messzeit zeigt. Hier ergeben sich für die mittlere Straße, den Mittelkai, erhöhte Ausfälle beim Empfang. Dies kann direkt auf die höheren Gebäude zu beiden Seiten der Straße zurückgeführt werden. Abbildung 2.5-36 liefert die prozentualen Anteile des Empfang der verschiedenen DGPS-Dienste.

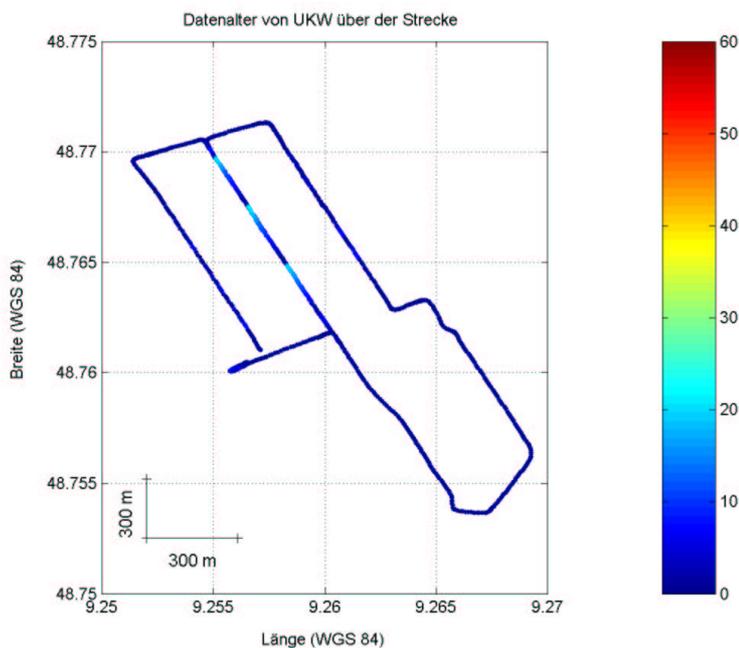


Abbildung 2.5-34: Datenalter über der Fahrtstrecke „Hafen 2“

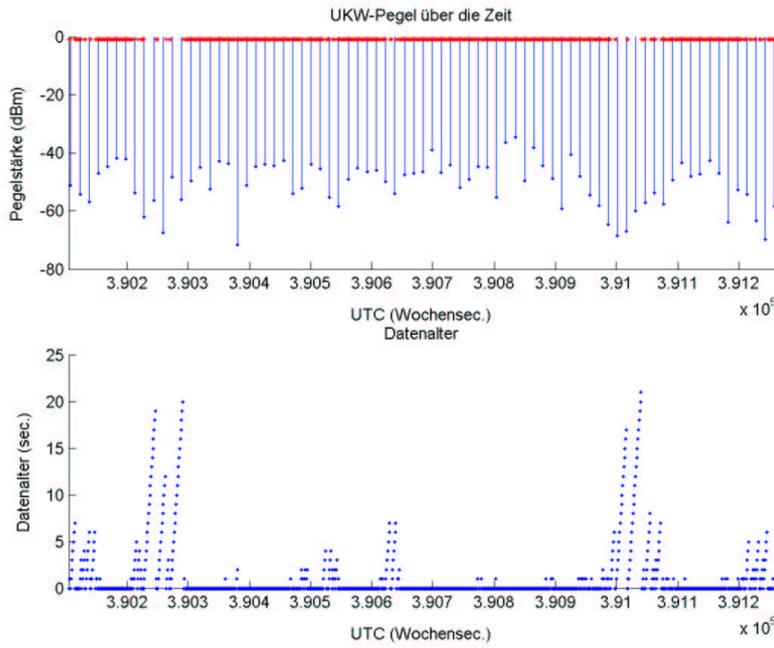
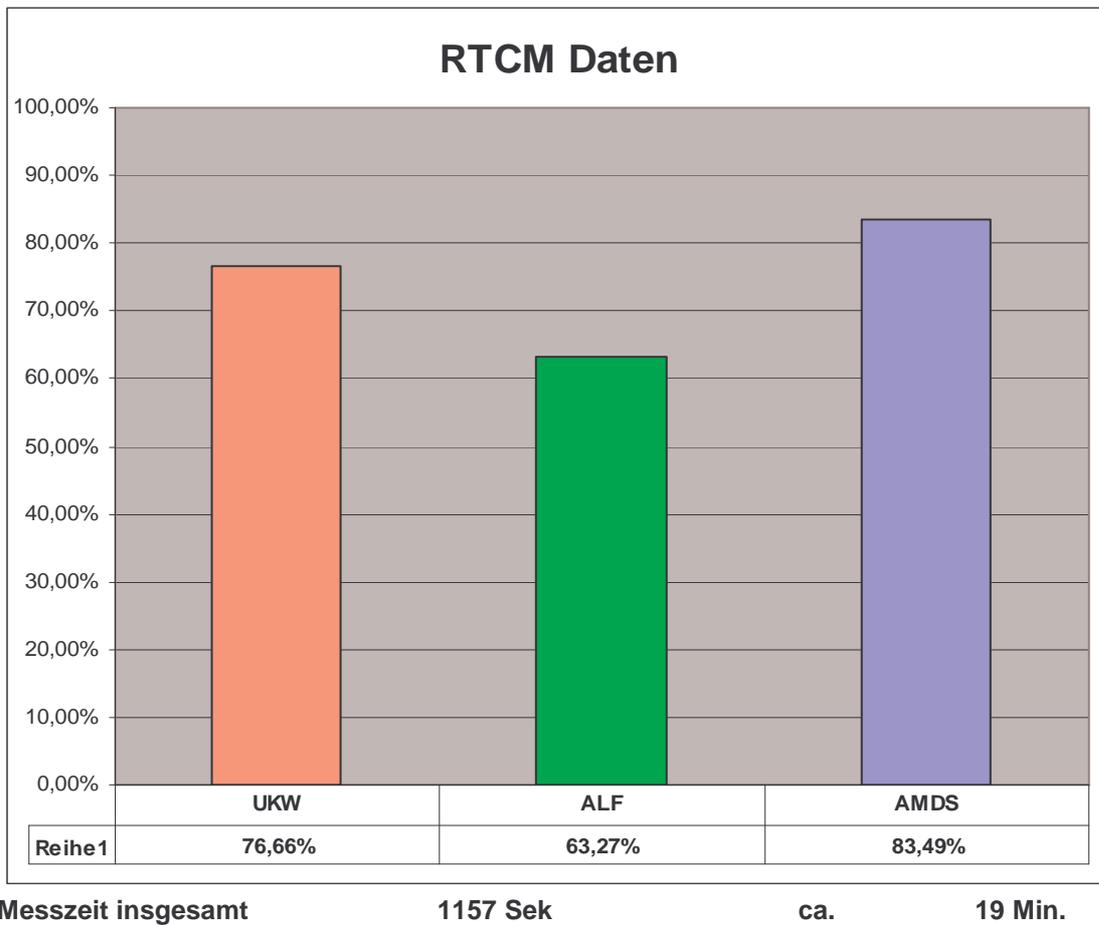


Abbildung 2.5-35: Datenalter und Empfangsleistung über der Zeitachse für die Messfahrt „Hafen 2“



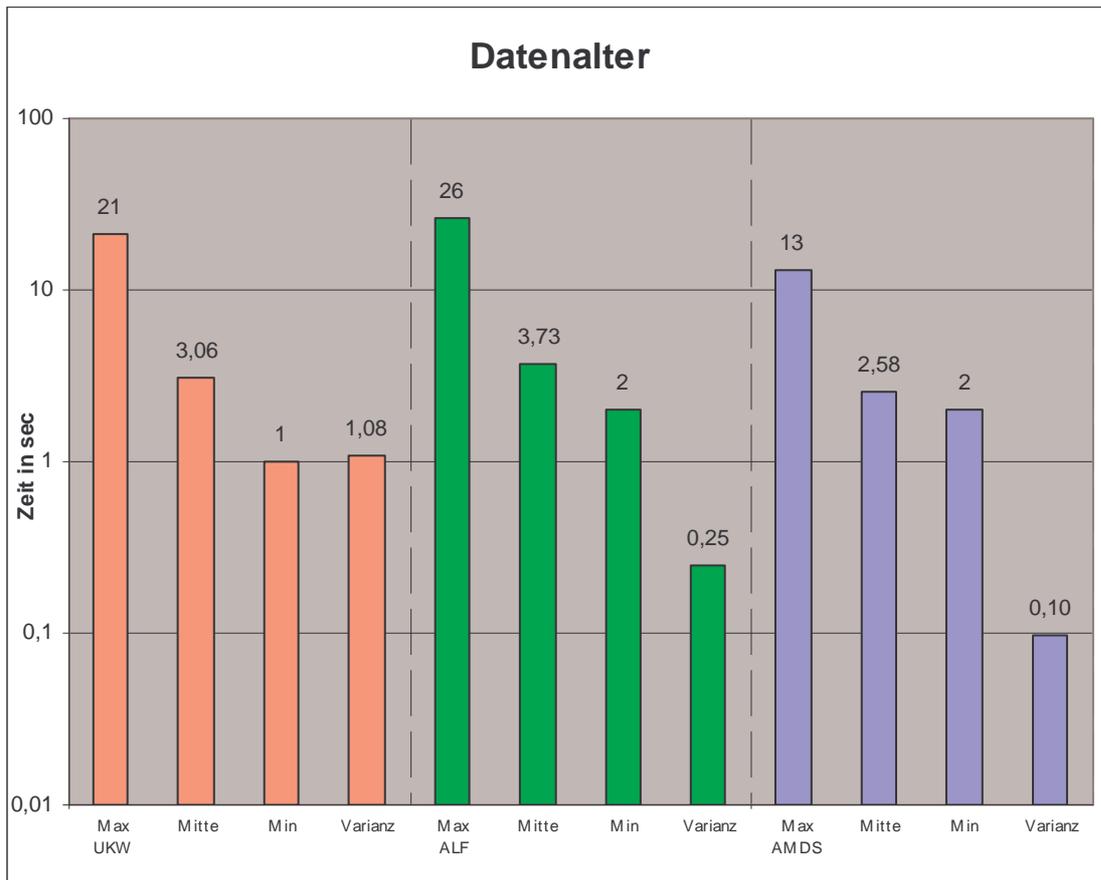


Abbildung 2.5-36: Messfahrt Hafen 2 Empfang der DGPS-Dienste und das Datenalter

Differential GPS corrections FRAME 01
M-Z-Count : 41107.2

SV	Factor	UDRE m	PsRangeCo m	RaRaCo m/s	IOD	M-Z-Count
17	fine	... 1	-10.92	0.000	170	41107.2
30	fine	... 1	-42.40	-0.006	207	41107.2
23	fine	... 1	-27.54	0.000	192	41107.2
25	fine	... 1	-22.52	0.008	233	41107.2
22	fine	... 1	-15.12	0.000	146	41107.2
3	fine	... 1	-28.68	-0.004	207	41107.2
6	fine	... 1	-12.02	0.006	99	41086.2
15	fine	... 1	-14.56	-0.002	88	41086.2
10	fine	... 1	-26.88	0.000	12	41086.2

Differential GPS corrections FRAME 01
M-Z-Count : 41115.0

SV	Factor	UDRE m	PsRangeCo m	RaRaCo m/s	IOD	M-Z-Count
17	fine	... 1	-10.92	0.000	170	41115.0
30	fine	... 1	-42.50	-0.002	207	41115.0
23	fine	... 1	-27.52	-0.012	192	41115.0
25	fine	... 1	-22.54	0.004	233	41115.0
22	fine	... 1	-15.10	0.002	146	41115.0
3	fine	... 1	-28.66	0.000	207	41115.0
6	fine	... 1	-12.10	0.004	99	41115.0
15	fine	... 1	-14.50	0.000	88	41115.0
10	fine	... 1	-26.94	0.004	12	41115.0

Tabelle 2.5-9 Differentielle Korrekturdaten von AMDS

Bei den DGPS-Korrekturdaten werden die Informationen zur Verbesserung in FRAMES geliefert, die jeweils mit einer Zeitmarke versehen sind. Diese als M-Z-Count gekennzeichnete Zeit wird einmal für den gesamten Frame und dann auch noch für die Korrekturen jedes Satelliten (siehe Tab. 2.5-9) angegeben. Hier treten häufig Unterschiede zwischen den

Zeiten innerhalb eines Frames auf, so dass kein einheitliches Datenalter angegeben werden kann. In Abbildung 2.5-37 sind die Zeitdifferenzen innerhalb eines Frames als Histogramme für ALF,

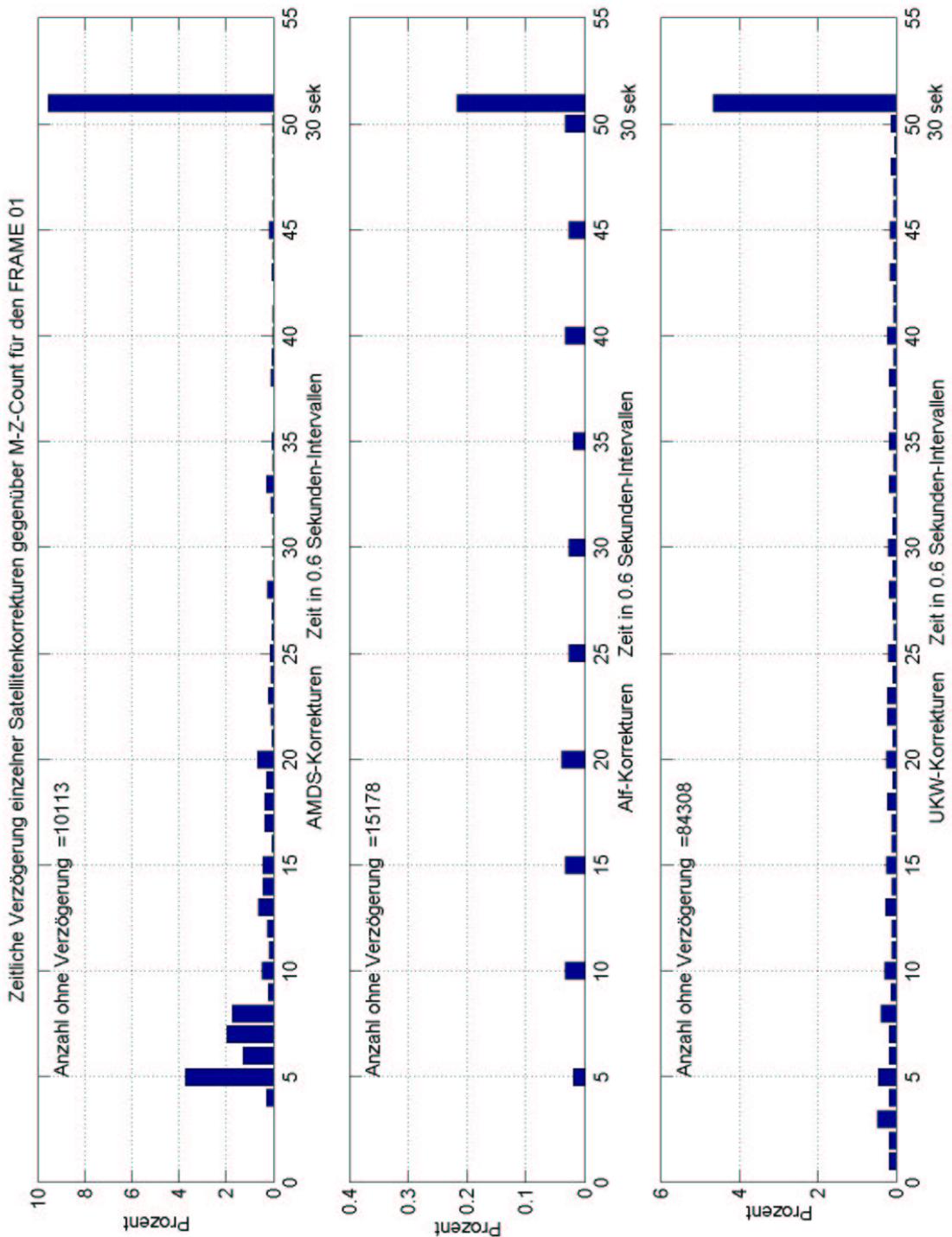


Abbildung 2.5-37 Zeitunterschiede innerhalb des FRAMES 01 bei den DGPS-Korrekturdaten

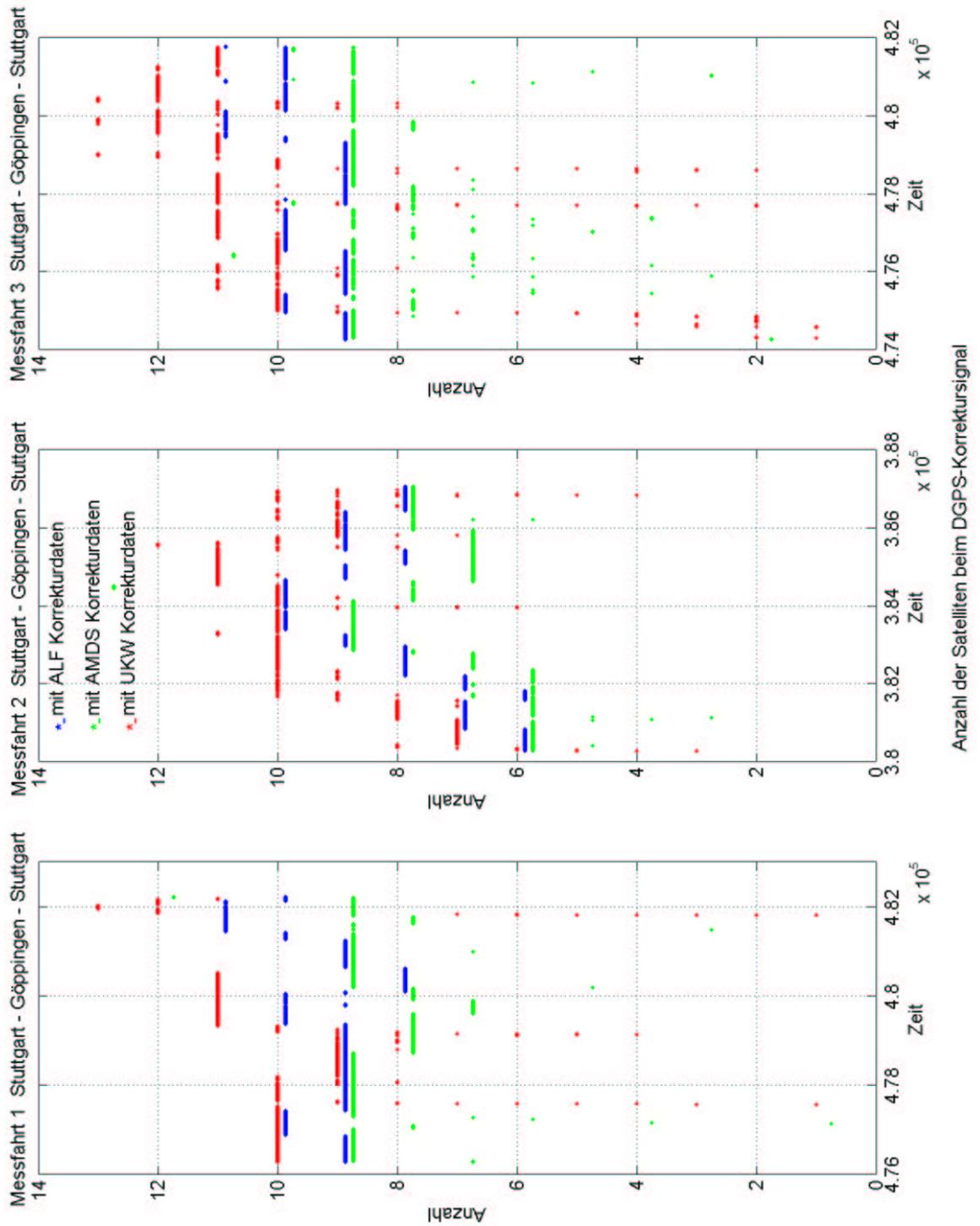


Abbildung 2.5-38 Anzahl der Satelliten in den FRAMES 01 für die DGPS-Korrekturdienste

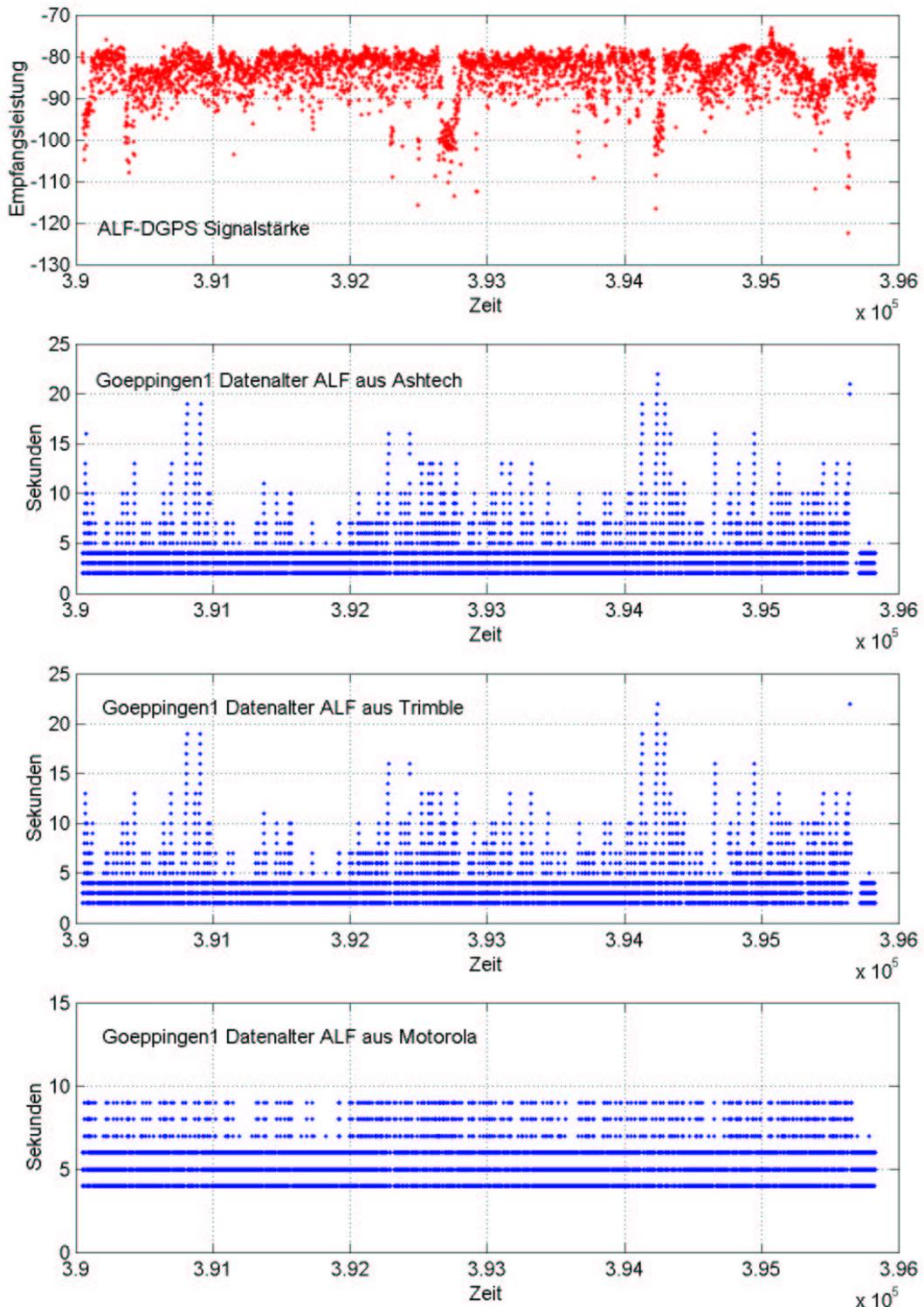


Abbildung 2.5-39 Vergleich des Datenalters aus NMEA-Daten verschiedener GPS-Empfänger

AMDS und UKW aufgetragen. Die wenigsten Zeitdifferenzen sind bei ALF festzustellen, dann UKW und letztlich AMDS. Hier tritt eine recht große Anzahl von Zeitdifferenzen innerhalb eines Frames auf. Das einheitliche Datenalter kann aus den NMEA-Daten der einzelnen Empfänger entnommen werden, da dies bei der internen Verarbeitung der Korrekturdaten im Empfänger direkt bestimmt wird. Der Vergleich des Datenalters von Ashtech und Trimble liefert keine

erkennbaren Unterschiede (Abb. 2.5-39). Da für den Motorola das nutzbare Datenalter im Empfänger auf 10 Sekunden begrenzt ist, treten hier Unterschiede auf, die auch noch einen konstanten Versatz um zwei Sekunden zeigen.

Neben den Zeitdifferenzen unterscheiden sich die Dienste auch in der Anzahl der Satelliten, die pro Frame übertragen werden. Abbildung 2.5-38 zeigt für drei Fahrten von Stuttgart nach Göppingen und zurück die Anzahl der Satelliten, für die pro Frame Daten geliefert wurden. Zeitunterschiede sind hierbei nicht berücksichtigt. Auch hier schneidet AMDS am schlechtesten ab, während UKW erkennbar die meisten Satelliten bietet.

2.6 GPS – Positionsgenauigkeiten

2.6.1 Analyse des Satellitenempfangs

Der Satellitenempfang soll quantitativ und qualitativ beurteilt werden. Eine quantitative Auswertung lässt sich auch mit Empfängern, die keine Rohdaten ausgeben vollziehen. Die Positionswerte und Zusatzinformationen lassen sich aus den NMEA-Daten ableiten. Wesentliche Parameter sind

- die Zahl der empfangenen Satelliten
- die geometrischen Bedingungen (DOP-Faktoren)

und davon abgeleitet

- die Verfügbarkeit einer Positionslösung (2D oder 3D)

Die Verfügbarkeit einer Position wird nun mit der ihr entsprechenden Qualität verknüpft. Als Qualitätskriterium gilt allgemein

- die Positionsabweichung zur Referenztrajektorie

Für eine genauere Untersuchung sollen die Rohdaten separat (Abschnitt 2.7) hinsichtlich der Ursachen der Qualitätsschwankungen untersucht werden. Mögliche Parameter sind hauptsächlich in den Mehrwegeüberlagerungen und z.T. in Signaleinbrüchen zu sehen.

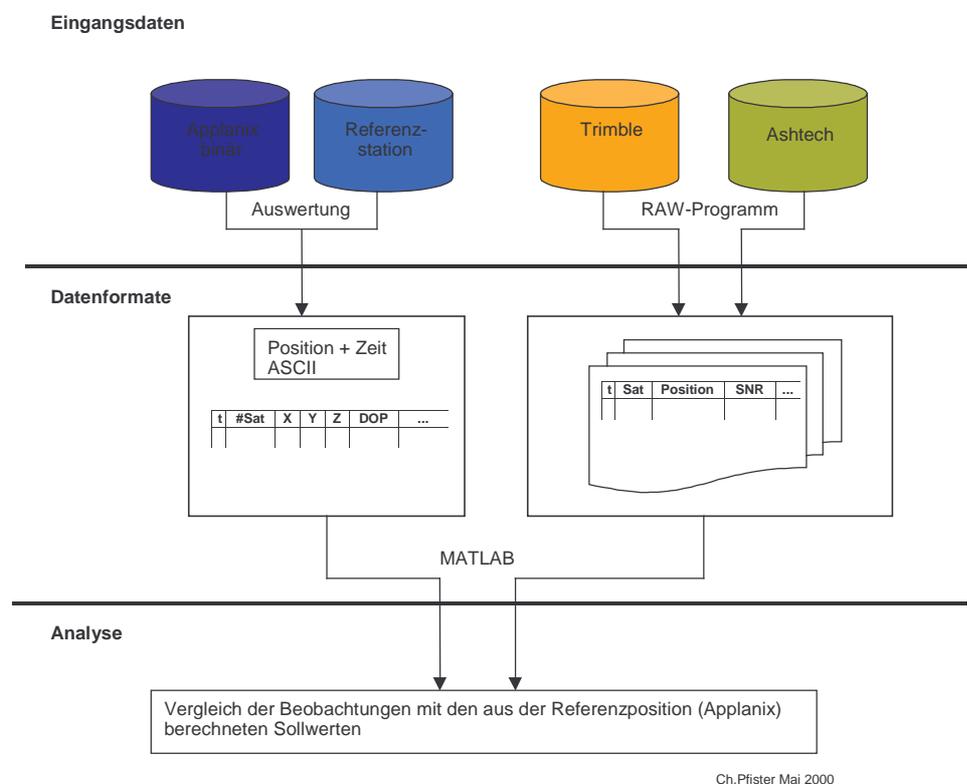


Abb 2.6-1: Vorgehensweise zur Analyse der Satellitendaten mit Angabe der verwendeten Software

2.6.2 Auswirkung der Korrekturdaten auf die Positionsgenauigkeit bei unterschiedlichen Empfängern

Die mitgeführten Empfänger

Trimble
Ashtech GG24
NovAtel Millenium
Motorola
Javad

wurden alle mit den gleichen DGPS Korrekturdaten von AFL versorgt. Für diese Aufgabe wurde eigens ein Verteiler bebaut, der die ALF-Korrekturdaten gleichzeitig an alle angeschlossenen Geräte weitergibt. Die Geräte sind hier alle nur „Listener“; d.h. sie können die Daten nur empfangen, aber nicht mit dem ALF-Empfänger kommunizieren. Über diese Überprüfung soll der Effekt von Datenausfällen, unterschiedlichem Datenalter und des GPS-Empfangs gezeigt werden. Für den GPS-Empfang steht ebenfalls für alle Geräte das Signal einer Antenne zur Verfügung, das über einen Splitter an die GPS-Geräte verteilt wurde. Der Vergleich erfolgt zu der APPLANIX-Referenztrajektorie.

	GG24 (Ashtech)	Trimble 4000 SSI	Motorola Oncore	Javad	Novatel Milenium
Göppingen 1					
Mean (X [m])	-0.3500	-0.0825	-0.5258	-0.3214	-0.5598
Mean (Y [m])	0.5341	1.8129	1.6562	0.5991	0.1364
Mean (H [m])	-0.0903	0.2495	15.4451	-0.2130	-0.0384
std (X [m])	1.6004	6.8066	3.0476	1.7712	4.5787
std (Y [m])	1.1261	9.6833	2.5402	1.7315	7.3011
std (H [m])	1.2673	8.3202	4.4458	2.6976	13.3709
Göppingen 2					
Mean (X [m])	-0.1677	-0.6531	-0.0790	-0.0112	-0.0946
Mean (Y [m])	1.0497	0.4092	1.2616	1.1151	1.2485
Mean (H [m])	-0.0660	-0.7683	-1.4244	-1.8876	0.9877
std (X [m])	0.4167	6.0856	1.3061	0.8148	1.7048
std (Y [m])	0.7910	14.9375	1.8624	1.7537	2.6407
std (H [m])	1.4430	8.4309	2.6091	7.9330	3.2849
Göppingen 3					
Mean (X [m])	-0.0730	-0.2168	0.0419	-0.0482	-0.0806
Mean (Y [m])	1.0209	0.8206	1.1484	0.8336	0.7020
Mean (H [m])	-0.2211	-1.1474	-1.5570	-0.9800	0.1131
std (X [m])	0.3635	9.0565	2.0737	1.7555	6.1938
std (Y [m])	0.6906	15.7871	2.3659	2.1616	9.7880
std (H [m])	1.1875	18.4607	4.2652	5.7611	10.8646

Tabelle 2.6-1: Mittelwert und Standardabweichung (1 Sigma) der Ablagen der verschiedenen Empfänger gegenüber den APPLANIX-Positionen

Beispielhaft werden die Ergebnisse für die drei Fahrten von Stuttgart nach Göppingen und zurück dargestellt. Für die mitgeführten GPS-Empfänger wurden die DGPS-Positionen mit den APPLANIX-Positionen verglichen und den Abbildungen 2.6-2 bis 5 dargestellt. Hier treten ebenfalls recht große Abweichungen auf, die direkt mit GPS-Signalunterbrechungen korreliert werden können. In der Tabelle 2.6-1 sind die Mittelwerte und die zugehörige Standardabweichung für diese Messfahrten zusammengefasst. Die Mittelwerte der Fehler liegen in allen Komponenten unter 2 Meter, meist sogar unter einem Meter. Die Ausnahme bildet der Motorola bei der ersten Messfahrt. Hier waren die Parameter für die Berücksichtigung der atmosphärischen Effekte nicht abgeschaltet, so dass sich hier eine Überkompensation ergab. Dies zeigt sich aber hauptsächlich in einem weitgehend konstanten Offset in der Höhe (siehe

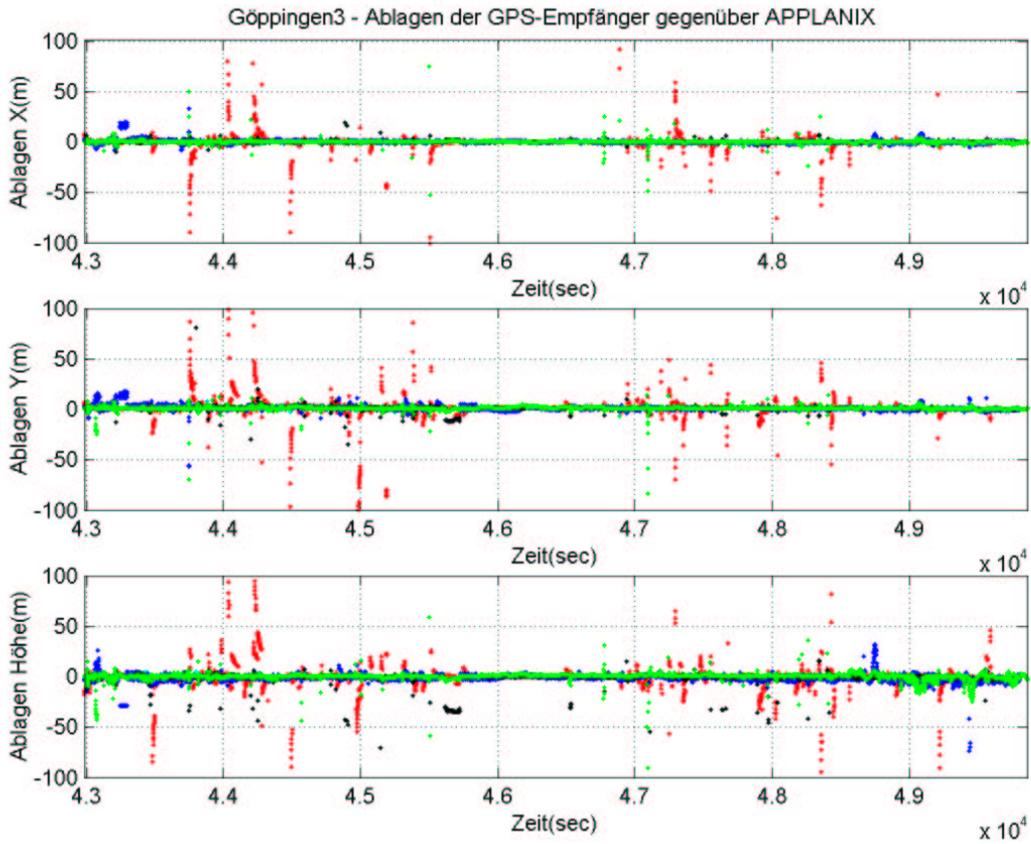


Abbildung 2.6-2: Ablagen der GPS-Positionen der verschiedenen Empfänger gegenüber den APPLANIX-Referenzpositionen für die dritte Fahrt nach Göppingen

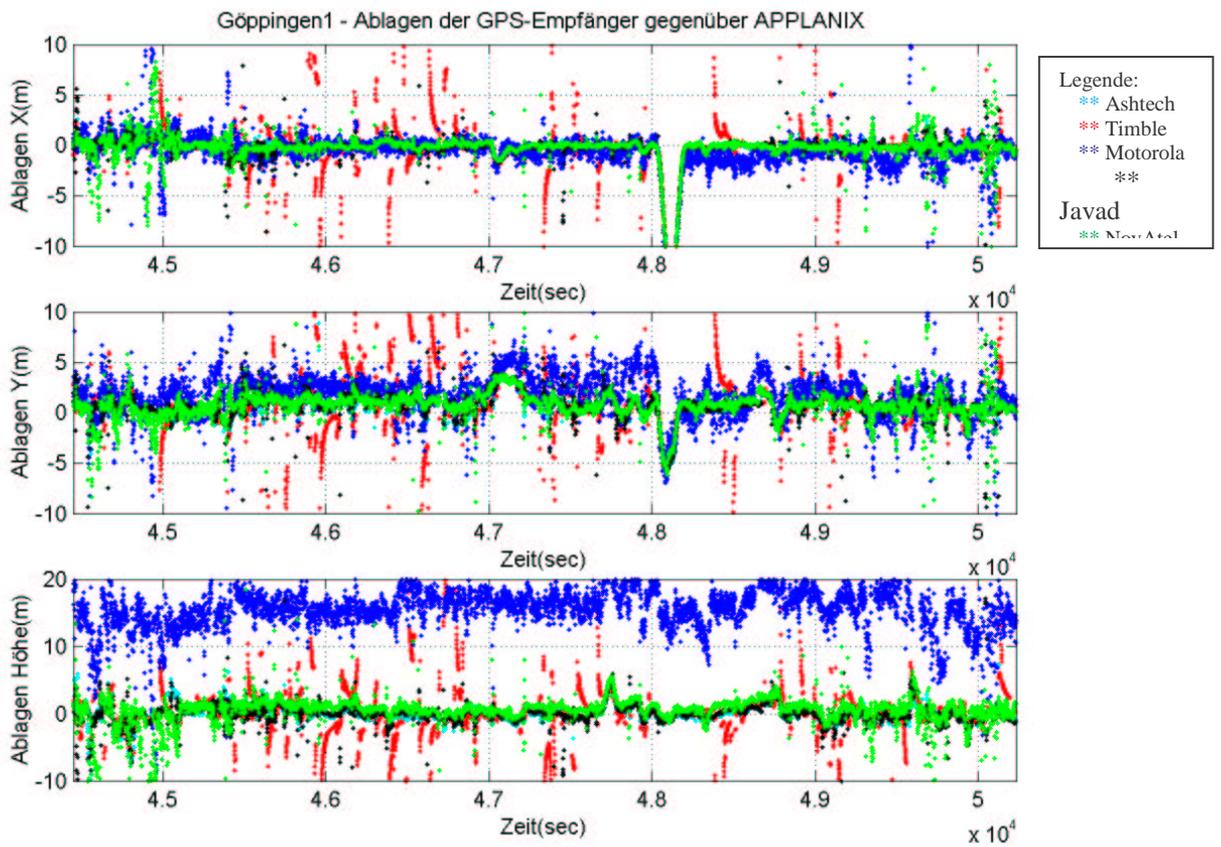


Abbildung 2.6-3: Erste Fahrt nach Göppingen – Bereich für Ablagen auf |10m| begrenzt

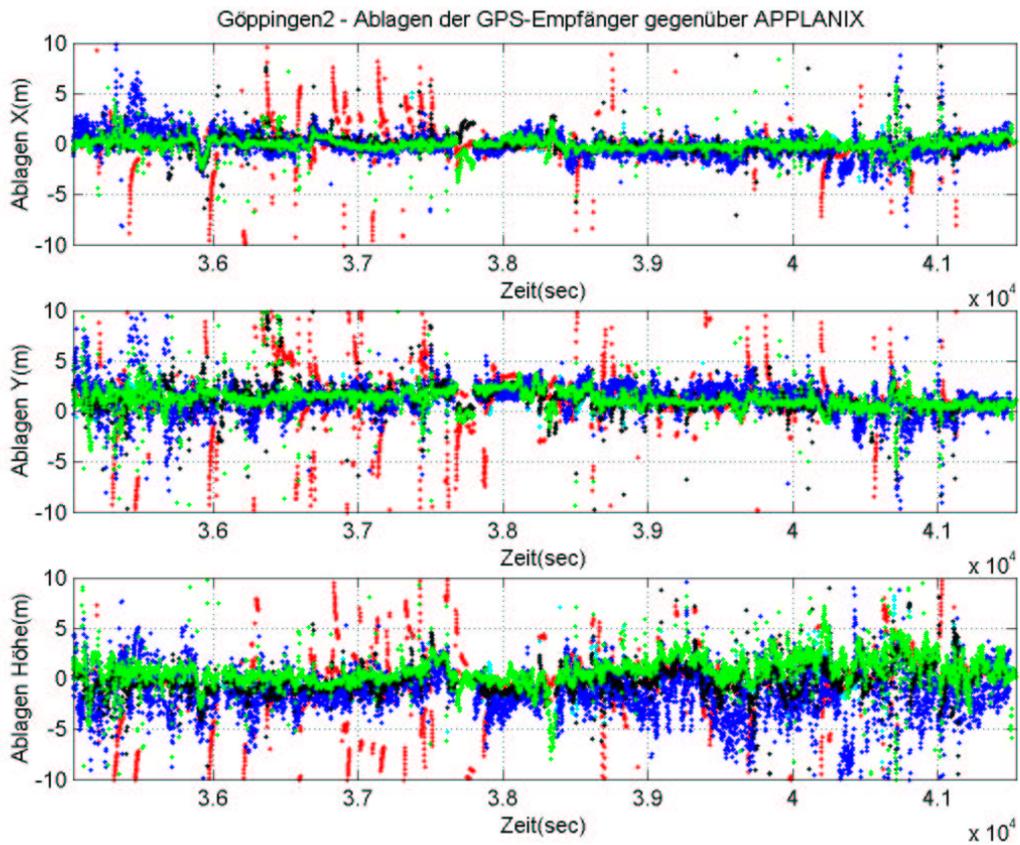


Abbildung 2.6-4: Zweite Fahrt nach Göppingen – Bereich für Ablagen auf |10m| begrenzt

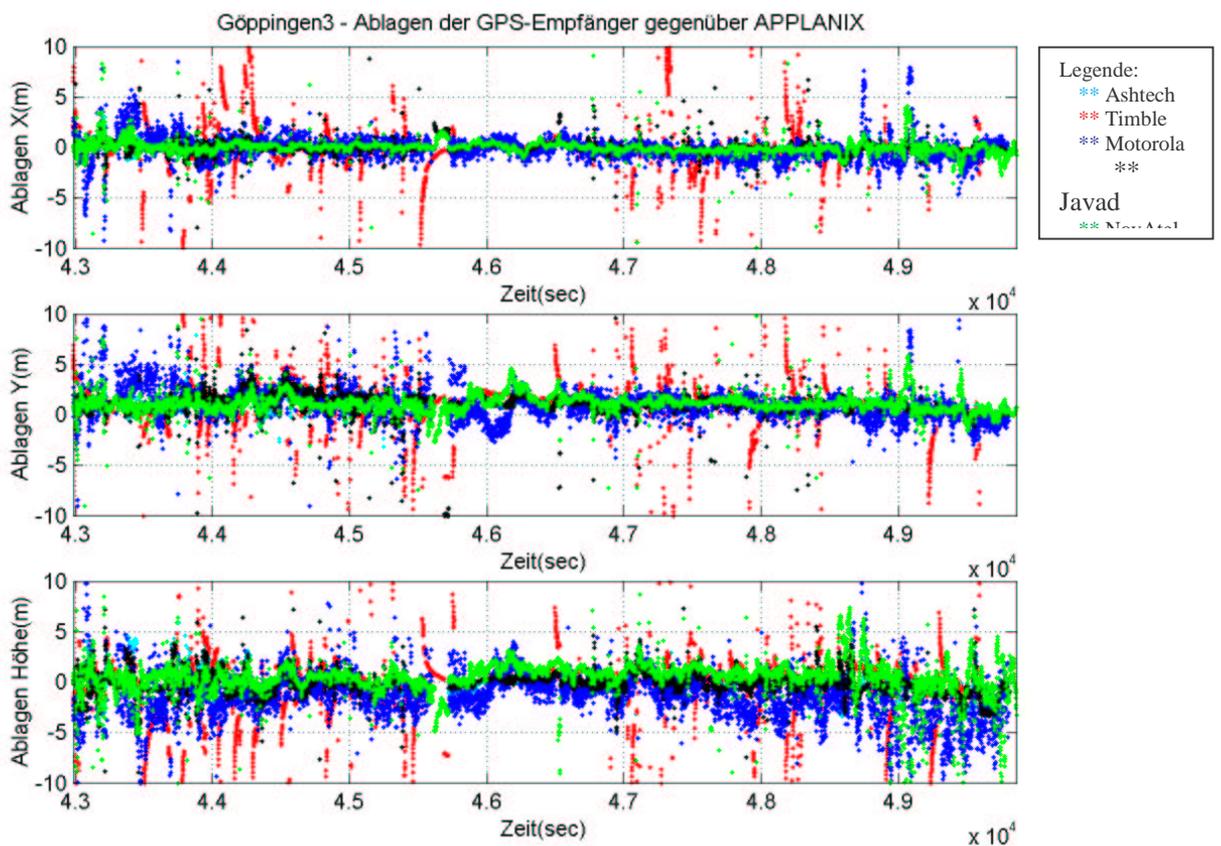


Abbildung 2.6-5: Dritte Fahrt nach Göppingen – Bereich für Ablagen auf |10m| begrenzt.

auch Abb. 2.6-3). Betrachtet man die Standardabweichungen für die verschiedenen Geräte, so fällt besonders der Trimble mit großen Werten auf. Dies zeigt sich auch in der Abb. 2.6-2, bei der die Trimble Ablagen von großen Werten relativ langsam abklingen. Dieses Fehlverhalten deutet auf interne Filtermechanismen, die vergleichbare Effekte zu Einschwingvorgängen hervorrufen können. Diese Messfahrten verdeutlichen nochmals, dass die mittlere Genauigkeit mit DGPS sehr gut ist, aber dass große Fehler, die durch Mehrwegeeffekte oder Signalverlust hervorgerufen werden, in der ursprünglichen Dimension erhalten bleiben. Dieser Effekt kann relativ leicht mit geeigneten Zusatzkomponenten, wie z.B. Radargriff, aufgefangen werden.

Das unterschiedliche Verhalten der Empfänger wird außerdem in Abbildung 2.6-6 dokumentiert, in dem die Anzahl der empfangenen Satelliten und die jeweiligen HDOP-Werte dargestellt sind. Hier muß nochmals darauf hingewiesen werden, dass alle GPS-Geräte an der selben GPS-Antenne hängen und der Parameter für den Elevationswinkel ebenfalls bei allen Geräten auf 5° eingestellt war. Die DGPS-Korrekturdaten werden vom ALF-Empfänger ebenfalls an alle GPS-Geräte verteilt.

Hier zeigt der Motorola bezüglich der Anzahl der empfangenen Satelliten und der HDOP-Werte die beste Performance. Auch bei den Mittelwerten und den Standardabweichungen sind die Resultate besser als z.B. beim Trimble. Bei der Fahrt nach Göppingen ist neben einem Teilstück in Stuttgart die meiste Strecke eine vierspurig ausgebaute Bundesstraße. Kennzeichnend für diese Strecke sind die vielen Überführungen, die hier die Querverbindungen herstellen und auch Zu- und Abfahrt zur Bundesstraße sind. Diese vielfachen Unterbrechungen der GPS-Signale zeigen sich in den kurzzeitigen Ausreißern bei den Fehlern. Hier fallen besonders die großen Fehler beim Trimble auf, die sich auch in den Werten der Standardabweichung niederschlagen. Begrenzt man die Fehler auf das Band von $\pm 10\text{m}$ so sind auch die Werte für die Standardabweichungen beim Trimble im zulässigen Bereich von weniger als 5m und erfüllen die allgemeinen Vorgaben für Genauigkeiten von DGPS Positionsbestimmungen. Diese Begrenzung kann dadurch gerechtfertigt werden, dass die großen Fehler hauptsächlich nach einer Signalunterbrechung auftraten und eine unmittelbare Nutzung der Positionsdaten nach einem Ausfall kritisch ist. Wird hier eine kurze Wartezeit von ca. 30s vorgesehen, so entfallen die groben Fehler und dies entspricht der Begrenzung.

	dX [m]	dY [m]	dH [m]
MiWe-Göppingen1	-0.85	0.12	-0.09
Std-Göppingen1	2.19	1.81	2.47
MiWe-Göppingen2	-1.25	0.18	0.22
Std-Göppingen2	2.42	1.54	2.65
MiWe-Göppingen3	-0.99	0.13	0.30
Std-Göppingen3	1.84	1.68	2.36

Tabelle 2.6-2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ablagen bei Begrenzung auf $\pm 10\text{m}$

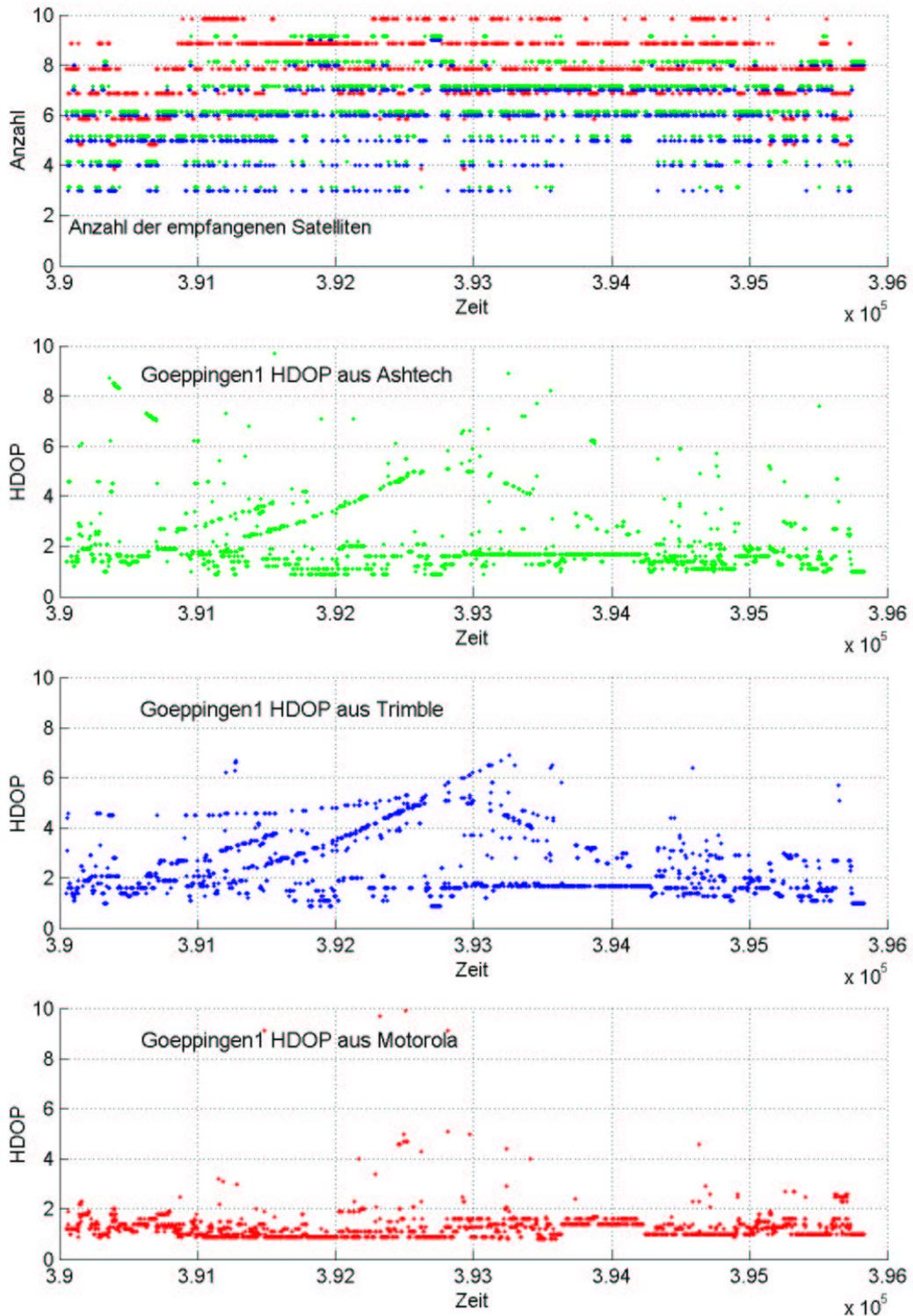


Abbildung 2.6- 6: Anzahl der empfangenen Satelliten der GPS-Empfänger Ashtech, Trimble und Motorola mit den zugehörigen HDOP-Werten. Die Farbe bei der Anzahl der Satelliten entspricht der HDOP-Farbe.

2.6.3 Beurteilung in Abhängigkeit der Umgebung

Ein besonderes Kriterium zur Beurteilung der Umgebung ist in den DOP-Werten zu sehen. Im HDOP spiegelt sich die örtliche Empfangssituation wider. So nimmt bei hoher Bebauung der HDOP stark zu und zeigt auch starke Veränderungen im Wert. Dieser Effekt zeigt sich zwangsweise dann auch in der Positionsgenauigkeit. In der Abbildung 2.6-7 ist für ein weitgehend ländliches Gebiet der HDOP und die Anzahl der empfangenen für den NovAtel Empfänger dargestellt. Zur Verdeutlichung der Umgebungseffekte sind die theoretischen Werte für die Anzahl und den HDOP bei freiem Horizont mit dargestellt. Abschattungen und Signalschwächung durch Vegetation reduzieren die Satellitenanzahl deutlich. Es zeigen sich ebenfalls vergleichbare Muster, die durch die gleiche örtliche Gegebenheit verursacht werden. In Abbildung 2.6-8 sind Fahrten in Stuttgart zu sehen. Hier ist eine stärkere Reduzierung der Satellitenanzahl und auch eine deutliche Tendenz zu höheren HDOP-Werten zu erkennen. Der Einfluss der städtischen Bebauung zeigt seinen Fingerabdruck.

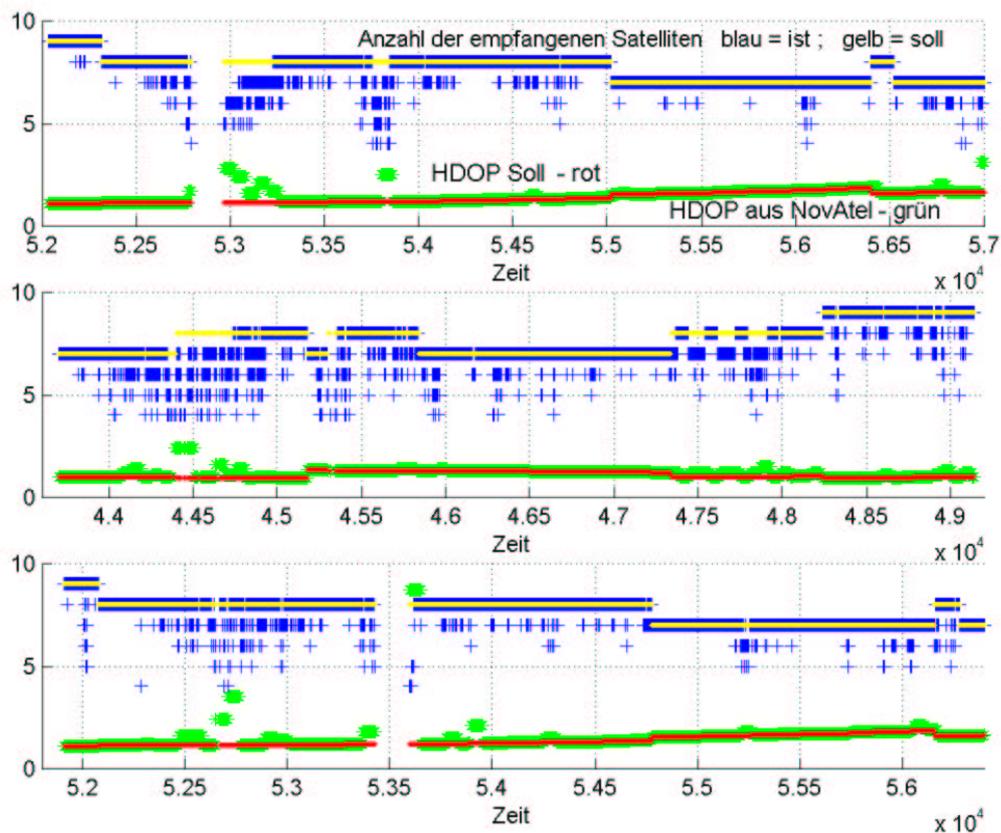


Abbildung 2.6-7: Drei Fahrten auf der Strecke bei Iffetzheim mit Anzahl der Satelliten (sichtbar/freier Horizont = gelb und empfangen = blau) sowie den HDOP-Werten (NovAtel = grün und Soll/freier Horizont = rot)

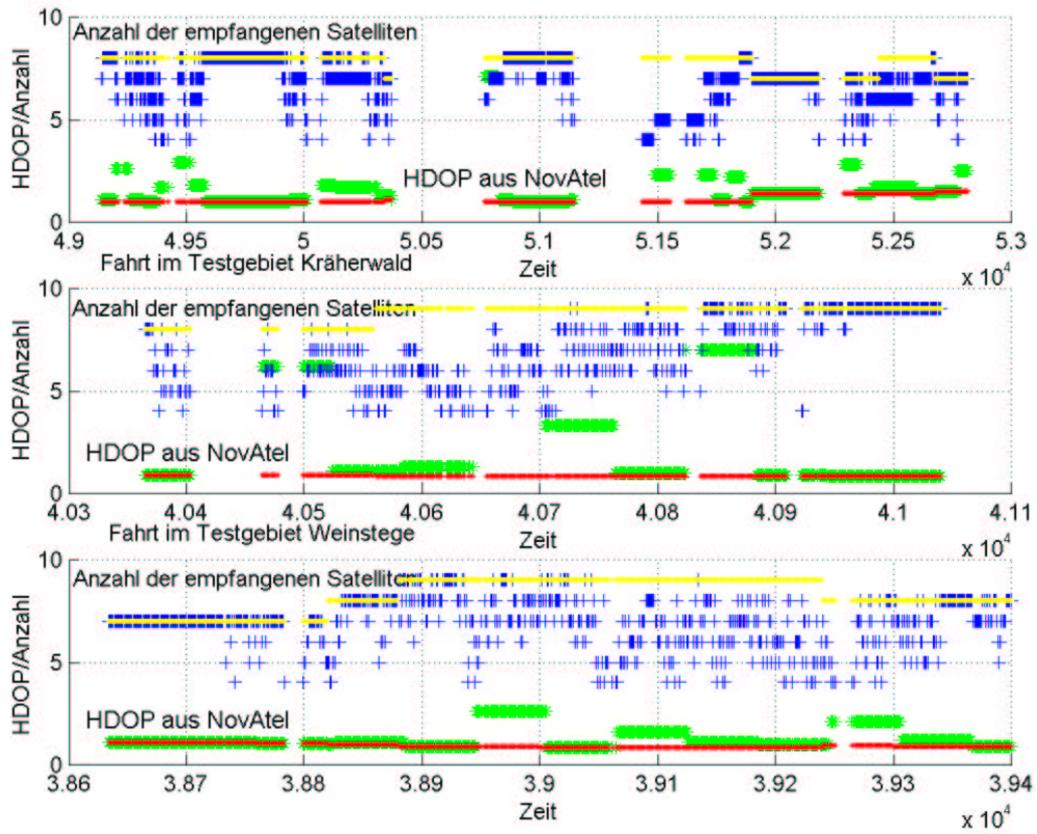


Abbildung 2.6-8: Drei Fahrten in Stuttgart mit Anzahl der Satelliten (sichtbar/freier Horizont = gelb und empfangen = blau) sowie den HDOP-Werten (NovAtel = grün und Soll/freier Horizont = rot)

2.7 GPS – Pseudorange Genauigkeiten

Die Positionsbestimmung aus den C/A-Code Entfernungsmessungen ist bei den meisten Navigationsempfängern die gebräuchliche Methode. Die kinematischen Anwendungen mit Trägerphasen kommen meist nur bei hochgenauen Vermessungen zum tragen. Die Genauigkeit der Code-Position wird dabei hauptsächlich durch die bereitgestellte DGPS-Korrektur-Information und die Pseudorange-Messung mit dem zugehörigen XDOP-Werten bestimmt. Die Verfügbarkeit und Qualität der Korrekturinformation ist in den Abschnitten 2.5 besprochen. Hier sollen insbesondere die Genauigkeit der Pseudorange - Messwerte betrachtet werden.

Grundlagen zur Beurteilung der Pseudorangemessungen

Bei der Beurteilung der Qualität der Pseudorangemessungen wird häufig der Vergleich mit den mehrfach genaueren Trägerphasenmessungen verwendet. Die Trägerphasenmessung setzt aber den ungestörten Empfang des GPS-Signals mit kontinuierlicher Phasenauswertung voraus. Ein Musterbeispiel dafür ist die Messfahrt auf dem Flugplatzgelände in Malsheim, bei der stets freie Sicht zu den Satelliten vorlag (Abbildungen 2.7-1, 2.7-2) und damit keine Störungen enthält. Deutlich ist neben kurzzeitigen Schwankungen bei den Differenzen der starke Gang beim Satelliten 22 durch die Ionosphäreffekte zu sehen. Satellit 22 bewegt sich auf den Horizont zu, so dass der Weg des Signals durch die Ionosphäre zunimmt und der entgegengesetzte Gangunterschied zwischen Gruppenlaufzeit- und Phasensignal klar erkennbar wird (DRVID - differenced range versus integrated doppler). Dieser Effekt tritt bei beiden Empfängern mit der gleichen Größe auf, ebenso wie die kleinstrukturierten Abweichungen. Bemerkenswert ist das deutlich höhere Rauschen beim Trimble-Empfänger. Die Ursache dafür ist sicher in einer Art Glättung der Pseudorangewerte beim NovAtel zu sehen.

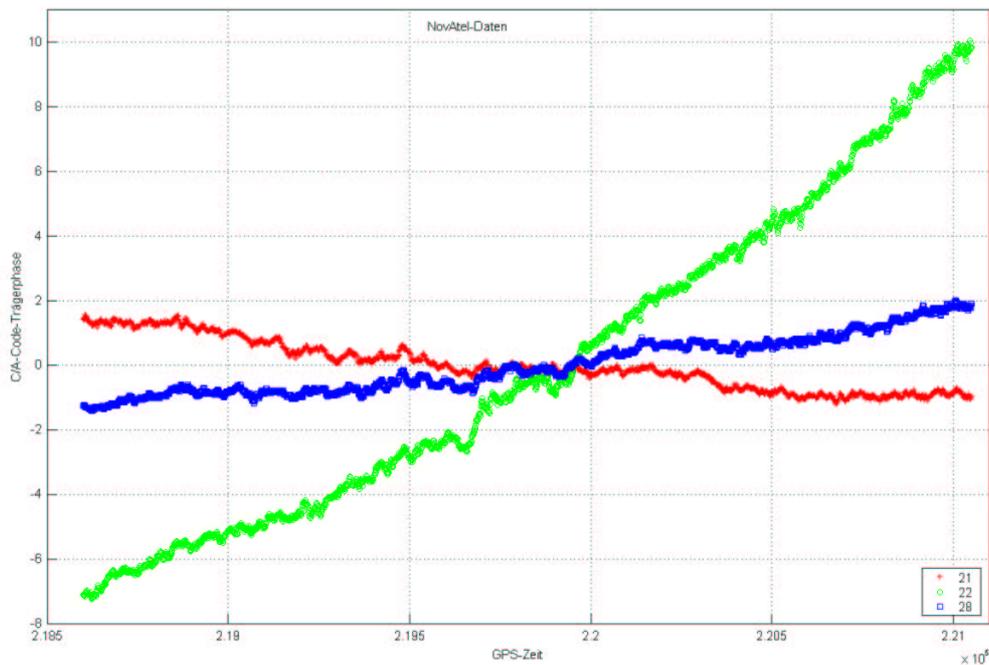


Abbildung 2.7-1: Differenzen zwischen Pseudorange- und Trägerphasenmessungen für den NovAtel-Empfänger auf dem Flugplatz Malsheim

Die Satelliten 21 und 28 haben Elevationswerte zwischen 30° und 65° , so dass die Veränderung der Ionosphäre während der Messung nur gering ist und der DRVID-Effekt entsprechend kleiner. Satellit 21 „geht auf“, während die Satelliten 28 und 22 „unter gehen“.

Die Trennung des Ionosphäreinflusses von anderen Effekten, insbesondere von Mehrwegefehlern, ist ohne die Nutzung von Zweifrequenzmessungen nicht eindeutig durchzuführen. Dies ist dann in Gegenden mit stärkerer Störung bei den GPS-Signalen fast unmöglich. Ein Beispiel ist die Fahrt zum Flugplatz, die teilweise durch Stuttgart und andere Orte und über normale Landstraßen führt (Abbildungen 2.7-3 und 2.7-4).

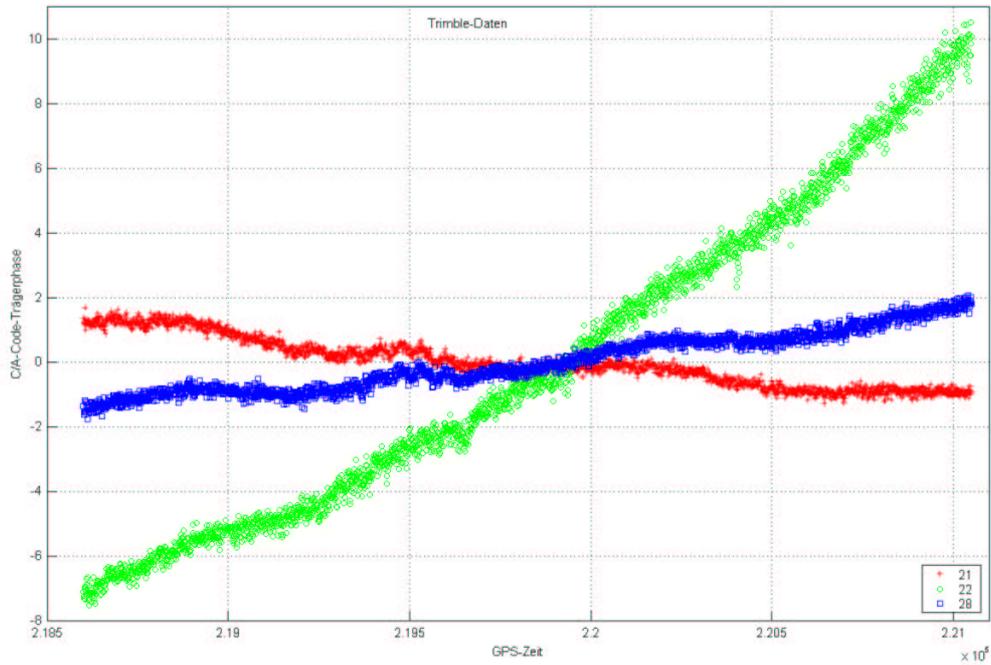


Abbildung 2.7-2: Differenzen zwischen Pseudorange- und Trägerphasenmessungen für den Trimble-Empfänger auf dem Flugplatz Malsheim

Beim NovAtel Empfänger bleiben die Differenzen relativ klein. Dies liegt daran, dass hier die Mehrdeutigkeiten über die Pseudorangemesswerte nach einer Störung stets neu bestimmt werden. Beim Trimble ist dies nicht der Fall, so dass hier sehr große Differenzen entstehen, die durch die nicht bestimmten Mehrdeutigkeiten verursacht werden. Eine Beurteilung der Pseudorangemessungen ist in beiden Fällen sehr schwierig, bzw. nicht möglich. Grundsätzlich ist die Veränderung der Ionosphäre während der Messung in den Differenzen zu erkennen, aber ebenso die vielfältigen Unterbrechungen bei der Trägerphasenmessung. Wie die Werte bei der Trägerphasenmessung bei einer Störung behandelt und ausgegeben werden ist herstellerabhängig, sie sind auf jeden Fall nicht verwertbar. Wegen dieser Effekte wird diese Methode hier nicht eingesetzt

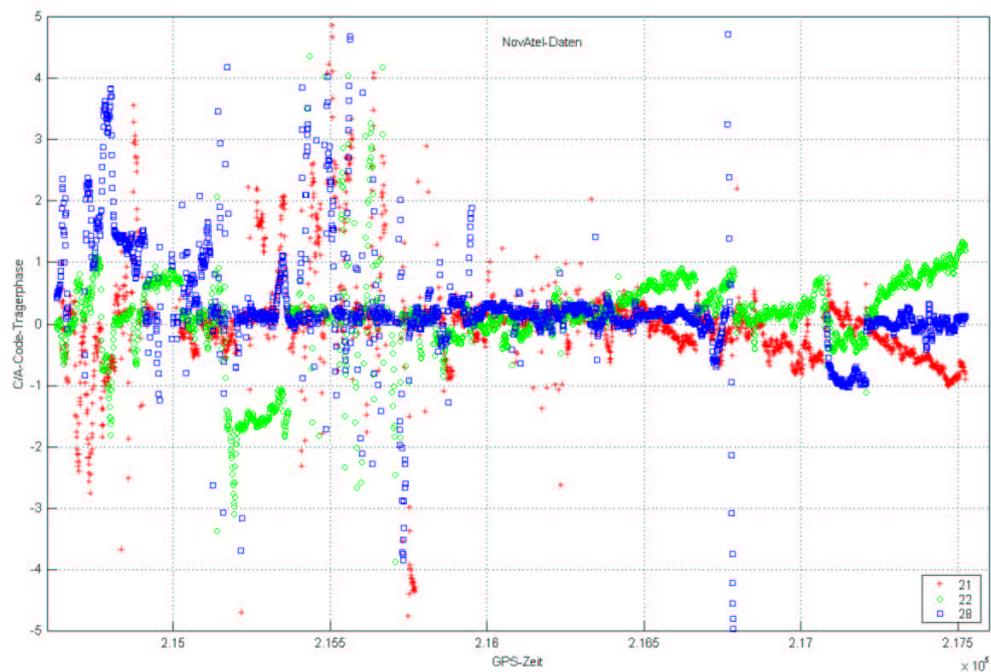


Abbildung 2.7-3: Differenzen zwischen Pseudorange- und Trägerphasenmessungen für den NovAtel-Empfänger auf der Fahrt zum Flugplatz Malsheim

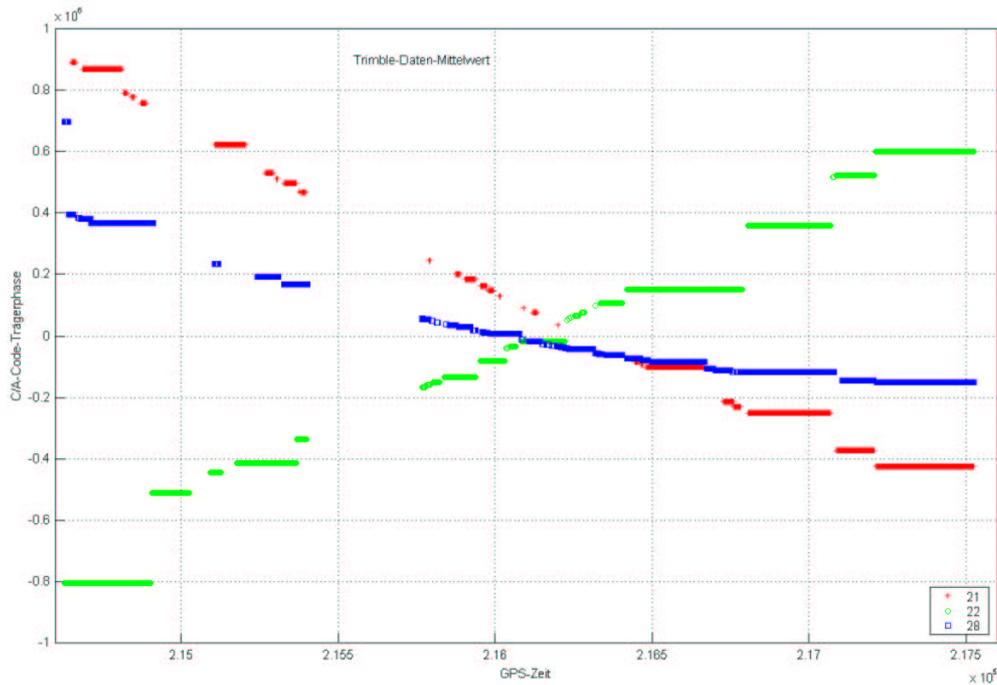


Abbildung 2.7-4: Differenzen zwischen Pseudorange- und Trägerphasenmessungen für den Trimble-Empfänger auf der Fahrt zum Flugplatz Malsheim

Die unabhängige Beurteilung der Qualität der Entfernungsmessungen zwischen dem Beobachter und den empfangbaren GPS-Satelliten setzt die Kenntnis der wahren Entfernung (Sollentfernung) voraus. Diese Sollentfernung kann über eine einfache geometrische Betrachtung bestimmt werden. Hierzu ist eine genaue Position der Empfangsantenne und des Satelliten erforderlich. Mithilfe dieser beiden Positionen kann die dazwischen liegende Strecke berechnet werden. Diese geometrische Distanz kann nur dann sinnvoll für den Vergleich eingesetzt werden, wenn bekannte systematische Fehleranteile bei den Entfernungsmesswerten der GPS-Empfänger bestimmbar sind und korrigiert werden. Die wichtigsten Fehleranteile bei der Pseudoentfernungsmessung bei GPS werden nachfolgend angegeben:

- Satellitenposition
- Satellitenuhr
- Empfängeruhr
- atmosphärische Laufzeitverzögerungen
- Mehrwegeeffekte

a) Satellitenposition

Die Fehler bei der Satellitenposition können durch Verwendung von genauen Satellitenkoordinaten, die direkt über das Internet (<http://gibs.leipzig.ifag.de/>) abgerufen werden können, vermieden werden. Da die Berechnungen nach der Messfahrt, d.h. offline, durchgeführt werden ist dies auch problemlos zu realisieren. Diese genauen Ephemeriden stehen mit 15 min Abstand als geoz. Koordinaten X,Y,Z zur Verfügung und müssen mithilfe eines Lagrange-Polynoms für die Messzeitpunkte interpoliert werden.

b) Satellitenuhr

Mit den genauen Ephemeriden wird auch der Fehler der Satellitenuhr für die einzelnen Satelliten mitgeliefert, so dass eine bestmögliche Korrektur dieses Fehlers vorgenommen werden kann. Die Abweichung der Satellitenuhr gegenüber der GPS-Zeit beträgt dabei bis zu $800 \mu\text{s}$ (801.751683), was einer Strecke von ca. 240 km entspricht. Die Zeitkorrektur wird ebenfalls für die jeweilige Messzeitpunkte interpoliert.

c) Empfängeruhr

Dieser Fehleranteil wird bei der Positionsbestimmung als Unbekannte stets mitgeschätzt und steht über diese Berechnung zur Verfügung. Da aber diese Schätzung (Methode der kleinsten Quadrate, Kalman Filtertechnik) der Position und des Uhrfehlers direkt von der Qualität der Entfernungsmessungen abhängt, unterliegt die Genauigkeit dieser Bestimmung unmittelbar den Fehlern in der Entfernungsmessung. Es ist deshalb sinnvoll die ursprünglichen Pseudorange-Messungen für diese Untersuchung zu verwenden und nicht bereits um den geschätzten Empfängeruhrfehler veränderte Werte. Auf die Beseitigung des Empfängeruhrfehlers bei den Entfernungsmesswerten wird noch ausführlicher eingegangen.

d) atmosphärische Laufzeitverzögerungen

Alle GPS Signale erfahren auf ihren Wegen durch die Atmosphäre eine Laufzeitverzögerung, die durch die verschiedenen Wege für die einzelnen Satelliten auch unterschiedlich ist. Dieser Fehler kann durch Modelle geschätzt werden, wobei für die Ionosphäre nur eine recht ungenaue Schätzung möglich ist (außer bei Zweifrequenzmessung), während der Einfluss der Troposphäre (trockener Anteil) sehr gut bestimmt werden kann. Der feuchte Anteil setzt genaue Messungen von Druck, Temperatur und Feuchte voraus. Außerdem muss dabei von einer normalen Wettersituation ausgegangen werden (keine Fronten oder Inversionslagen). Diese Fehler können aber über die Korrekturwerte des Differentiellen GPS weitgehend beseitigt werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Entfernung DGPS-Referenzstation und Messwagenposition nicht groß ist.

e) Mehrwegeeffekte

Fehler von Umwegsignalen sind ortsspezifisch und können nur durch besondere Vorkehrungen (Antenne, Hardware, Software, Mittelung, etc.) reduziert werden. Sie sind damit der Hauptanteil, der die Genauigkeit der Positionsbestimmung bestimmt, wenn DGPS genutzt werden kann. Es ist deshalb zu erwarten, dass dieser Effekt sich bei den Entfernungsmessungen als dominierender, ortsabhängiger Restfehler zeigt. Es ist deshalb wichtig, die jeweilige Umgebungssituation mit zu berücksichtigen.

Aufbereitung der GPS-Entfernungsmessungen

Die Entfernungsmessungen zu den einzelnen Satelliten werden über die Empfänger als sogenannte Rohdaten zur Verfügung gestellt. Diese Information wird in einem empfangerspezifischen Format meist als Binärdaten ausgegeben bzw. gespeichert. Für eine einheitliche Verarbeitung dieser Daten werden diese in das RINEX Datenformat, ein Empfänger unabhängiges Format, gewandelt. Damit verbunden ist der Wechsel zum ASCII-Format, das die direkte Lesbarkeit der Daten in einem Editor ermöglicht. Für die Umsetzung in das RINEX Format stehen meist Konverter der GPS - Gerätehersteller zur Verfügung, aber auch vom Astronomischen Institut der Universität Bern wird ein Konverter angeboten der bei dieser Untersuchung eingesetzt wurde (<http://www.aiub.unibe.ch/>).

Bei der geometrischen Streckenberechnung wurden die genauen Ephemeriden und für die GPS-Antennenposition am Fahrzeug die Ergebnisse der Navigationseinheit von APPLANIX verwendet (<http://gibs.leipzig.ifag.de/cgi-bin/eph.cgi>). Da bei den genauen Ephemeriden auch die Information über den Satellitenuhrfehler zur Verfügung steht, wurde dieser Wert anstelle der ungenaueren Broadcast-Navigationsinformation beim Vergleich mit der Sollstrecke berücksichtigt. Bei der Berechnung muss die Laufzeit des Signals sowohl bei der Satellitenposition als auch bei der Drehung des erdfesten Koordinatensystems berücksichtigt werden.

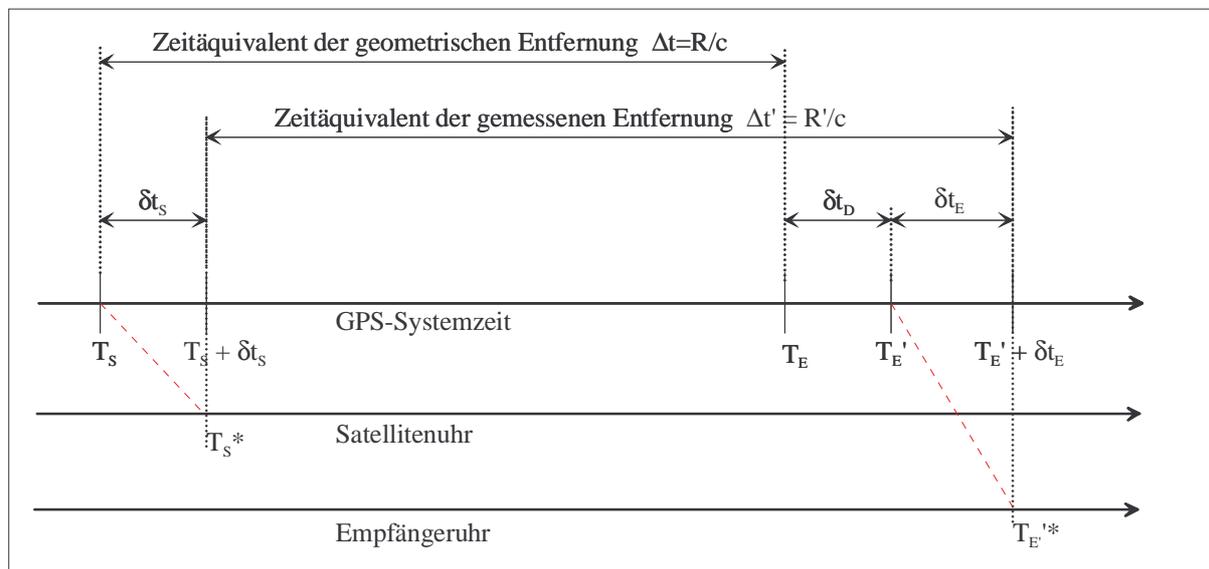


Abbildung 2.7-5: Zeitbezug bei der Entfernungsmessung mit zeitversetzten Zeitskalen des Satelliten und Empfängers

- mit:
- T_s Zeitpunkt der Abstrahlung in GPS-Systemzeit
 - T_E Zeitpunkt des Empfangs in GPS-Systemzeit
 - δt_s Offset der Satellitenuhr von der GPS-Systemzeit
 - T_E' GPS-Systemzeit zu der das Signal den Empfänger erreicht
 - δt_E Offset der Empfängeruhr von der GPS-Systemzeit
 - δt_D Laufzeitverzögerungen in der Atmosphäre, Mehrwegeeffekte,

Empfängerfehler

$$T_S^* \hat{=} T_S + \delta t_S$$

Satellitenzeit bei der Abstrahlung des GPS-Signals

$$T_E'^* \hat{=} T_E' + \delta t_E$$

Empfängerzeit zu der das Signal den Empfänger erreicht

Der Zeitpunkt für die Satellitenposition bei der Abstrahlung des Satellitensignals kann über

$$T_S = T_E - \frac{R}{c} \quad \text{oder} \quad T_S = T_E'^* - \frac{R'}{c} - \delta t_s$$

mit: R Geometrische Entfernung Satellit – Empfänger
 R' Pseudorangestrecke (gemessene Entfernung)
 c Lichtgeschwindigkeit

bestimmt werden. Für den Zeitpunkt der Abstrahlung wird über die Lagrange-Interpolation die genaue Satellitenposition ermittelt.

Die Drehung des Koordinatensystems während der Laufzeit kann durch eine Koordinatentransformation der Satellitenkoordinaten zum Zeitpunkt der Abstrahlung in das gedrehte Koordinatensystem zum Zeitpunkt des Signalempfangs behoben werden.

$$x' = x \cos(\Theta) - y \sin(\Theta)$$

$$y' = x \sin(\Theta) + y \cos(\Theta)$$

$$z' = z$$

$$\Theta = \Omega_e \Delta t$$

mit: Ω_e Erddrehrate ($7.2921151467 \times 10^{-5}$ rad/sec WGS 84 Wert)
 $\Delta t = T_S - T_E'$

Dies kann aber auch durch eine vereinfachte Berechnung der Veränderung der Pseudorangestrecke ΔR über

$$\Delta R = \frac{\Omega_e}{c} (X_S Y_E - X_E Y_S)$$

mit: X_S, Y_S Satellitenkoordinaten
 X_E, Y_E Empfängerkoordinaten

berücksichtigt werden.

Der direkte Vergleich der Sollwerte aus der geometrischen Streckenbestimmung mit den Entfernungsmesswerten zeigt dann hauptsächlich den Empfängeruhrfehler (siehe Abb. 2.7-6). Die zeitliche Veränderung bei der Differenz zwischen Soll- und Messwert wird durch die Qualität der Empfängeruhr bestimmt. Da der Anfangswert des Uhrfehlers bereits sehr groß ist und die Uhr auch eine starke zeitliche Veränderung (Drift) besitzt, wurde versucht, diesen Effekt durch geeignete Maßnahmen zu beseitigen.

Der Berner-Konverter bietet neben der normalen Umsetzung in das RINEX-Format auch die Möglichkeit den Uhrfehler des Empfängers bei der Konvertierung zu berücksichtigen. Mithilfe dieser Option gelang es den Fehler der Empfängeruhr grob zu beseitigen, aber das Ergebnis (Abb. 2.7-7) war in keiner Weise zufriedenstellend. Da die Restfehler bei der Empfängeruhr für alle Entfernungsmessungen gleich sind, werden sie bei einer Positionsbestimmung mitbestimmt und damit beseitigt. Das Positionsergebnis wird somit nicht beeinträchtigt. Für die Untersuchung der Entfernungsmessgenauigkeit sind diese Daten so nicht geeignet, da die verbleibenden Restfehler von der Verarbeitung durch die Konvertierungssoftware abhängen. Die Algorithmen der Software sind aber nicht bekannt und dieser zusätzliche Fehler kann deshalb nicht behoben oder erklärt werden.

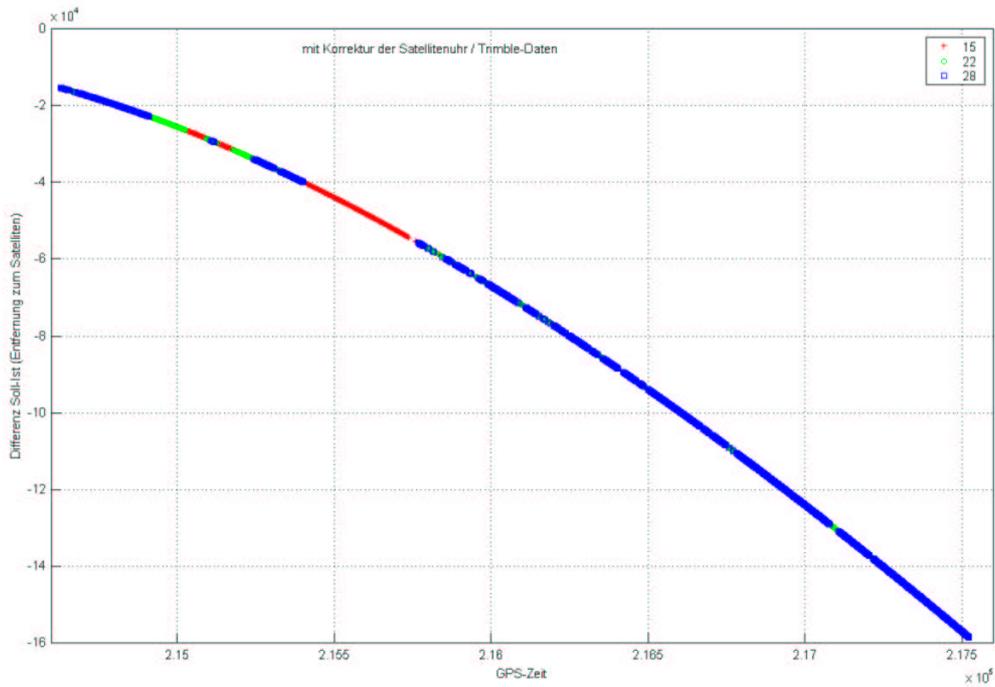


Abbildung 2.7-6: Entfernungsunterschied zwischen Sollstrecke und Messwert ohne Berücksichtigung des Empfängeruhrfehlers (Sat. 15, 22, 28)

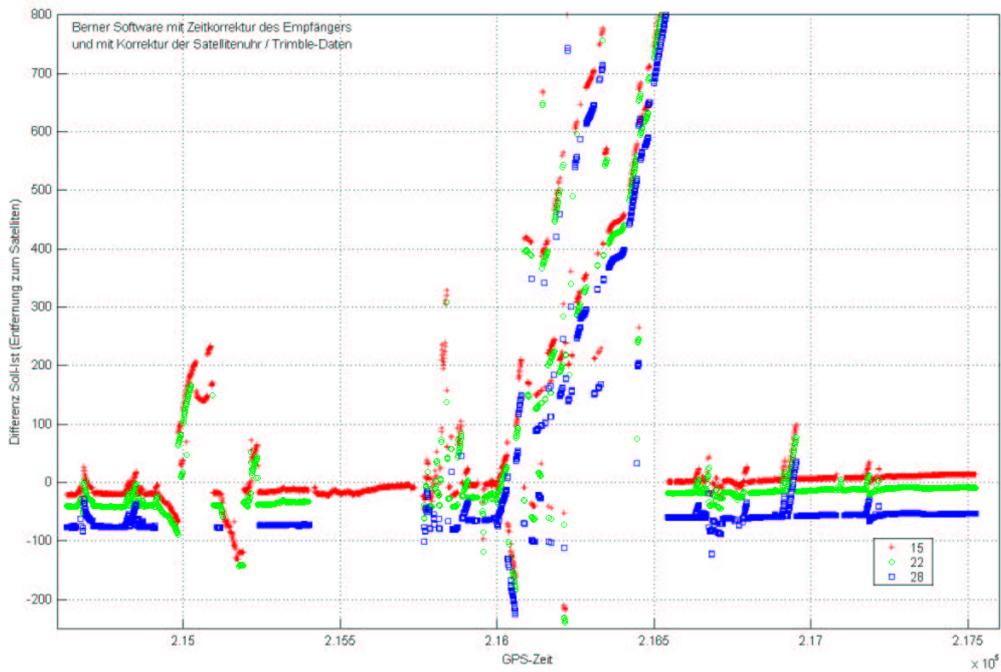


Abbildung 2.7-7: Entfernungsunterschied zwischen Sollstrecke und Messwert. Messwert mit Berner Software in RINEX Format umgesetzt mit der Option für Empfängeruhrfehler. Die Differenzen zeigen noch Reste vom Empfängeruhrfehler.

Es werden hier beispielhaft nur die Differenzen von drei Satelliten dargestellt, um die Übersichtlichkeit in den Abbildungen zu erhalten.

Der vergleichbare Effekt ergab sich bei den Rohdaten des NovAtel Empfängers. Hier werden die in den Rohdaten ausgegebenen Entfernungsmessungen ebenfalls um einen im Empfänger geschätzten und geglätteten Uhrfehler korrigiert. Diese Korrektur ergibt ähnliche Effekte wie bei der Berner Software, nur dass die Restfehler von der Empfängeruhr deutlich geringer ausfallen aber dafür noch mit einem Glättungseffekt überlagert sind (Abb. 2.7-8). Deutlich zeigen sich

hier die Effekte des unvollständig bestimmten Uhrfehlers, die dann bei allen drei Satelliten gleichzeitig und in gleicher Größenordnung auftreten.

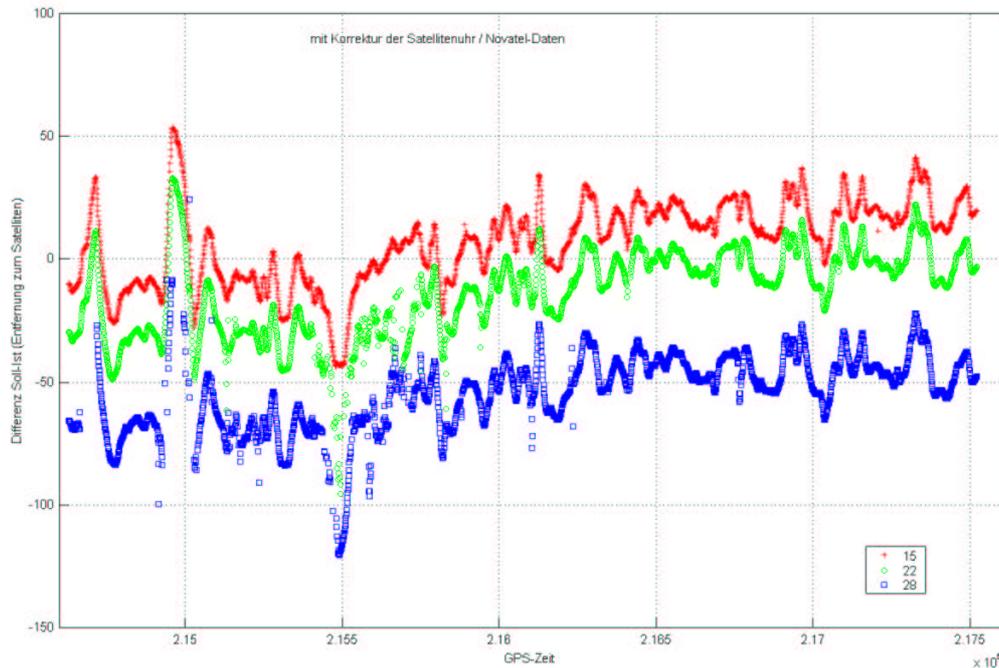


Abbildung 2.7-8: Entfernungswahl zwischen Sollstrecke und Messwert beim Novatel Empfänger. Differenzen zeigen noch Reste von Empfängeruhrfehlern.

Da alle Entfernungsmessungen mit exakt dem gleichen Uhrfehler behaftet sind, kann dieser am besten durch Differenzbildung zwischen Entfernungsmessungen zu zwei verschiedenen Satelliten beseitigt werden. Dann werden aber alle Fehler der beiden Messungen überlagert: Eine getrennte Beurteilung der Fehler von den einzelnen Messungen ist dann nur indirekt möglich, bzw. aus mehreren Differenzbildungen zu allen Satelliten mit einem Referenzsatelliten. In den Abbildungen 2.7-9 und 2.7-10 sind für den Trimble und den Novatel die Differenzen zu einem ausgewählten Referenzsatelliten dargestellt.

Hier sind ähnliche Verläufe in den einzelnen Diagrammen noch deutlich zu erkennen, die unter der Annahme, dass alle systematischen und gemeinsamen Anteile entfernt wurden, einen Hinweis auf Fehler beim Referenzsatelliten geben. Ein zusätzlicher Effekt ist in den atmosphärischen Verzögerungen zu sehen, die sich in den recht großen Ablagen verdeutlichen. Dass es sich hier tatsächlich um ionosphärische Verzögerungen handelt, kann in der Tatsache gesehen werden, dass die Abstände zwischen den einzelnen Satelliten beim Trimble und Novatel gleich sind und die Driftwerte ebenfalls identisch sind., auch wenn zwischen beiden Ergebnissen ein Bias von ca. 50m liegt. Dieser Bias wird bei der Positionsberechnung dem Uhrenfehler des Empfängers zugeschlagen.

Die Veränderungen durch die Driftwerte ergeben sich aus der unterschiedlichen ionosphärischen Verzögerung für die Satelliten. Je nach der Position des Satelliten (gegeben durch Azimut und Elevation) ändert sich die ionosphärische Verzögerung für das GPS-Signal. Dies kann eine Zu- oder Abnahme bei der Verzögerung verursachen, bzw. können auch kleinräumige Einflüsse auftreten. Werden bei den Berechnungen noch die DGPS-Korrekturwerte berücksichtigt, so ergeben sich Restfehler, die deutlich enger beieinander liegen und nur noch die konstanten Anteile der DGPS-Korrekturen enthalten. Die so bestimmten Fehler der Pseudorange-Messungen sind in den Abbildungen 2.7-12 bis 14 für alle drei DGPS-Dienste dargestellt.

Ausgangsdaten sind eine Messung auf dem Killesberg, die bereits bei der Analyse der DGPS-Korrekturen genutzt wurden. In der Abbildungen 2.7-11 sind nochmals die Pseudorange-Restfehler ohne DGPS-Korrektur gezeigt. Hier treten die atmosphärischen Effekte sehr deutlich hervor. Die Restfehler nach Berücksichtigung der DGPS-Korrekturen sind von den atmosphärischen Einflüssen bereinigt und zeigen bereits deutlich Strukturen, wie sie bei Mehrwegeeffekten auftreten. Bemerkenswert ist der Umstand, dass die Restfehler für alle drei DGPS-Dienste diese Strukturen zeigen. In Tabelle 2.7-1 sind die Standardabweichungen der Restfehler für diese Messung zusammengestellt. Die 1-Sigmawerte liegen für alle drei Dienste unter 2m und ergeben bei HDOP-Werten von kleiner 2 einen Positionsfehler, der stets unterhalb von 4m liegt.

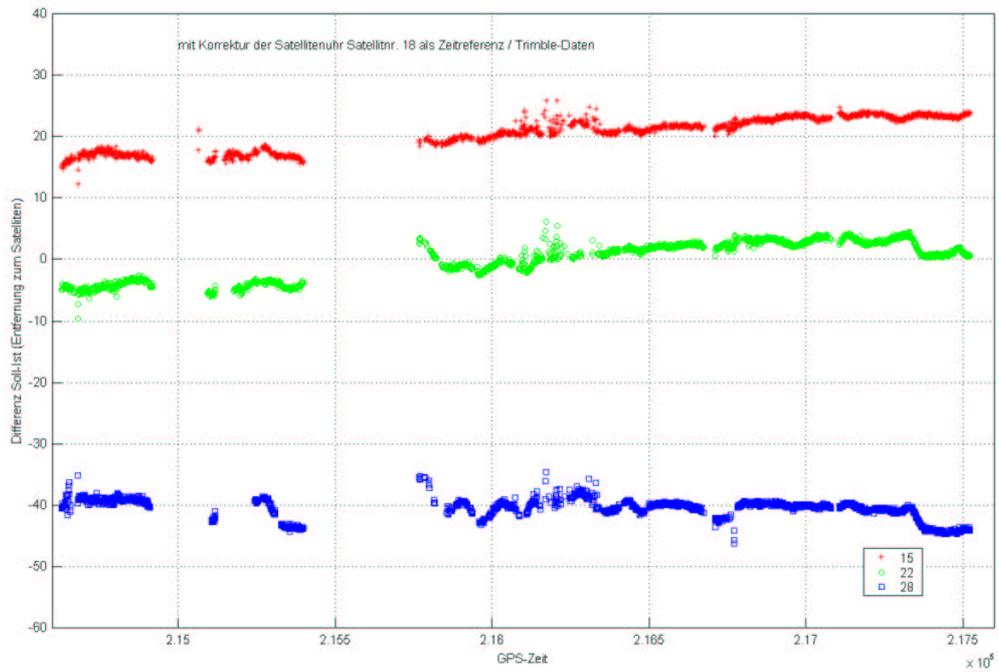


Abbildung 2.7-9: Differenzen zwischen den Restfehlern der Satelliten 15,22,28 und den Restfehlern des Satelliten 18 als Referenz beim Trimble.

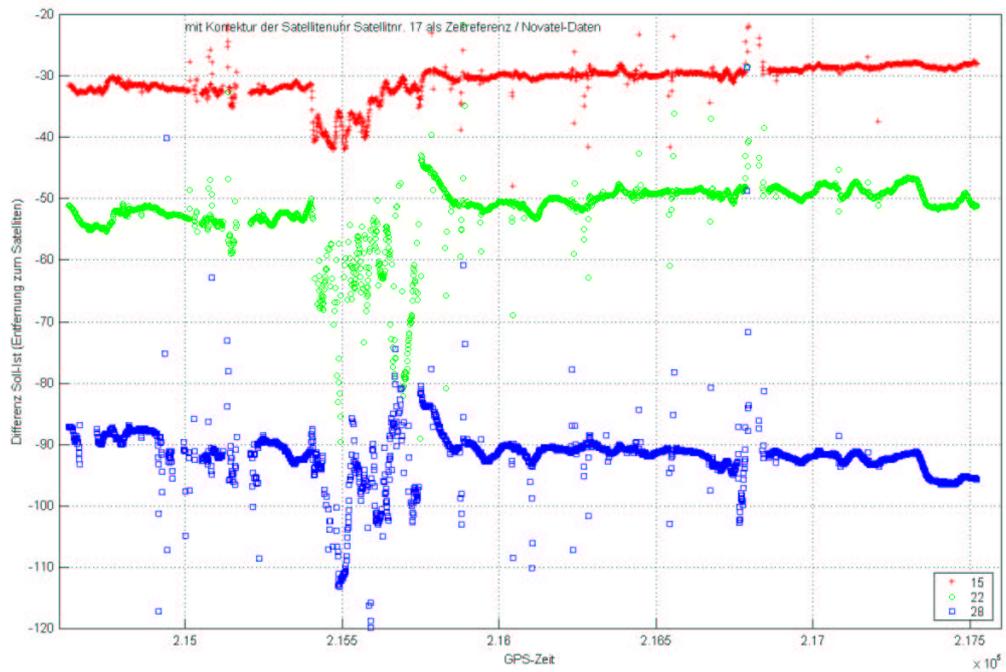


Abbildung 2.7-10: Differenzen zwischen den Restfehlern der Satelliten 15,22,28 und den Restfehlern des Satelliten 17 als Referenz beim NovAtel

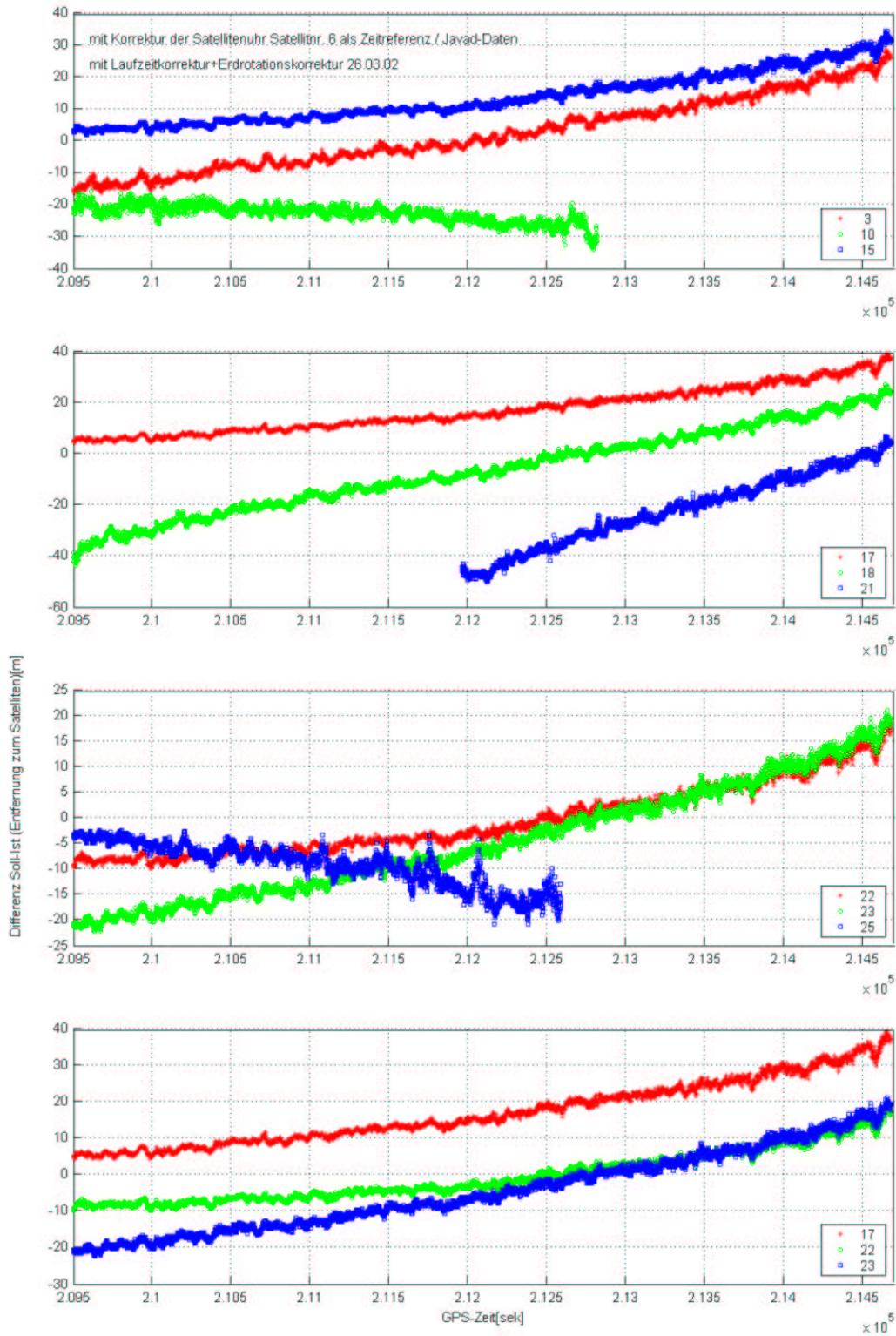


Abbildung 2.6-11: Pseudorange-Restfehler mit Anteilen der Atmosphäre

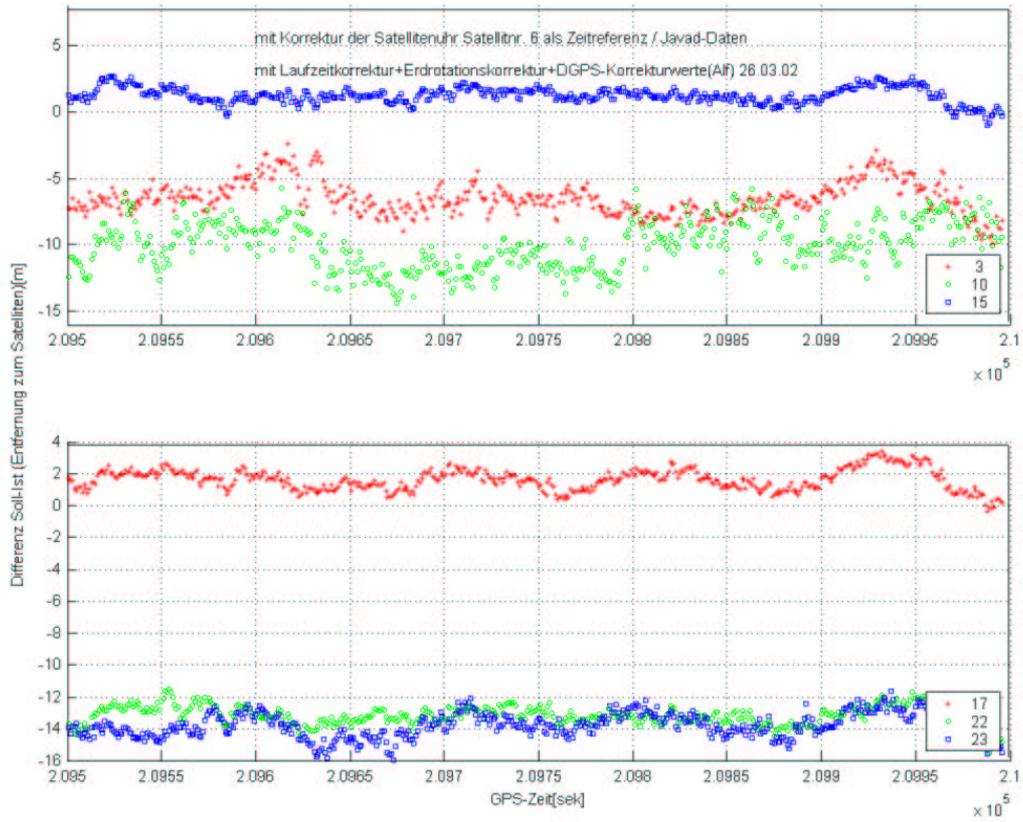


Abbildung 2.7-12: Pseudorange-Restfehler nach Berücksichtigung von ALF-DGPS-Korrekturen

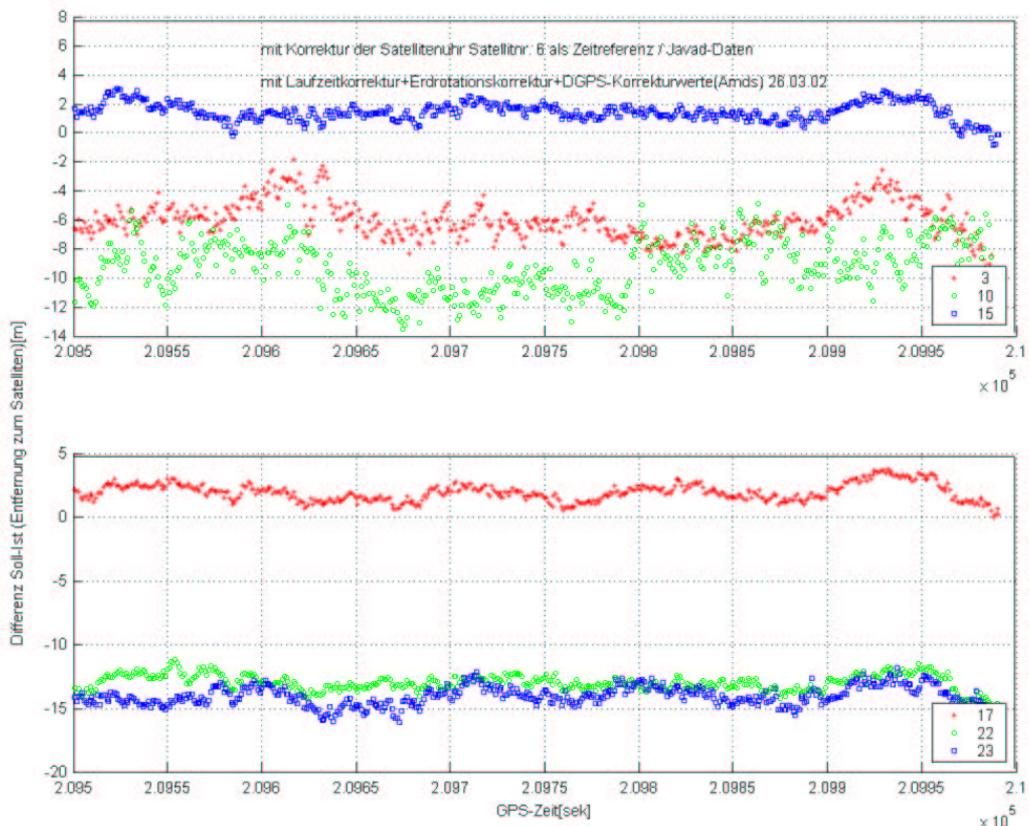


Abbildung 2.7-13: Pseudorange-Restfehler nach Berücksichtigung von AMDS-DGPS-Korrekturen

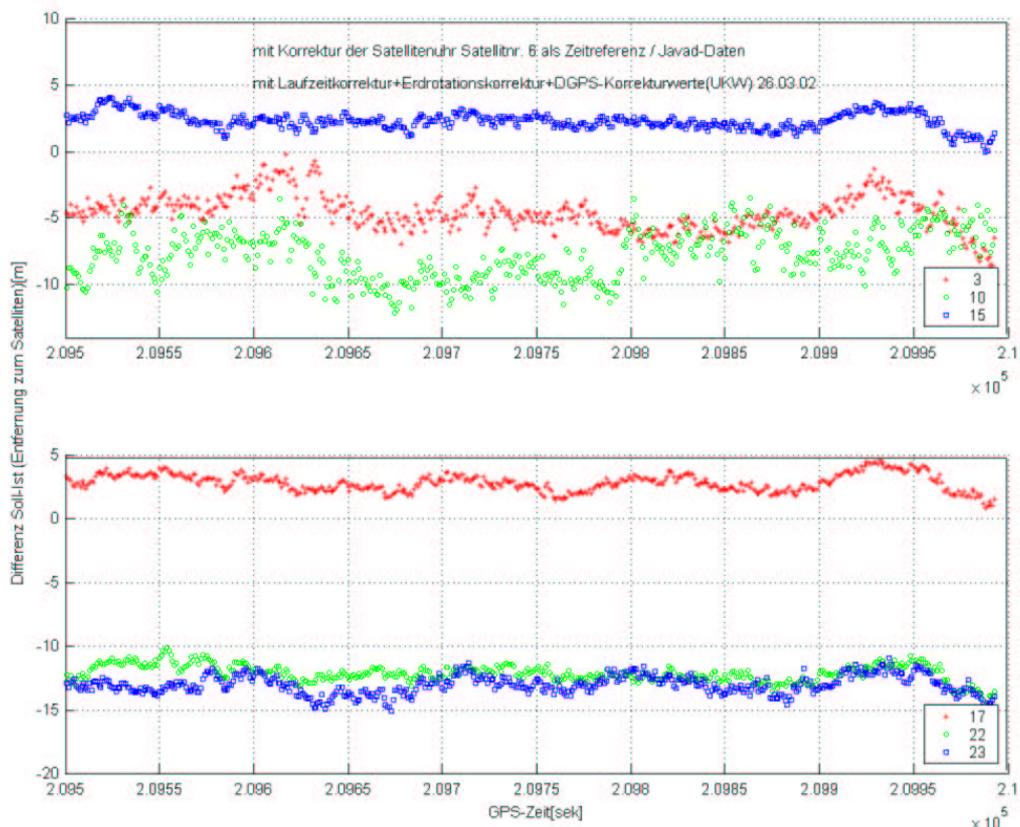


Abbildung 2.7-14: Pseudorange-Restfehler nach Berücksichtigung von UKW-DGPS-Korrekturen

Satellitennummer	3	10	15	17	22	23
ALF						
Mittelwert [m]	-6.52	-10.01	1.23	1.61	-13.22	-13.82
Standardabweichung [m]	1.26	1.80	0.60	0.66	0.64	0.77
AMDS						
Mittelwert[m]	-6.03	-9.23	1.45	1.91	-13.01	-14.05
Standardabweichung [m]	1.27	1.84	0.62	0.69	0.63	0.75
UKW						
Mittelwert [m]	-4.62	-7.80	2.29	2.79	-12.16	-13.04
Standardabweichung [m]	1.34	1.83	0.64	0.68	0.67	0.73

Tabelle 2.7-1: Mittelwerte und Standardabweichungen für Pseudorange-Messungen der Javad-Daten im Vergleich zu den Sollstrecken (Korrektur der Satellitenuhr mit Satellitnr. 6 als Zeitreferenz mit Laufzeitkorrektur + Erdrotationskorrektur + DGPS-Korrekturwerte 26.3.02)

2.8 Erfahrungen mit EUROFIX und EGNOS

Mit EUROFIX und EGNOS stehen zwei weitere DGPS-Dienste zur Verfügung, die überregional genutzt werden können. Die Nutzung der Empfänger war im Rahmen einer Beteiligung beim LOREG Programm möglich. Die hier durchgeführten Messungen, die parallel zu den anderen Messungen erfolgten, wurden nur auf die Verfügbarkeit dieser Systeme untersucht. Dies war für EGNOS in den registrierten Daten begründet, da über den NMEA-String nur die Information über DGPS (vorhanden/nicht vorhanden) vorlag, verbunden mit dem Datenalter. Bei Eurofix standen auch die DGPS-Korrekturwerte im RTCM-Format zur Verfügung. Diese Daten wurden aber nicht in die Auswerterroutine eingespeist, da zu große Ausfälle zu verzeichnen waren. Die Ursache ist in der schwierigen topographischen Umgebung von Stuttgart (Talkessel) zu suchen.

Der anteilige Empfang von EGNOS während der Messfahrten ist in der Tabelle 2.9-1 dem Empfang von ALF über die Nutzung von drei GPS-Empfängern gegenübergestellt. Bei diesen Fahrten war die Umgebung stets nur zu einem

geringen Anteil urbaner Bereich. Die Fahrt nach Göppingen war hauptsächlich auf einer vierspurigen Bundesstraße, nach Waldenbuch auf Landstraßen über das Fildergebiet und nach Freiburg in den Schwarzwald waren Autobahn, Landstraßen auf Höhenrücken und durch Täler vertreten. Bis auf wenige Bereiche, in denen auch kein GPS-Empfang (weniger als vier Satelliten) möglich war, haben wir mit dem Empfang der EGNOS-Korrekturdaten gerechnet. Es zeigte sich aber, dass nur während ca. 10% der Messzeit EGNOS-Korrekturdaten empfangen wurden, die den DGPS Modus (mit DGPS) für den EGNOS-GPS-Empfänger erlaubten. Aus der Tabelle ist außerdem zu entnehmen, dass bezüglich der GPS-Ausfälle, d.h. die Empfänger können keine Positionsbestimmung durchführen, der MOTOROLA- Empfänger die niedrigsten Ausfallzeiten aufweist. Der EGNOS-GPS-Empfänger zeigt hier nur geringfügig schlechteres Verhalten, hat aber nur wenig DGPS-Empfang.

Trotz des relativ niedrigen Elevationswinkels für EGNOS von weniger als 30° kann für die Bereiche im offenen Gelände ein sicherer Empfang des geostationären Satelliten erwartet werden und damit Empfang mit DGPS. Warum das DGPS-Empfängerergebnis für EGNOS bei diesen Fahrten so schlecht ausfiel, konnte trotz mehrfacher Überprüfung über stationäre Messungen nicht festgestellt werden. Legt man die hier gewonnenen Messergebnisse zu Grunde, so muss festgestellt werden, dass die Stützung mit EGNOS als zusätzlicher GPS-Satellit nur sporadisch zur Verfügung steht. Dies gilt in gleicher Weise für die differentielle Korrektur.

Göppingen 1				
Anzahl	kein GPS	ohne DGPS	mit DGPS	Empfänger
5954	5	87	8	EGNOS
5964	7	0	93	ASHTECH
5954	10	0	90	TRIMBLE
5954	1	0	99	MOTOROLA
Göppingen 2				
6820	5	83	12	EGNOS
6831	11	3	86	ASHTECH
6820	16	1	83	TRIMBLE
6820	1	1	98	MOTOROLA
Göppingen 3				
7540	4	88	8	EGNOS
7547	4	1	95	ASHTECH
7540	6	0	94	TRIMBLE
7538	1	0	99	MOTOROLA
Waldenbuch (hin)				
3515	5	80	15	EGNOS
3343	14	0	86	ASHTECH
3343	12	0	88	TRIMBLE
3343	0	0	100	MOTOROLA
Waldenbuch (rück)				
3521	5	90	6	EGNOS
3414	9	0	91	ASHTECH
3414	12	0	88	TRIMBLE
3414	1	0	99	MOTOROLA
Schwarzwald				
7788	5	91	4	EGNOS
7794	16	0	84	ASHTECH
7787	11	89	0	Trimble ohne DGPS
7787	1	0	99	MOTOROLA

Tabelle 2.8-1: Verfügbarkeit der DGPS-Dienste von ALF und EGNOS bei Messfahrten

2.9 Schlussbetrachtung

Die Durchführung der Messungen für dieses Projekt erforderte ein gut ausgerüstetes Messfahrzeug, mit dem neben einer genauen Positionsbestimmung auch die Signale von GPS und den DGPS-Diensten empfangen und registriert werden konnten. Die genaue Position wurde mit einem kommerziellen Navigationssystem von APPLANIX, bestehend aus einem GPS-Empfänger und einer Inertialeinheit, und der zugehörigen Software bestimmt. Zur Verbesserung und Stabilisierung dieser Werte wurden entweder das ABS oder ein optischer Wegstreckermesser und ein digitales Barometer eingesetzt. Diese zusätzlichen Messungen konnten über die APPLANIX-Software mit verarbeitet werden. Die damit erreichte Positionsgenauigkeit lag stets unterhalb einem halben Meter, auch bei Streckenabschnitten mit GPS-Störungen.

Bei den DGPS-Diensten standen neben AFL, AMDS und UKW-Rasant auch noch EUROFIX und EGNOS für einige Messfahrten zur Verfügung. Die Analyse der Empfangsbedingungen wurde mit den registrierten Daten der Dienste, den NMEA-Daten der GPS-Empfänger und den Messungen der Spektrumanalysatoren vorgenommen. Die Analyse der Daten des Spektrumanalysators zeigte, dass Signalausfälle/-unterbrechungen nicht durch Interferenz sondern durch Abschattungen verursacht wurden, die den Signalpegel deutlich absenkten. Für die Verfügbarkeit der Dienste ergaben sich in städtischer Umgebung für ALF und AMDS 70%, für UKW >90% und in ländlicher Umgebung lagen alle Dienste deutlich über 90%. Der Vorteil für UKW ist im ortsnahen Sender zu sehen, der auch in urbaner Umgebung noch ausreichend Signalpegel hatte. Für EGNOS war der Empfang in der Stadt fast immer nicht möglich, während bei den Fahrten über Land die Werte zwischen 4% und 15% schwankten.

Die Anzahl der Satelliten, für die Korrekturdaten geliefert werden ist ebenfalls unterschiedlich. Hier wurden über UKW-Rasant im Mittel die Korrekturen für einen Satelliten mehr übertragen. Dieser Unterschied kommt dann zum Tragen, wenn die Empfänger mehr Satelliten empfangen als Korrektursätze zur Verfügung stehen. Außerdem zeigen die Korrekturdaten unterschiedliches Datenalter innerhalb eines Übertragungsblocks. Hier sind Zeitdifferenzen von mehr als 30 Sekunden möglich. Wird die zulässige zeitliche Verzögerung der Korrekturdaten im Empfänger auf z.B. 10 Sekunden eingestellt, so fallen diese Korrekturwerte zusätzlich weg. Die Behandlung der DGPS-Korrekturen durch die verschiedenen Empfänger zeigt keine wesentlichen Unterschiede.

Die mit DGPS erzielten Genauigkeiten entsprechen den Erwartung von kleiner als fünf Meter (1 Sigmawert). Ein Sachverhalt muss dabei aber berücksichtigt werden: Ergeben sich Störungen im GPS-Signal durch Mehrwege oder bei Signalabschattungen, so bleiben die Positionsfehler sehr groß und können durch DGPS nicht verbessert werden. Der Vergleich der erreichten Genauigkeit zwischen den DGPS-Diensten erbrachte einen erkennbaren Vorteil für UKW-Rasant. Dieser Vorteil ist in der ortsnahen Referenzstation zu sehen, die eine bessere Berücksichtigung der atmosphärischen Effekte gestattet. Dies zeigt sich sowohl bei den Mittelwerten der Ablagen, als auch bei den zugehörigen Standardabweichungen.

Die Untersuchung der GPS-Signale, bzw. der Pseudorangemessungen zeigt das direkte Verhalten der Entfernungsmessung. Bei dieser Untersuchung wurde die Sollstrecke vom Standort zum Satelliten berechnet und von der gemessenen Strecke abgesetzt. Diese Differenz zeigt die Einflüsse von Mehrwegesignalen und auch die Übergänge von korrekter Messung zu gestörter Messung beziehungsweise zum Signalausfall. Die hier berechneten Standardabweichungen sind mit weniger als 2m in dem Bereich, der für die Positionsgenauigkeit von besser als 5m die Voraussetzung bietet.

Die umfangreichen Messungen und Auswertung im Rahmen dieses Projektes zeigten einerseits die großen Möglichkeiten der Radionavigation, andererseits aber auch die Schwierigkeiten in kritischer Umgebung die Positionsbestimmung zu gewährleisten bzw. zuverlässige Information bezüglich der augenblicklichen Genauigkeiten zu bekommen. Bei Fahrten in ländlicher Umgebung stehen die DGPS-Dienste mit ALF, AMDS und UKW (RASANT) ohne Unterbrechung zur Verfügung. Kurzzeitige Abschattung wirken sich bei den GPS-Empfänger nur beim Datenalter aus. Nach Abschaltung von SA verändern sich die Korrekturdaten aber nur sehr langsam, so dass nach 60 Sekunden der Fehler durch das Datenalter kleiner als 0.4 m bleibt.

2.9.1 Verbesserungsmöglichkeiten

Die Grundgenauigkeit des Systems ist bei ungestörter Messung und unter Nutzung eines DGPS-Dienstes sehr gut. Die Ablagen von der Referenztrajektorie liegen dabei im Mittel kaum über einem Meter mit einer Standardabweichung von kleiner 3m. Eine Verbesserung dieser Grundgenauigkeit ist nur mit der Veränderung der Auslegung der Systemparameter zu erreichen. Die Möglichkeiten hier sind die Erhöhung der Frequenz für den PN-Code, z.B. auf 10MHz oder höher und in der Erhöhung der Signalleistung. Diese stärkere Sendeleistung bringt neben der Genauigkeit auch deutliche Vorteile in bewaldeten Gebieten und auch im Inneren von Gebäuden. Die höhere Taktfrequenz verlangt aber nach entsprechender Zuteilung von Sendefrequenzen und die höhere Sendeleistung ist direkt mit mehr Kosten verbunden.

In den Problembereichen, die mit Abschattungen und Mehrwegeeffekten belastet sind, hilft die höherer PN-Chiprate unmittelbar bei der Reduzierung des Mehrwegefehlers. Hier ist zum einen die Größenordnung des Fehlers verringert und auch der Umkreis um die augenblickliche Position für Reflektoren reduziert. Diese Verringerung geht proportional zur Erhöhung der PN-Chiprate. Gleichzeitig helfen hier bereits in den Empfängern vorgesehene Maßnahmen zur Minderung der Mehrwegeeffekte. Diese von Firmenseite eingebauten Verfahren können eine zusätzliche Reduktion des Fehler um mehr als 50% bewirken. Der Einfluss von Mehrwegefehlern kann damit sehr stark reduziert werden.

Die Abschattung von Satelliten in urbaner Umgebung wird durch eine Erhöhung der Anzahl der Satelliten im Orbit nur teilweise aufgefangen, da bei der Geometrie bzw. DOP-Werten nur eine unwesentliche Verbesserung zu erwarten ist. Der Vorteil liegt primär in der Tatsache, dass häufiger ausreichend Satelliten (mindestens 4) für die Positionsbestimmung zur Verfügung stehen – bei entsprechend ungünstiger Konfiguration. Die Unterstützung oder Überbrückung bei Ausfällen durch andere Sensoren im Fahrzeug bietet hier eine vertretbare Hilfe.

Grundsätzlich ist die atmosphärische Verzögerungen bei Einfrequenzgeräten eine Fehlerquelle, die nur über Zusatzinformationen beseitigt werden kann. Hier übernehmen die DGPS-Dienste am Boden diese Funktion für eine Vielzahl von Nutzern. Die Messungen haben aber auch gezeigt, dass ausreichend Satelliten empfangen wurden aber keine DGPS-Dienste. Hier bietet sich an, die Korrekturen über die Navigationssatelliten direkt zur Verfügung zu stellen. Dies ist auch bei niedriger Übertragungsrate möglich, da die Veränderungen bei den Pseudorange-Messungen nur sehr langsam erfolgen. Für normale Anwendungen ist damit nur ein GNSS-Empfänger erforderlich, der alle Informationen von den Satelliten erhält. Da neben den Korrekturwerten auch Integritätsinformationen geliefert werden können, kann gleichzeitig die Zuverlässigkeit gesteigert werden.